



**UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE**

THESE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR

DE L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

**Discipline : Génie Civil**

**Présentée par NICAISE SIMPLICE BOUSSOUGOU**

**TITRE : EVALUATION DE L'EFFICACITE DES TRANSPORTS EN  
COMMUN URBAINS EN SITE PROPRE, ELABORATION D'UN  
MODELE MATHEMATIQUE D'OPTIMISATION DU DEBIT HORAIRE**

**COMPOSITION DU JURY :**

M. YVES DELMAS : Président, Professeur à l'Université de Reims

M. DIAB YOUSSEF : Rapporteur, Professeur à l'Université Marne La Vallée

M. TROALEN J.P : Rapporteur, Professeur à l'Université de Reims

M. BUYLE-BODIN F : Examineur et Directeur de thèse, Professeur à  
l'Université des Sciences et Technologie de Lille

**Equipe : Sols, Matériaux, Structures et Ouvrages (UMR, CNRS LML 8107)**



**Polytech'Lille**

LABORATOIRE  
de MECANIQUE  
de LILLE  
UMR CNRS 8107



UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE - U.S.T.L - ECOLE POLYTECHNIQUE  
UNIVERSITAIRE DE LILLE - E.P.U.L - Cité Scientifique, Avenue Paul Langevin 59 655 Villeneuve d'Ascq Cedex

Tel : + 33 (0) 320 434 610 – Fax : + 33 (0) 320 767 301

**Evaluation de l'efficacité des transports en commun urbains en site propre, élaboration d'un modèle mathématique d'optimisation du débit horaire.**

***Evaluation of the efficiency of the urban public transportation in bus lane, elaboration of a mathematical model of optimization of the hourly flow.***

Le mal endémique « congestion » dont souffrent nos cités depuis plusieurs décennies est le résultat du développement anarchique de la motorisation réduisant la place de la mobilité des usagers des transports en commun dans un espace viaire « figé » en raison du fait que les infrastructures viaires sont aujourd'hui difficilement extensibles alors que les populations à déplacer augmentent.

En se fixant pour objectif, de permettre la mobilité souhaitée par le citoyen à un niveau de qualité équivalent à celui des modes individuels quel que soit le mode de transport collectif utilisé, l'originalité de ce travail est d'élaborer un outil mathématique d'analyse permettant de faire une optimisation technique et économique du débit horaire basée sur les différentes performances techniques des véhicules de modes utilisés, capable de s'appliquer à tout type de ville quelque soit son histoire, son époque, sa forme et à tout type de réseau de transport en commun quelque soit le contexte urbain.

*The endemic evil "congestion" from which our towns (estates) for several decades suffer from is the result of the anarchy development of the motorization reducing the place of the mobility of the public transport users in a "congealed" space because of the fact that infrastructures are with difficulty stretchable today while the populations to be moved increase.*

*By settling for objective, to allow the mobility wished by the citizen a quality level equivalent to that of the individual modes whatever is the used collective way of transporting, the originality of this work is to elaborate a mathematical tool of analysis allowing to make a technical and economic optimization of the hourly flow based on the various technical performances of the vehicles of used modes, of capable of applying to any city type about either its history, its time, its shape and in any type of transport network in common about or the urban context.*

**Mots clefs** : Débit horaire, Vitesse inter station, Vitesse commerciale, Temps inter station, Temps d'arrêt en station.

**Keywords** : Hourly flow, Speed inter station, Commercial speed, Time inter station, Pause in station.

# **THESE DE DOCTORAT**

**TITRE : EVALUATION DE L'EFFICACITE DES TRANSPORTS  
EN COMMUN URBAINS EN SITE PROPRE, ELABORATION  
D'UN MODELE MATHEMATIQUE D'OPTIMISATION DU DEBIT  
HORAIRE**

# Remerciements

Le présent mémoire reflète quatre années de recherche effectuées au sein de l'équipe « Sols et Ouvrages en Sites Urbains » du LML - Laboratoire de Mécanique de Lille - équipe située dans les murs de l'U.S.T.L – Université des Sciences et Technologies de Lille – , E.PU.L – Ecole Polytechnique Universitaire de Lille. Je désire tout d'abord remercier toutes les personnes que j'ai pu côtoyer durant ces quatre années et qui ont, de près ou de loin, participé à leur bon déroulement, tant au niveau scientifique, qu'amical ou encore personnel. Une certaine émotion accompagnant inévitablement la fin d'une telle aventure, que des éventuels oubliés de ces remerciements me pardonnent.

J'adresse donc mes tous premiers et sincères remerciements à mon directeur de thèse monsieur le professeur François BUYLE-BODIN qui a mis à ma disposition son entière disponibilité, son expérience, ses compétences, son apport scientifique et surtout sa patience notamment dans les moments les plus difficiles de ma thèse et que je considère aujourd'hui comme un ami personnel pour la vie.

J'adresse également mes remerciements à tout le personnel du Laboratoire de Mécanique de Lille et plus largement de l'Ecole Polytechnique Universitaire de Lille pour sa franche collaboration, puis à monsieur Jean Mesmin IGNOUMBA IGNOUMBA, à monsieur André Sylvain DIKA MABIKA pour leur soutien infaillible.

J'exprime ma profonde gratitude à l'équipe de recherche du projet INDUIT (Infrastructure Durable Intégré pour Transport collectif de surface) conduite par monsieur Jean-Pierre CHRISTORY du Ministère de l'Equipement, pour avoir organisé et supervisé plusieurs missions de recherche aussi bien en France comme à l'étranger, à monsieur Philippe EKOUTTE, responsable de l'entretien et de la maintenance des matériels mode lourd à Transpole pour ses visites guidées, à madame Audrey MAIRIE de la Direction de l'Action Commerciale également à Transpole pour son aide documentaire.

Mes remerciements vont aussi à l'endroit de mes collègues Thang Anh Long, Fnine Abdelilah, Bal lyes avec qui j'ai partagé le même espace de recherche.

Ma reconnaissance s'adresse ensuite aux membres de mon jury : M. Youssef DIAB, professeur à l'Université de Marne la Vallée, rapporteur, M. Jean-Pierre TROALEN, professeur à l'Université de Reims, rapporteur, et M. Yves DELMAS pour avoir accepté de présider mon jury de thèse.

## Sommaire

<b>Glossaire général.....</b>	<b>5</b>
<b>Introduction générale.....</b>	<b>7</b>
<b>Première partie : recherche documentaire.....</b>	<b>11</b>
• <b>Chapitre 1 : Cadre contextuel de l'étude.....</b>	<b>12</b>
• <b>Chapitre 2 : Les transports en commun urbains.....</b>	<b>75</b>
<b>Deuxième partie : étude réalisée.....</b>	<b>161</b>
• <b>Glossaire.....</b>	<b>162</b>
• <b>Introduction.....</b>	<b>164</b>
• <b>Chapitre 3 : Conception d'un modèle d'optimisation du débit horaire d'une ligne de transport en commun en commun en site propre.....</b>	<b>165</b>
• <b>Chapitre 4 : Présentation de quelques réseaux de transports en commun urbains français et calcul du débit horaire.....</b>	<b>231</b>
• <b>Applications du modèle et résultats.....</b>	<b>321</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>322</b>
<b>Bibliographie générale.....</b>	<b>335</b>

## Glossaire général

TERME	DEFINITION
<b>PMR</b>	Personnes à Mobilité Réduite
<b>Agenouillement</b>	fait de se pencher d'un coté ou d'un autre afin de rabaisser l'accès au véhicule
<b>Aire de remisage</b>	lieu de parcage des véhicules, en général situé dans un dépôt
<b>AOTP</b>	Autorité organisatrice des transports publics
<b>Arrêt</b>	lieu où s'effectue les échanges de voyageurs (montée et/ou descente)
<b>Bandeaux</b>	plaques métalliques placées de façon amovible sur les flans des voitures sur lesquelles sont indiqués les principaux points desservis par la ligne (RATP)
<b>Billettique</b>	ensemble des outils permettant la gestion des titres de transport
<b>Charge</b>	nombre de voyageurs en voiture.
<b>Coquille</b>	(Uniquement RATP) : matériel roulant ayant un numéro permanent (à vie) de coquille à quatre chiffres.
<b>Correspondance</b>	fait de faire correspondre les horaires de deux modes de transport pour permettre le transbordement des voyageurs en minimisant les temps d'attente
<b>Dépôt</b>	point de remisage du matériel et d'attachement du personnel
<b>Moteurs Euro 3</b>	moteurs répondant à la Norme 2001 au niveau des émissions de gaz polluant
<b>GART</b>	Groupement des Autorités Responsables des Transports
<b>Girouette</b>	dispositif d'affichage d'informations sur le matériel roulant
<b>GNV</b>	Gaz Naturel pour Véhicule.
<b>GPL</b>	Gaz de Pétrole liquéfié.
<b>Intermodalité</b>	connexion de plusieurs modes de transport permettant leur utilisation au cours d'un même déplacement.
<b>Multimodal</b>	se dit d'un lieu qui accueille plusieurs types de transports : tramways, trains, bus
<b>Multimodalité</b>	existence de différents modes de transport dans une agglomération, sans qu'ils soient forcément utilisés lors d'un même déplacement.
<b>Machiniste</b>	nom d'un conducteur de bus
<b>Marche lente</b>	réduction d'allure du bus.
<b>Mise en station</b>	fait de positionner une voiture au terminus départ.
<b>Palette UFR</b>	palette permettant aux poussettes et fauteuils roulants de rentrer ou de sortir du bus sans problème.
<b>Parc relais</b>	parking de stationnement à proximité des stations de transports publics
<b>P+R</b>	parkings relais situés à l'entrée des villes
<b>PDU</b>	Plan de Déplacements Urbains
<b>Point d'arrêt</b>	point de montée et descente des voyageurs.
<b>Point de charge maximal</b>	point d'arrêt au départ duquel, pour une direction et une période horaire donnée, la charge à bord des voitures est maximale.
<b>Pointe</b>	période de la journée où la demande de transport est maximale
<b>Relève</b>	changement d'un agent sur une voiture.
<b>Remisage</b>	action de parcage d'un véhicule au dépôt
<b>Réseau routier</b>	se dit d'un ensemble de routes, autoroutes, réseaux de bus, gares routières, parcs de stationnement. Il peut être en site propre ou partagé

<b>Réseau ferroviaire</b>	se dit d'un ensemble de lignes de chemins de fer, de métro, de tramway, gares, triages, chantiers de transport combiné
<b>SAE</b>	Système d'aide à l'exploitation permettant la gestion des horaires, des afficheurs, de l'information clientèle.
<b>SAM</b>	Système d'Aide à la Maintenance.
<b>Site propre</b>	se dit d'un espace réservé exclusivement, à un mode de transport, sans que les autres puissent empiéter dessus, mais peut être accessible aux piétons.
<b>Site propre intégral</b>	se dit d'une plate forme inaccessible aux voitures comme aux piétons
<b>Site mixte</b>	se dit d'une voirie équipée simultanément de rails et d'une chaussée par exemple une voie mixte sur laquelle circulent les tramways et les bus
<b>Site protégé</b>	se dit d'une plate-forme protégée des voies de circulation par une bordure de faible hauteur. Elle peut être empruntée exceptionnellement par une voiture, un véhicule de secours.
<b>Site banalisé</b>	se dit d'une solution adoptée dans des rues de faible largeur dans lesquelles la circulation automobile peut être restreinte à la desserte des riverains.
<b>Standard</b>	matériel roulant répondant à une standardisation de production
<b>TCSP</b>	Transports en Commun en Site Propre, c'est à dire empruntant une voie réservée
<b>Terminus</b>	point caractéristique d'une ligne correspondant au début ou à la fin d'une mission.
<b>Transfert modal</b>	report régulier d'un mode de transport sur un autre pour effectuer un déplacement.
<b>Tronc commun</b>	itinéraire commun à plusieurs lignes ou partie d'une ligne à antennes empruntée par toutes les courses qui ne sont pas haut-le-pied.
<b>Véhicule de réserve</b>	véhicule prévu disponible à un poste de réserve
<b>Voiture</b>	moyen matériel utilisé pour l'exploitation d'une ligne.



# Introduction générale

L'offre de transports en commun urbains a la nécessité de croître pour répondre à une demande croissante soit naturellement soit de façon volontariste. Le problème procède en grande partie d'un mal endémique appelé « la congestion » dont souffrent nos cités depuis plusieurs décennies. Empruntée à la médecine, cette notion traduit le développement de la motorisation et de la mobilité dans un espace viaire « figé ». Associée au développement horizontal (étalement urbain) et vertical (immeubles) imposé par la croissance démographique dans les villes et le développement urbain mal maîtrisé, son niveau est très dépendant des mutations structurelles que connaissent nos sociétés et nos économies.

Les infrastructures viaires sont aujourd'hui difficilement extensibles. Il faut néanmoins permettre la mobilité souhaitée par le citoyen à un niveau de qualité équivalent quel que soit le mode de transport. Il convient donc de privilégier les modes collectifs au détriment des individuels.

La segmentation de l'espace urbain ramène le problème de congestion à un problème de mécanique des fluides en considérant les paramètres de trafic comme la vitesse et le débit. La vitesse est le rapport de la distance parcourue sur le temps nécessaire à la parcourir. Cela nous amènera à retenir la notion de temps « porte à porte » que mettra un usager sachant que nécessairement il y aura intermodalité, de piéton à cycliste, d'automobiliste à usager de train, ou de métro, ou de bus... L'utilisateur considéré comme particule dans un écoulement sera donc sensible à la vitesse, mais aussi au débit et à la « pression », équivalent de la charge hydraulique ou de la compression dans une voiture de métro saturée.

Dans l'agglomération de Paris, la vitesse moyenne de la circulation urbaine est de plus en plus faible malgré une baisse continue du trafic automobile. Ainsi, la vitesse moyenne de la circulation est passée de 19,3 km/h en 1996 à 16,6 km/h en 2001 (soit une baisse de 14 %). Paradoxalement dans le même temps le trafic automobile a diminué de 9 %, et en dépit d'une certaine stabilité depuis 2001 a conduit paradoxalement à 15,9 km/h en 2005.

Le phénomène d'embouteillage apparaît généralement au niveau d'un goulet d'étranglement (qui peut provenir de l'infrastructure ou de la régulation, ou être provoqué par une cause occasionnelle). La plupart des recherches sur leur prévention ont porté sur les infrastructures avec comme objectif de réguler la circulation des voitures particulières en adoptant des solutions

techniques permettant de diminuer la gêne occasionnée par les livraisons et le stationnement illicite.

La discordance entre la circulation automobile et celle des transports en commun appelle à la recherche de solutions équilibrées entre un besoin de déplacement en perpétuelle augmentation et la difficulté à insérer dans un espace urbain de plus en plus saturé des modes de transport contradictoires.

Nous avons recherché dans ce travail de thèse un compromis entre la circulation automobile et celle des transports en commun en site propre (TCSP) en élaborant un modèle mathématique visant à optimiser l'exploitation des réseaux de transports en terme de débit horaire.

L'élaboration de ce modèle doit permettre une analyse approfondie du problème de congestion avec pour objectif final d'améliorer l'**efficacité** des transports en commun et de faciliter leur **insertion** dans le trafic urbain par le biais de différents paramètres comme la capacité des véhicules, la fréquence d'exploitation, la vitesse commerciale. L'objectif est d'identifier les différentes stratégies à adopter. En effet, l'optimisation des transports en commun passe par les matériels par l'amélioration des performances techniques, ce qui se traduira pour les usagers par une bonne accessibilité et une meilleure qualité de service. Notre objectif est donc triple : augmenter la vitesse commerciale, améliorer l'accessibilité, améliorer la qualité de service.

Le premier point vise à réduire le temps que l'utilisateur passe dans les transports en commun. En effet revenant au temps de porte à porte, les raisons qui peuvent l'amener à abandonner l'automobile sont d'une part les pertes de temps indirectes liées à l'usage de l'automobile (garage, recherche de place de stationnement) d'autre part l'accroissement de la vitesse des transports en commun. Pour cela la nature du site est importante. Lorsque la voie est franchie par d'autres véhicules ou des piétons, la vitesse dépasse difficilement 20 km/h et tombe à 15 km/h dans les zones où circulent beaucoup de piétons.

Le deuxième point vise à faciliter l'accès des transports en commun en particulier pour les personnes à mobilité réduite. En effet, environ 35 % des personnes rencontrent des difficultés lorsqu'elles utilisent les transports en commun et cette proportion augmente avec le vieillissement de la population. Parmi elles, une sur sept souffre d'un handicap d'ordre médical, mais la majorité sont celles accompagnées d'enfants en bas âge (landau, poussette),

encombrées de bagages ou simplement âgées. Améliorer l'accessibilité des transports en commun passe par le respect de la loi de 2005 qui spécifie que l'accessibilité des services de transport devra être assurée pour tous d'ici 2015. En cas d'impossibilité technique (métro par exemple), il devra être mis en place des transports de substitution d'ici 2018 sans augmentation de tarif. Cette loi concerne aussi la circulation des piétons.

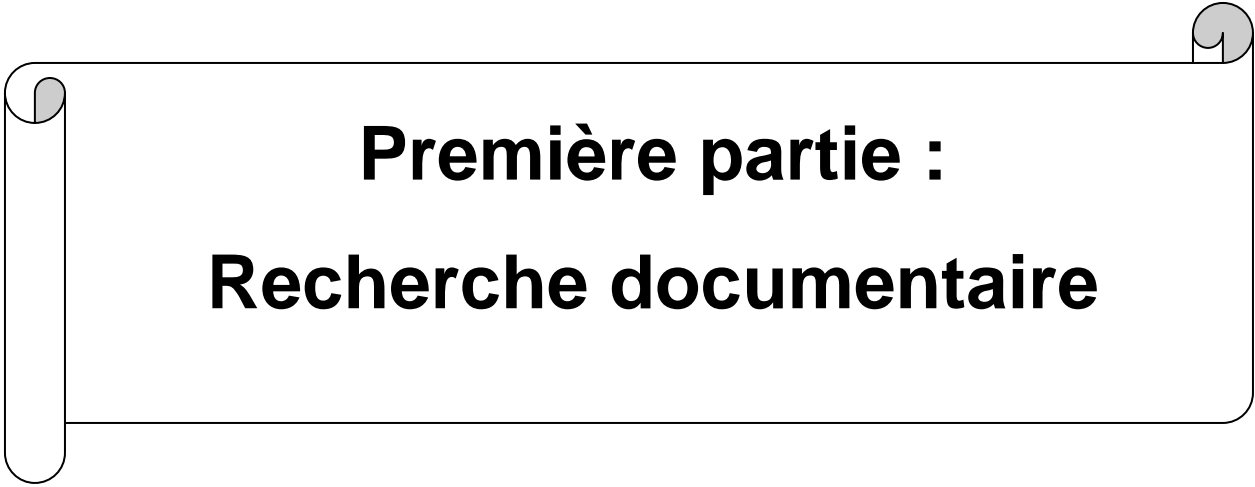
Le troisième point concerne les revendications récurrentes des usagers des transports en commun que sont le respect des horaires et l'augmentation de la fréquence des services. C'est un problème quasi insoluble (5 à 10 % des trains et des autobus ont un retard supérieur à cinq minutes en Ile-de-France).

En revanche, les efforts se sont portés depuis le milieu des années 1980 sur l'amélioration des prestations offertes aux usagers en particulier dans les lieux d'attente (billetterie, commodités offertes aux stations, information des usagers, etc.). Malheureusement, l'organisation de la billetterie influe encore fortement sur la commodité des déplacements. L'idéal pour le voyageur est de pouvoir effectuer l'ensemble de ses déplacements avec un seul billet, quels que soient les moyens de transport utilisés. Cet objectif est souvent difficile à atteindre à cause de la multiplicité des structures gérant les transports dans une aire urbaine (à l'exception de l'Ile-de-France pour laquelle l'aire urbaine se confond avec la région). Même si différents services peuvent être offerts aux usagers pour leur permettre d'utiliser au mieux les temps d'attente (commerces dans les gares ou aux arrêts de bus, affichage du temps d'attente des prochains passages), l'une des solutions pour améliorer la qualité de service est de rendre obligatoire la mise en place de centrales de mobilité qui proposent toutes sortes de prestations (transport à la demande, covoiturage, location de vélo, etc.) ainsi que l'exige la loi de décembre 2000 pour les agglomérations de plus de 100000 habitants.

Toutes ces mesures visant à faciliter l'usage des transports en commun par l'amélioration de la qualité de service. A travers cette thèse, nous adoptons une démarche qui montre que la réponse aux problèmes de congestion ne passe pas nécessairement par la construction de nouvelles infrastructures de transport, mais plutôt par une utilisation rationnelle des moyens de transport d'une ville afin d'optimiser leur rendement et de permettre une mobilité efficace des usagers.

Ce travail est divisé en deux parties et distribué en quatre chapitres. Dans le premier chapitre, nous présentons la ville comme un élément central de notre travail de thèse, en insistant sur son

fonctionnement et le rôle des principales auréoles qui gouvernent sa structure et son organisation. Nous traduisons sa morphologie grâce à son architecture, puis étudions la combinaison de ses différents éléments à travers la géographie urbaine. Le deuxième chapitre est consacré à une présentation globale des transports en commun urbains qui constituent l'une des composantes essentielles du fonctionnement d'une ville avec pour rôle majeur, de relier les différents points où s'exercent les activités commerciales, industrielles, sociales, de loisirs et touristiques et donc d'assurer la mobilité des personnes. Nous présentons à cet effet un panorama général notamment des grandes villes de France. Dans le troisième chapitre, nous développons une formulation mathématique qui permet l'optimisation de l'exploitation d'une ligne de transport en commun. Cette formulation tient compte de plusieurs paramètres et traduit de facto la difficulté de les agréger dans un modèle unique. Le quatrième chapitre est une application à différentes lignes de différents réseaux. Dans ce dernier chapitre, nous essayons de déterminer les profils exacts des vitesses commerciales mesurées sur terrain et tenant compte des arrêts dus à la présence des intersections et des stations. Enfin, nous terminons cette thèse par une conclusion générale évoquant les différentes technologies mises en œuvre, et insistant sur leur aspect économique, qui s'avère un élément de choix important à côté des performances techniques.



**Première partie :**  
**Recherche documentaire**

**CHAPITRE 1 :**

**CADRE CONTEXTUEL DE L'ETUDE**

# Table des matières du chapitre 1

<b>1.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>18</b>
<b>1.2</b>	<b>Définition de l'urbanisme.....</b>	<b>19</b>
1.2.1	Rôle de l'urbanisme.....	19
1.2.2	Les différentes formes et éléments de l'urbanisme.....	20
1.2.3	Les différentes formes de l'urbanisme.....	20
1.2.3.1	L'urbanisme de développement.....	20
1.2.3.2	L'urbanisme de gestion.....	21
1.2.3.3	L'urbanisme de participation .....	21
1.2.4	Les éléments de l'urbanisme .....	22
1.2.4.1.	Le site .....	22
1.2.4.2	Les espaces urbains .....	23
1.2.4.3	L'Agglomération.....	23
1.2.4.4.	L'Aire urbaine .....	23
1.2.4.5	La Conurbation .....	24
1.2.4.6	La Région urbaine .....	24
1.2.4.7	La Mégapole .....	25
1.2.4.8	La Métropole .....	25
1.2.5	Champs d'application de l'urbanisme .....	25
<b>1.3</b>	<b>Définition de la ville .....</b>	<b>26</b>
1.3.1	Classification des villes .....	26
1.3.1.1	Classification des villes selon la civilisation.....	27
1.3.1.1.1	La ville islamique .....	27
1.3.1.1.2	La ville européenne .....	28
1.3.1.1.3	La ville nord-américaine .....	29
1.3.1.1.4	La ville sud-américaine .....	30
1.3.1.1.5	La ville africaine .....	31
1.3.1.1.6	La ville asiatique .....	32
1.3.1.2	Classification des villes selon les époques.....	33

1.3.1.2.1	La ville antique .....	33
1.3.1.2.2	La ville médiévale.....	34
1.3.1.2.3	La ville classique.....	35
1.3.1.2.4	La ville libérale.....	36
1.3.1.2.5	La ville contemporaine .....	37
1.3.1.3	Classification des villes selon les modes de transport.....	38
1.3.1.3.1	La ville du piéton (walking city) .....	39
1.3.1.3.2	La ville du tramway .....	40
1.3.1.3.3	La ville digitée (traced-city).....	41
1.3.1.3.4	La ville de l'automobile (rubber city).....	41
<b>1.4</b>	<b>Modèles de villes.....</b>	<b>43</b>
1.4.1	Le modèle d'Amsterdam.....	43
1.4.2	Le modèle de Johannesburg.....	43
1.4.3	Les modèles dérivés des deux modèles de base.....	45
1.4.3.1	Le modèle Américain ou Californien.....	45
1.4.3.2	Le modèle Européen ou Rhénan.....	46
1.4.3.3	Le modèle Asiatique ou de type très dense.....	47
1.4.4	Typologie de plans ou de maillages d'une ville.....	48
1.4.4.1	Le plan ou maillage général.....	48
1.4.4.2	Les plans ou maillages organiques.....	49
1.4.4.3	Les plans volontaires ou imposés.....	50
1.4.4.4	Le plan radioconcentrique.....	51
1.4.4.5	Le plan hippodamien.....	52
1.4.4.6	Le plan linéaire.....	53
1.4.4.7	Le plan réticulaire distendu.....	55
1.4.4.8	Le plan introverti.....	55
1.4.4.9	Les plans ou maillages mono ou polygéniques.....	56
1.4.5	Les enjeux de la ville aujourd'hui.....	58
1.4.5.1	La démographie.....	58
1.4.5.2	Le mode de vie.....	58
1.4.6	Conséquences des enjeux de la ville aujourd'hui.....	59
1.4.6.1	Population habitant une zone urbaine.....	59
1.4.6.2	Déplacements des populations en fonction de l'activité.....	63



1.4.6.3	Nombre de déplacements en fonction de l'activité professionnelle.....	66
1.4.6.4	Moment de la journée où il y a le plus de déplacements.....	67
1.4.6.5	Modes de déplacements en fonction de la distance.....	68
<b>1.5</b>	<b>Conclusion du chapitre 1.....</b>	<b>74</b>

## Liste des photos du chapitre 1

Photo 1-1 : Le Mont Saint Michel.....	22
Photo 1-2 : Vue aérienne du quartier Beaulieu sur l'île de Nantes [SWC1.P2].....	24
Photo 1-3 : Vue aérienne de la ville de Cordoue en Espagne. [SWC1.P3].....	28
Photo 1-4 : Vue aérienne de la ville de Nantes en France [SWC1.P4].....	29
Photo 1-5 : Vue aérienne de la ville de Phoenix dans le Colorado aux USA [SWC1.P5].....	30
Photo 1-6 : Vue aérienne de la ville de Sao Paulo au Brésil [SWC1.P6].....	31
Photo 1-7 : Vue aérienne de la ville de Libreville au Gabon [SWC1.P7].....	32
Photo 1-8 : Vue aérienne de la ville de Xian en Chine [SWC1.P8].....	33
Photo 1-9 : Vue aérienne de la ville de Paris en France [SWC1.P9].....	34
Photo 1-10 : Maquette d'une ville médiévale [SWC1.P10].....	35
Photo 1-11 : vue aérienne de la ville de Versailles en France [SWC1.P11].....	36
Photo 1-12 : Vue aérienne des immeubles HBM à Paris en France [SWC1.P12].....	37
Photo 1-13 : Vue aérienne de la banlieue Est de Lille à Villeneuve d'Ascq [SWC1.P13].....	38
Photo 1-14 : Centre historique de la ville de Tourcoing [SWC1.P14].....	39
Photo 1-15: photo d'un street car aux Etats-Unis [SWC1.P15].....	40
Photo 1-16 : Vue aérienne de la Maisons-Lafitte en France [SWC1.P16].....	41
Photo 1-17 : Vue aérienne du John Hancock Center à Chicago aux USA [SWC1.P17].....	42
Photo 1-18 : Vue aérienne de la ville d'Amsterdam aux Pays-Bas [SWC1.P18].....	44
Photo 1-19 : Vue aérienne d'un quartier de Johannesburg en Afrique du Sud [SWC1.P19].....	45
Photo 1-20 : Vue aérienne de Los Angeles en Californie aux USA [SWC1.P20].....	46
Photo 1-21 : Vue aérienne de Bruxelles en Belgique [SWC1.P21].....	47
Photo 1-22 : Vue aérienne de Yokohama au Japon [SWC1.P22].....	48
Photo 1-23 : Maillage général de la ville de Londres en Angleterre [SWC1.P23].....	49
Photo 1-24 : Vue aérienne du centre ville de Nantes [SWC1.P24].....	50
Photo 1-25 : Plan de la ville de Bruxelles en Belgique [SWC1.P25].....	51
Photo 1-26 : Plan Palmanova, dans la région de Venise en Italie [PUB1].....	52

Photo 1-27 : Plan de Los Angeles dans l'Etat de Californie aux USA [SWC1.P27].....	53
Photo 1-28- a- : Vue aérienne du Caire en Egypt [SWC1P28-a].....	54
Photo 1-28- b- : Vue aérienne du Caire en Egypt [SWC1.P28-b].....	54
Photo 1-29: Maillage du Detroit dans l'Etat du Michigan aux USA [SWC1.P29].....	55
Photo 1-30 : Maillage de Damas en Syrie [SWC1.P30].....	56
Photo 1-31 : Maillage de Moscou en Russie [SWC1.P31].....	57

## Figures du chapitre 1

Figure 1-1: Diagramme d'évolution de la population urbaine mondiale. [ART1].....	60
Figure 1-2: Taux d'urbanisation et taux de croissance urbaine par continent [ART1].....	61
Figure 1-3: Répartition de la population urbaine mondiale dans les PVD [ART1].....	62
Figure 1-4: Répartition de la population urbaine mondiale dans PD [ART1].....	62
Figure 1-5: Répartition de la population française dans aire urbaine. [ART1].....	63
Figure 1-6: Répartition de la population française en campagne et zone urbaine [ART1].....	63
Figure 1-7: Répartition des déplacements des populations en fonction de l'activité [ART1].....	64
Figure 1-8: Répartition des déplacements obligatoires en fonction de l'activité [ART1].....	65
Figure 1-9: Répartition des déplacements des populations selon l'âge de la personne [ART1].....	66
Figure 1-10: Nombre des déplacements des populations urbaines selon l'activité et l'âge [ART1].....	67
Figure 1-11: Utilisation des différents modes de déplacement en zone urbaine [ART1].....	68
Figure 1-12: Modes de transport utilisés dans une zone urbaine [ART1].....	69
Figure 1-13: Part des transports urbains en île de France [ART1].....	70
Figure 1-14: Distance moyenne parcourue lors d'un déplacement en île de France [ART1].....	70
Figure 1-15: Part des déplacements domicile travail dans les zones urbaines H-I-F [ART1].....	71
Figure 1-16: Part des déplacements domicile travail H I F. [ART1].....	72
Figure 1-17: Part des déplacements domicile travail en poucentage H I F. [ART1].....	72

# Annexes du chapitre 1

## Annexes du chapitre 1

<b>Mobilité dans les années 80.....</b>	<b>351</b>
<b>A1.1 : Mobilité tous modes.....</b>	<b>351</b>
<b>A1.2 : Mobilité en voiture.....</b>	<b>351</b>
<b>A1.3 : Mobilité à pied.....</b>	<b>352</b>
<b>A1.4 : Mobilité en transports collectifs urbains.....</b>	<b>352</b>
<b>A1.5 : Mobilité en vélo.....</b>	<b>353</b>
<b>A1.7 : Parts de marché des transports collectifs urbains.....</b>	<b>353</b>
<b>A1.8 : Evolution du trafic des réseaux à TCSP (déplacements en milliers par année).....</b>	<b>354</b>
<b>A1.9 : Evolution du trafic des autres réseaux (déplacements en milliers par année).....</b>	<b>355</b>

## **1.1 INTRODUCTION**

L'élément central de notre travail de thèse est la ville. Le fonctionnement et le rôle des principaux éléments qui gouvernent la structure et l'organisation de la ville sont étudiés en architecture et en urbanisme. L'architecture d'une ville se traduit de fait par sa morphologie ; tandis que l'urbanisme étudie à travers la géographie urbaine la combinaison des différents éléments d'une ville. Pour mieux comprendre la structuration et l'organisation de la ville, nous définissons dans cette partie introductive d'une part l'urbanisme ainsi que le rôle qu'il joue, ses différentes formes et surtout ses champs d'application, et d'autre part la ville, en donnant une classification selon la civilisation, l'époque ainsi que le mode de transport, puis les différents modèles de villes rencontrés à travers le monde, leurs différents types de maillages, enfin les enjeux de la ville d'aujourd'hui.

## 1.2 DEFINITION DE L'URBANISME

L'urbanisme est une discipline assez difficile à définir. Pour **Françoise Choay**<sup>1</sup>, [CHO] il serait né de l'expansion de la société industrielle vers la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et début du XX<sup>e</sup>. Elle estime que c'est une discipline qui se distingue des arts urbains antérieurs par son caractère réflexif et critique et par sa prétention scientifique. A partir de cette définition, l'urbanisme correspond mieux à un **champ professionnel** qui a rapidement pris une dimension concrète et focalise des enjeux importants tels que, en ce qui nous concerne, **les formes urbaines, les réseaux de transports urbains**.

**Pierre Merlin**<sup>2</sup> [MER] déclare que l'Urbanisme est à la fois un **champ disciplinaire** et un **champ professionnel** recouvrant l'organisation de la ville et de ses territoires. Il ajoute qu'en tant que champ disciplinaire, l'urbanisme se fonde sur des théories qui sont en étroite filiation avec les sciences humaines (géographie, économie, science juridique, écologie, anthropologie, science politique, sociologie). En tant que champ professionnel, les pratiques et techniques de l'urbanisme découlent de la mise en œuvre des politiques urbaines (habitat/logement, transport, environnement, zones d'activités économiques et appareil commercial). Cette deuxième dimension recoupe la planification urbaine et la gestion de la cité (au sens antique du terme), en maximisant le potentiel géographique en vue d'une meilleure harmonie des usages et du bien-être des utilisateurs (résidents, actifs, touristes).

### 1.2.1 Rôle de l'urbanisme

L'urbanisme permet d'aménager et d'organiser les agglomérations humaines, et de façon plus précise de disposer l'espace urbain au sens le plus large (bâtiments d'habitation, de travail, de loisirs, réseaux de circulation et d'échanges) pour obtenir un meilleur fonctionnement et

---

<sup>1</sup> Françoise Choay est professeur d'urbanisme et architecte aux universités de Paris I et VIII et historienne des théories et des formes urbaines et architecturales. Écrivain et critique, elle est l'une des personnalités internationales les plus éminentes de l'urbanisme, de l'histoire de l'architecture et de la réflexion sur le patrimoine. Elle a reçu de nombreux prix et titres honorifiques : Premier récipiendaire du Grand prix national du livre d'architecture (1981), Grand prix national du patrimoine (1995), Membre de l'Académie des Beaux-Arts de Berlin (1999), Docteur honoris causa de l'Université de Gênes (2001). Elle est Auteurs de plusieurs ouvrages dont l'un des plus célèbres est : L'urbanisme en question dans « L'Urbanisme, utopies et réalités », Editions du seuil - Paris- 1965, et Collection Points essais, Editions du Seuil 1979

<sup>2</sup>améliorer les rapports sociaux. Il élabore un ensemble de règles de droit qui permettent aux pouvoirs publics de contrôler l'utilisation du sol en milieu urbain. De ce fait, les fonctions et les relations entre les hommes s'exercent de la façon la plus commode, la plus économique et la plus harmonieuse possible [LAC].

## **1.2.2 Les différentes formes et éléments de l'urbanisme**

L'urbanisme s'identifie grâce à sa forme et à ses éléments. Vu comme une profession qui s'applique à diverses échelles, il crée de nouveaux quartiers pour faire face à l'expansion urbaine (parfois appelé urbanisme de développement), traite le centre urbain, assure le maintien de ses fonctions (urbanisme de gestion). Il permet d'équiper, de réhabiliter, parfois de remanier les anciens quartiers en tenant compte des avis des habitants qui bien souvent diffèrent de ceux des professionnels et des politiques (urbanisme de participation). Enfin, il protège l'environnement autour des villes, voire en milieu rural (urbanisme de protection). Ce dernier cas dépasse notre cadre d'étude vu qu'il se situe hors des limites de la ville, élément central de notre travail de thèse [ALL].

## **1.2.3 Les différentes formes de l'urbanisme**

### **1.2.3.1 L'urbanisme de développement**

Il correspond au développement urbain des villes s'opérant par l'adjonction de nouveaux quartiers et par la conquête progressive de l'espace rural. Cette conquête peut se faire sans schéma prédéfini, mais il se revendique quelquefois transversal et peut dans ce cas être à double objectif : il prône à la fois la ruralisation des villes et l'urbanisation du milieu rural. C'est une croissance spatiale qui résulte de la conjonction de deux facteurs : la croissance démographique et l'élévation du niveau de vie, qui entraîne celle de la consommation d'espace par habitant. Cette consommation est plus rapide dans les pays anglo-saxons (Etats-Unis) où la préférence est donnée à l'espace disponible contrairement aux pays de tradition latine où l'on

---

<sup>2</sup>Pierre Merlin est professeur émérite à l'université de Paris Panthéon Sorbonne et président de l'Institut d'urbanisme et d'aménagement de la Sorbonne. Il a été président de l'Institut français d'urbanisme de l'université Paris VIII- Vincennes, de l'Association pour la qualité de la science française, de l'Association des Instituts francophones d'aménagement et d'urbanisme d'Île-de-France Environnement. Il a présidé le groupe interministériel "Aménagement touristique, protection de l'espace et politique sociale de loisirs".

préfère la proximité du centre. La particularité de l'urbanisme de développement est de réguler ou de mieux d'accompagner les besoins d'extension des villes sans imposer une vraie marche à suivre **[PEL]**.

### **1.2.3.2 L'urbanisme de gestion**

L'urbanisme de gestion est un outil qui oblige les pouvoirs publics à s'interroger sur la manière de gérer les potentialités et l'héritage du centre urbain. Les actions potentielles à mener sont les opérations de rénovation et de réhabilitation urbaines qui prennent en compte la pression foncière.

Le centre urbain, surtout lorsqu'il est ancien, pose tout le problème du tissu urbain en ce que celui-ci réunit les bâtiments symboliques et les monuments historiques. Ce tissu urbain traduit l'histoire spatio-temporelle de la ville avec des inégalités selon les cas. Les problèmes se référant à la gestion couramment rencontrés sont ceux de l'inadaptation aux exigences de la vie moderne : logements exigus et inconfortables ou au contraire somptueuses demeures (hôtels particuliers) mais peu compatibles avec les moyens des contemporains.

Le réseau de voirie est également inadapté aux transports modernes, notamment à l'automobile, en raison du déficit des espaces de stationnement, de l'insuffisance des espaces verts, des nuisances importantes (bruit, pollution), ce qui, conjugué à des coûts fonciers très élevés, fait fuir les familles avec des enfants vers les banlieues **[BAR]**.

### **1.2.3.3 L'urbanisme de participation**

L'urbanisme de participation est une politique d'obligation implicite des propriétaires privés à participer au développement de la ville. Les quartiers anciens souffrent couramment des mêmes inadaptations que le centre ville : exigüité et inconfort des logements, inadaptation de la voirie automobile, nuisances, ségrégation, sans que la pression foncière soit importante, ce qui limite la capacité d'évolution spontanée. Dans ces quartiers, le traitement est nuancé pour améliorer ou conforter les immeubles. La mise en place d'une politique d'amélioration de l'habitat est parfois très délicate à mener, du fait qu'elle exclut souvent l'expropriation et que la transformation du tissu urbain est à l'initiative des propriétaires privés **[CAR]**.

### <sup>3</sup>1.2.4 Les éléments de l'urbanisme

La forme urbaine se traduit par la morphologie des systèmes et des sous systèmes urbains. Elle peut être décomposée en trois composantes : les éléments, qui forment une structure (mode d'organisation de ces éléments), qui elle-même obéit à des logiques spontanées ou réglementées que l'on peut appeler les moyens. Ces éléments correspondent aux trois structures que **M.R.G. Conzen**, père de la morphologie urbaine anglo-saxonne, voyait dans la forme urbaine : **le plan, le bâti et l'usage du sol [M.R.G.]**. Ils peuvent être détaillés en cinq composantes essentielles que sont : le plan, le parcellaire, le bâti, l'utilisation du sol, le site. Dans notre travail de thèse, nous nous intéressons uniquement au plan qui sera présenté en détail dans la partie relative aux différents plans ou maillages d'une ville, puis au site.

#### 1.2.4.1. Le site

Le site est considéré comme un ensemble géographique qui influence fortement le plan, le parcellaire, le bâti, l'utilisation du sol, mais fait lui-même partie intégrante de la forme urbaine. Il se définit avant tout par la topographie mais aussi par l'hydrographie et la végétation qui peuvent renforcer ou perturber le principe de la centralité convergente.



**Photo 1-1 : Le Mont Saint Michel en France exprimant une architecture condensée et concentrée sur une portion de terre entourée des eaux**

<sup>3</sup> Michael Robert Gunther **Conzen** était Allemand né en 1907, puis naturalisé Anglais. Il était Professeur de Géographie et des Sciences de l'Environnement il est mort le 04 Février 2000 et a laissé une bibliographie abondante sur la Morphologie urbaine sur laquelle il travaillait depuis 1932



La convergence des vallées par exemple induit une structure radiale que renforcent les tracés des routes : passage entre des collines ou sur les interfluves même quand le relief est très prononcé pour éviter les zones inondables.... L'image du Mont Saint Michel ou de la ville de Sienna permet de comprendre à quel point le site peut être un matériau, une composante de la forme urbaine elle-même.

#### **1.2.4.2          Espaces urbains**

L'appréhension globale de la forme urbaine passe par la définition de l'espace urbain comme un langage spatial par lequel s'exprime un système social. Il se lit d'abord dans les rapports de position des éléments de la ville, ce qu'**Albert Lévy** appelle la distribution urbaine : continuité discontinuité, centre périphérie, haut bas, intérieur extérieur, est-ouest, nord-sud, éloignement proximité... Ces binômes expriment les usages et les valeurs d'une société ainsi que des significations symboliques. L'étalement urbain considérable amorcé depuis le XIX<sup>e</sup> siècle a eu pour conséquence l'éparpillement de la ville. La nécessité de cerner les nouvelles réalités urbaines (en termes de population et de superficie) a conduit à utiliser des concepts variés : de l'agglomération à l'aire urbaine et la mégapole en adoptant une terminologie bien précise. Ces espaces urbains se définissent comme suit **[BLA]**:

#### **1.2.4.3          L'Agglomération**

Se dit d'un ensemble de constructions et d'habitations défini par la continuité du bâti, elle comprend la ville centre et sa banlieue. Son relatif recul démographique ne signifie pas stagnation immobilière. C'est l'unité urbaine de l'INSEE **[BLA]**.

#### **1.2.4.4.          L'Aire urbaine**

Agglomération centrale et ses auréoles périurbaines actives qui comprend elle-même des pôles secondaires plus ou moins importants (noyaux urbains redynamisés ou nouveaux...). Elle peut couvrir des surfaces de l'ordre de 2 000 à 3 000 km<sup>2</sup>. Selon l'INSEE, une aire urbaine est un pôle urbain (> 5 000 emplois) et les couronnes périphériques (>40% des actifs travaillent dans

<sup>4</sup>l'aire urbaine). Les communes rurales se caractérisent par un faible nombre d'habitants (moins de 2 000), un habitat dispersé (les constructions sont souvent éloignées de plus de 200 m) et la prépondérance des champs, prairies, forêts et autres espaces naturels [BLA].

#### 1.2.4.5 La Conurbation



Selon **P. Geddes**, la conurbation implique une connexion morphologique de plusieurs agglomérations initialement distinctes, de taille semblable et aux fonctions souvent complémentaires, mais avec la possibilité d'enclaves résiduelles non urbanisées [BLA].

**Photo 1-2 : Vue aérienne du quartier Beaulieu sur l'île de Nantes, avec le quartier Malakoff au fond à gauche. reliés par le Pont de Pirmil, assurant le franchissement de la Loire, puis des tours HLM de Beaulieu, palais omnisport de Beaulieu en bas à droite [SWC1.P2]**

#### 1.2.4.6 La Région urbaine

D'une superficie de 10 000 à 40 000 km<sup>2</sup>, elle peut former une mégalozone, constituée autour d'une ou plusieurs villes qui ont un rôle de métropole nationale ou internationale [BLA].

---

<sup>4</sup> Patrick Geddes était biologiste et botaniste écossais, connu aussi comme un penseur innovateur dans les domaines de la planification urbaine dont il enseignait. Il est premier à présenter le concept "de région" à l'architecture et la planification. Il est né dans Ballater, Aberdeenshire en Ecosse le 2 octobre 1854 et mort à Montpellier en France le 17 avril 1932. Il partagea avec John Ruskin, l'idée que la transformation spatiale impliquait la transformation sociale.

#### <sup>5</sup>1.2.4.7

#### La Mégapole

Selon **Peter Hall**, c'est une vaste agglomération urbaine comptant jusqu'à 30 millions d'habitants, qui vivent et travaillent dans une grande variété de centres urbains depuis la ville géante jusqu'aux villages semi urbains, mais reliés ensemble par d'énormes flux de personnes, de biens et d'informations. Cet organisme urbain géant est composé souvent de plusieurs villes millionnaires tendant à former une région urbaine dense et à potentialité économique de niveau mondial. En se bornant au seuil de 5 millions d'habitants, le nombre est passé de 8 à 37 de 1950 à 1990, et leur part de la population mondiale de 7% à 16%. Elles peuvent former des coalescences et donc des méga régions urbaines (Mégalopolis nord-américaine, Tokyo - Osaka...) [BLA].

#### 1.2.4.8 La Métropole

Pôle urbain aux fonctions importantes qui donne, dynamise et organise un territoire national et, pour les plus grandes, s'inscrit dans un réseau mondial, sur le plan des fonctions et des relations. On note que l'ensemble de ces grands organismes urbains n'est constitué que de répétitions sur des aires plus vastes des mêmes formes urbaines. Les clefs de lecture morphologiques ne changent donc pas fondamentalement avec la taille des villes observées, mais avant tout avec l'échelle d'observation. Nous précisons au passage que l'espace urbain auquel s'applique notre travail de thèse ne dépasse pas la dimension d'une aire urbaine [BLA].

### 1.2.5 Champs d'application de l'urbanisme

Les champs d'application de l'urbanisme sont multiples et sa réalisation en tant que champ professionnel se situe à des échelles très diverses et variées. De l'échelle élémentaire (celle

---

<sup>5</sup> Peter Hall est Professeur de Planification à Bartlett School of Architecture and Planning, University College London. De 1991 à 1994 il était Conseiller Spécial de la Planification Stratégique au Ministre de l'Environnement responsable de la ville de Londres et la planification régionale Est du Sud incluant l'Est, le Couloir de la Tamise et le tunnel sous la Manche la Communication ferroviaire. Il était le membre de l'Équipe spéciale du Vice-premier ministre chargé de l'urbanisme (1998-1999). Il a reçu la Médaille du Fondateur de la Société Géographique Royale pour la distinction dans la recherche et est membre d'honneur de l'Institut d'Urbanisme Royal.

<sup>6</sup>d'une rue) à l'échelle d'une mégapole, ces champs présentent des formes dont l'interprétation dépend de plusieurs facteurs. Le champ d'application retenu pour notre travail de thèse est la ville dont le fonctionnement dépend de sa localisation et surtout de son rôle dans un ensemble ou sous-ensemble donné, puis du site qui influence sa forme. Pour mieux appréhender la ville, ses activités et ses différents rouages, nous la définissons puis donnons une classification selon sa civilisation, son époque et le mode de transport pour le déplacement des populations **[PAQ]**.

### 1.3 DEFINITION DE LA VILLE

Une ville est une unité urbaine étendue et fortement peuplée (par opposition aux villages) dans laquelle se concentre la plupart des activités humaines : habitat, commerce, industrie, éducation, politique, culture. Cette définition de la ville tient de fait à ses propres caractéristiques dont les principales sont : la taille et les fonctions diverses. Pour **Pierre Georges [GEO]**, la ville « est un groupement de populations agglomérées défini par un effectif de population et par une forme d'organisation économique et sociale ». La distinction entre villes et villages peut se faire uniquement par rapport aux activités dominantes, sans tenir compte de la population. En effet, la ville n'a pas une activité essentiellement agricole, contrairement au village.

#### 1.3.1 Classification des villes

**Fernand Braudel [BRA]** affirmait que les villes étaient toutes les produits de leurs cultures. C'est pourquoi l'étude de leur physionomie, de leurs particularités morphologiques selon les domaines urbains ou grandes régions est depuis longtemps un champ privilégié des études de géographie urbaine. Les formes des villes constituent souvent des chapitres spécifiques. La

---

<sup>6</sup> **Pierre George**, né le 11 octobre 1909 à Paris et décédé le 11 septembre 2006 à Châtenay-Malabry, est un géographe français, membre de l'Académie des sciences morales et politiques depuis 1980. Reçu premier à l'agrégation d'histoire et de géographie, Pierre George enseigne au Prytanée national militaire de la Flèche, puis aux lycées de Montpellier, Charlemagne, à Paris puis Lakanal à Sceaux. Il enseigne à l'université, maître de conférence à Lille (1946 à 1948) puis à la Sorbonne (1948 à 1953). Par la suite, Pierre George est professeur, toujours à la Sorbonne (géographie humaine) de 1953 à 1977. Il dirige, de 1973 à 1977, l'institut de démographie de l'université de Paris. Pierre George enseigne de 1946 à 1978 à l'Institut d'études politiques de Paris. Il a enseigné souvent à l'étranger : Tunis (1961, 1963, 1964), Salvador (Brésil) (1962), Buenos Aires et La Plata (1965, 1969), Valparaiso (1966), Montréal (1967), Sao Paulo (1968), Ottawa (1973, 1975), Toronto (1975), Caracas (1977), Mexico (1978, 1980, 1982, 1984).

<sup>7</sup>classification des villes s'établit autour d'éléments permettent d'identifier des domaines urbains qui subsistent malgré tout au phénomène actuel de mondialisation et d'uniformisation. Parmi ces éléments, nous distinguons : la civilisation, l'époque et le mode de transport.

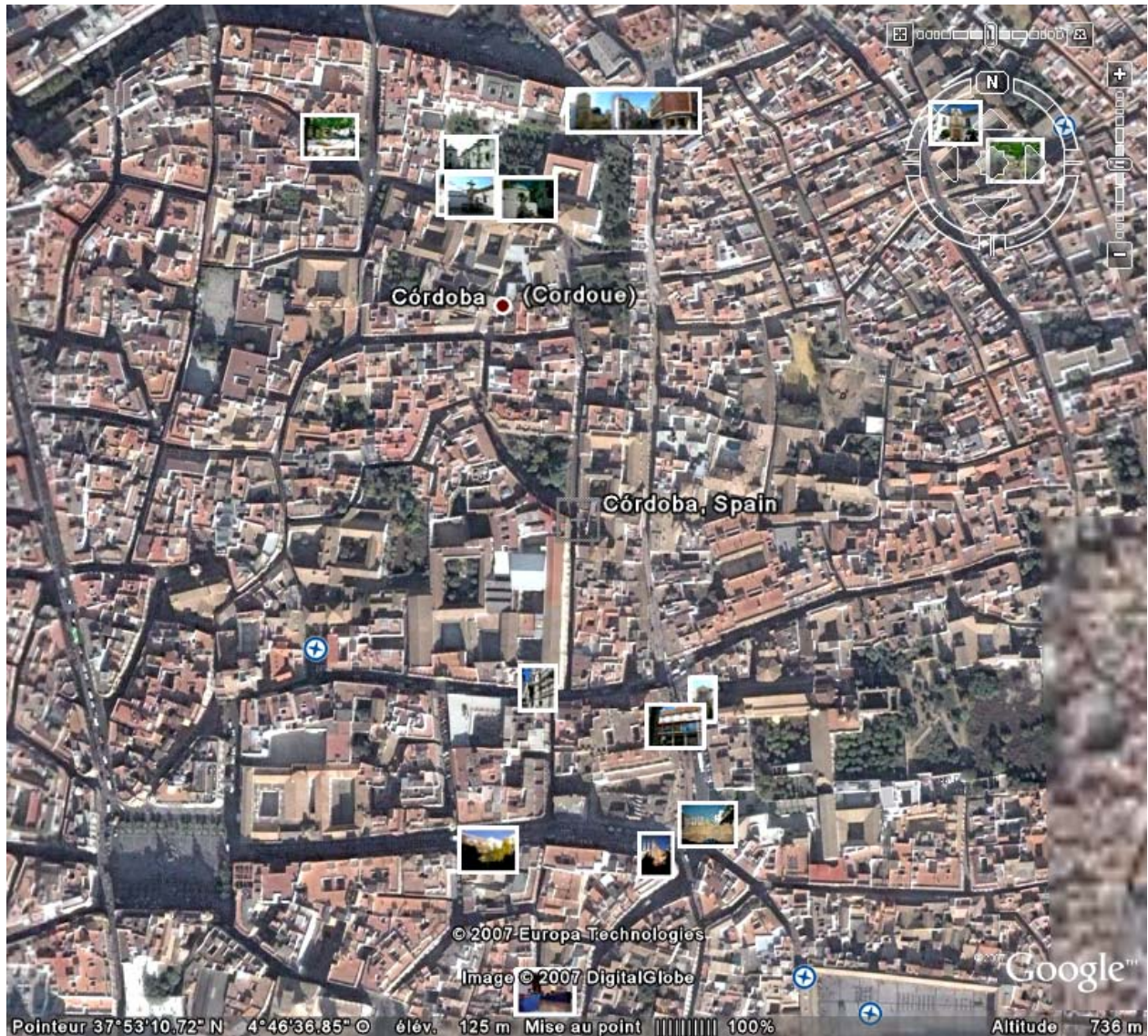
### **1.3.1.1 Classification des villes selon la civilisation**

#### **1.3.1.1.1 La ville islamique**

Elle est faite de rues étroites et maisons basses à patio, serrées comme des grains de grenade et organisées autour des points de convergence que sont le souk et la grande mosquée. L'islam interdisant de construire en hauteur, les gains se font aux dépens de l'espace public déjà restreint à la rue et que le droit musulman défend mal. Les traces demeurent dans toutes les villes des pays ayant connu une longue période de domination musulmane (Espagne, Italie du Sud et Sicile...). Malgré quelques transformations, les tissus islamiques sont résiduels dans les grandes villes, et dans les quartiers contemporains très étendus, les formes urbaines ont perdu la plupart de leurs caractères spécifiques. Une vue aérienne de Casablanca, Bagdad, Le Caire montre des étendues d'immeubles collectifs à l'architecture banale de type occidental dominées par quelques gratte-ciel plus ou moins islamisés [DEL & al].

---

<sup>7</sup> **Fernand Braudel**, né le 24 août 1902 à Lumeville-en-Ornois (Meuse) et décédé le 27 novembre 1985 à Cluses (Haute-Savoie), est agrégé d'histoire en 1923, il enseigne dix ans en Algérie, puis en 1935-36, à São Paulo ; en 1937, il intègre l'École Pratique des Hautes Études. Cette période de formation est située dans le sillage de Lucien Febvre, son directeur de thèse. Il lui succède en 1946 à la direction des Annales et en 1949 au Collège de France. L'influence de Febvre et des géographes qui l'ont formé dans les années 1920 font de Braudel un héritier direct de l'influence de Paul Vidal de La Blache. Fernand Braudel est l'un des plus populaires représentants de « l'École des Annales » qui étudie entre autres les civilisations et les mouvements de longue durée en opposition à l'histoire événementielle. L'historien Fernand Braudel joue un très grand rôle, à la fois intellectuel et institutionnel, dans l'ensemble des sciences sociales françaises de la seconde moitié du 20<sup>e</sup> siècle. Intellectuellement il accorde à ce qu'il nomme l'espace une place décisive dans son dispositif ; institutionnellement il rencontre constamment la géographie.



**Photo 1-3 : Vue aérienne de la ville de Cordoue en Espagne, représentant une ville musulmane d'un aspect ramassé et presque écrasant et d'une architecture relativement dense [SWC1.P3]**

### **1.3.1.1.2 La ville européenne**

Elle n'existe que par opposition avec d'autres modèles. Certes des caractères communs peuvent être identifiés de l'Espagne à la Suède. La densité du bâti est élevée et la compacité relative, la centralité est associée à la monumentalité religieuse, économique et politique, souvent limitée au centre historique. L'organisation du bâti en façades urbaines formant des rues corridors délimite des îlots. Malgré le processus d'uniformisation, de forts contrastes

subsistent entre les villes du Nord, celles du Nord-ouest, de l'Europe centrale, de la Méditerranée...Plus qu'un modèle, ce sont les modèles de certaines de leurs périodes morphologiques qui ont été exportés dans tous les pays colonisés ou sous influence européenne : urbanisme baroque puis haussmannien en Amérique latine, en Afrique du Nord, doublons européens des médinas et villes traditionnelles...Parfois sous des formes plus spectaculaires: New Delhi, les grands ensembles (ZUS) dans les villes algériennes [PEL & al].

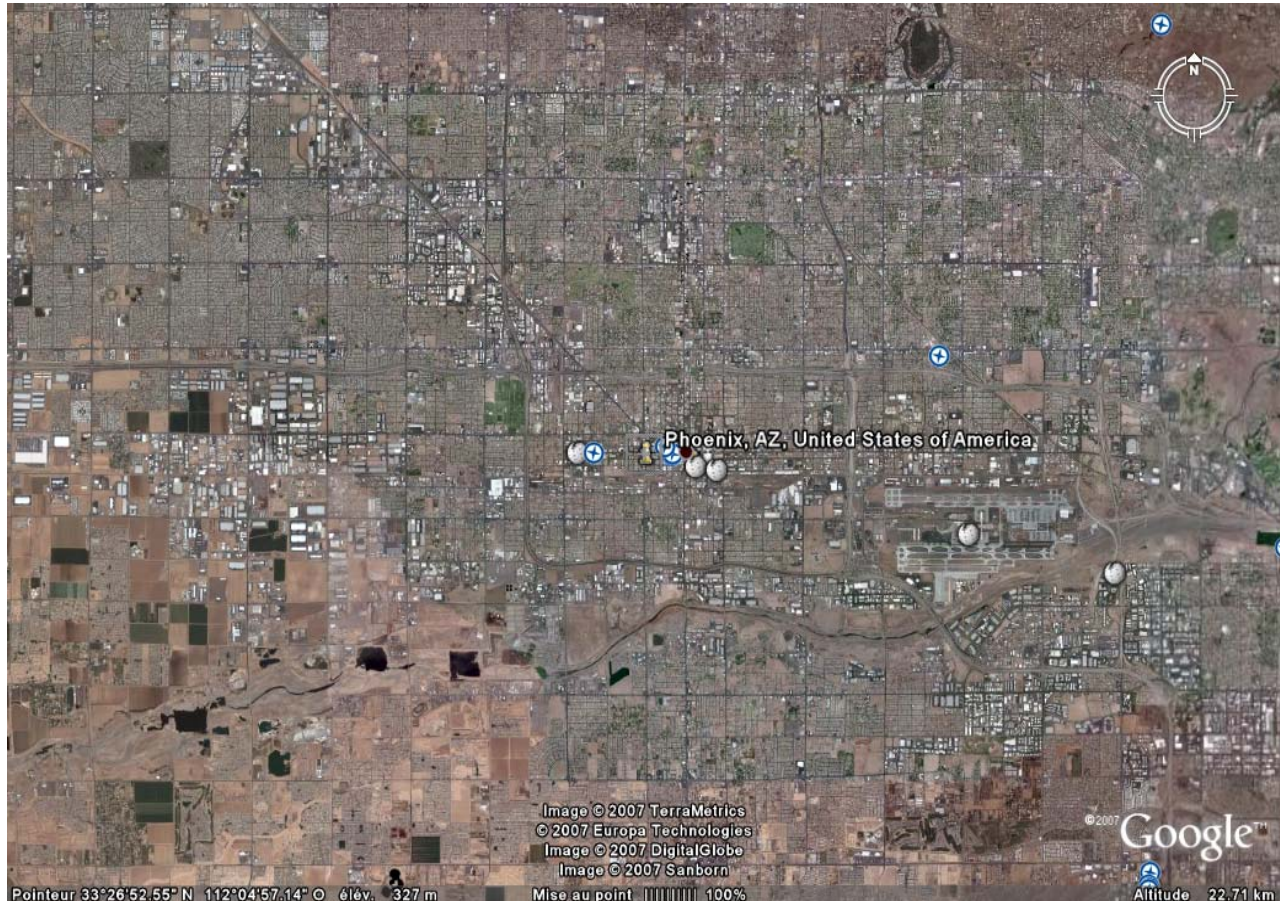


**Photo 1-4 : Vue aérienne de la ville de Nantes en France au dessus de l'île de Feydeau, du CHU, et centre ville, représentatif d'une ville européenne à l'architecture dense [SWC1.P4]**

### **1.3.1.1.3 La ville nord-américaine**

Elle est essentiellement marquée par la prédominance des processus économiques sur les actions urbanistiques. Comme dans ses variantes canadiennes et australiennes, les caractères généraux sont l'uniformité des maillages en damier, le caractère plus éphémère des constructions, la moindre place de la centralité, sauf du point de vue des affaires symbolisées par la verticalisation, et l'immense développement des banlieues pavillonnaires, expression

d'une méfiance à l'égard de la ville... A l'instar de l'expansion du modèle européen jusqu'au début du XX<sup>e</sup> siècle, ce modèle d'urbanisme, plus ou moins adapté aux contextes locaux, s'est diffusé à travers le monde, surtout en Amérique du Sud et en Asie du Sud-Est [GHO].



**Photo 1-5 : Vue aérienne de la ville de Phoenix dans le Colorado aux USA, représentant une ville nord américaine très étendue [SWC1.P5].**

#### **1.3.1.1.4 La ville sud-américaine**

Elle a des caractères propres au sous-ensemble hispanique de l'aire européenne : forte densité, compacité, immeubles élevés, rues corridors, plazas mayors bordées d'arcades, monuments religieux... Mais les évolutions récentes la rapprochent du type précédent avec une dualité plus marquée : verticalisation des centres, étalement périphérique avec de forts contrastes entre de riches communautés fermées et d'immenses bidonvilles [BOD].





**Photo 1-6 : Vue aérienne de la ville de Sao Paulo au Brésil, représentant une ville sud américaine, exprimant une architecture moderne [SWC1.P6].**

#### **1.3.1.1.5 La ville africaine**

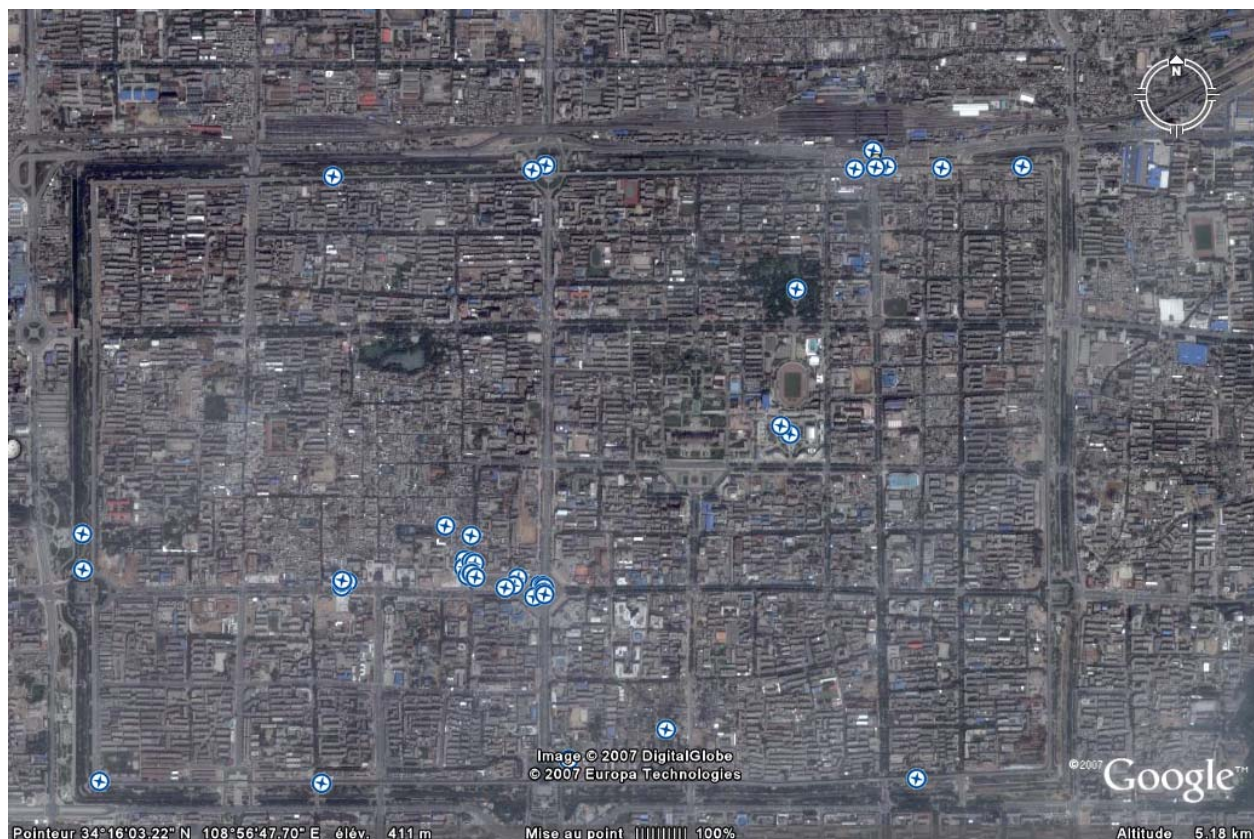
Précoloniales pour la plupart et même préislamiques, souvent polynucléaires, basses, faites d'argile (banco ou daga) et sans monuments (Niani, Begho, Ifé...) elles ont été délaissées par la colonisation qui a surtout développé les ports. Cet urbanisme d'importation se caractérise par un centre d'origine coloniale, peu étendu en voie de verticalisation dans les capitales économiques et quelques quartiers résidentiels d'origine européenne. Le reste est une mosaïque de lotissements à un stade d'intégration ou de durcification (matériaux de construction) diminuant avec l'éloignement du centre **[BAS]**.



**Photo 1-7 : Vue aérienne de la ville de Libreville au Gabon, représentant une ville africaine subsaharienne exprimant un urbanisme d'importation [SWC1.P7].**

#### **1.3.1.1.6 La ville asiatique**

C'est la ville chinoise traditionnelle basse, à plan quadrillé et qui fait une faible place à la monumentalité (palais du prince et temples). L'importance des jardins ne compense pas la faible part des espaces publics, notamment des places. Ces caractères spécifiques d'origine culturelle tendent à être effacés par des politiques de modernisation brutale mises en œuvre dans les villes les plus dynamiques. La ville japonaise en constitue une variante. Dans cette ville, la spécificité se révèle plus dans les formes de détail que dans les caractères généraux des gabarits ou de l'architecture des immeubles [DEL & al].



**Photo 1-8 : Vue aérienne de la ville de Xian en Chine, représentant une ville asiatique traditionnelle [SWC1.P8].**

### **1.3.1.2 Classification des villes selon les époques**

#### **1.3.1.2.1 La ville antique**

Souvent située sur des hauteurs, la ville antique avait un centre-ville formé de groupes d'habitations protégées par une enceinte et assurant également une concentration idéale pour une religion donnée, comme en témoignent nombre des vestiges mis à jour par les archéologues. Dans ces villes, la religion dicte le modèle social et les populations vivent avec la peur d'être attaquées et réduites à l'esclavage. Les portes des villes étaient fermées la nuit ou en cas de danger. À l'extérieur et au-delà des murailles s'étendaient les champs, les terrains de pâture qui n'étaient pas défendus pendant les attaques.

Les citadins ne vivaient presque que de l'agriculture et de l'élevage, ils travaillaient à l'extérieur de la ville mais habitaient souvent à l'intérieur plutôt que sur leur exploitation. Les villes servaient de dépôts de marchandises, de centres d'activité commerciale et de marchés de distribution. Durant la domination de l'Empire romain, plusieurs villes sont nées de la présence de forts militaires [ROU].



**Photo 1-9 : Vue aérienne de la ville de Paris en France, reconstituée [Infographie A.-B. Pimpaud], représentant une ville antique [SWC1.P9].**

#### **1.3.1.2.2 La ville médiévale**

Modèle urbanistique préindustriel, la ville médiévale est le produit d'un urbanisme de marchands et artisans citoyens, de multiples initiatives individuelles, de techniques artisanales, d'un savoir-faire varié. C'est une construction parcellisée dont le micro parcellaire et l'irrégularité du tissu, l'adaptation au contexte, sont les corollaires. Homogène sans être uniforme, elle est à l'image d'une structure sociale où l'organisation du travail (les métiers et les corporations) joue un rôle essentiel en tant que demande et savoir-faire. Même si ces conditions ont disparu depuis longtemps, la forme urbaine produite persiste et nous parle [ROU].



Photo 1-10 : Maquette d'une ville médiévale fabrication dans l'atelier du musée de Provins  
[SWC1.P10]

### 1.3.1.2.3 La ville classique

C'est une ville typique de l'époque baroque qui définit une période où triomphent les principes classiques (les XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> siècles), et occulte l'essentiel qui est la persistance des formes antérieures et des façons de faire précédentes. Paris par exemple est au XVIII<sup>e</sup> siècle du point de vue morphologique, une ville médiévale et les principes de l'urbanisme classique ne touchent que quelques secteurs et ne s'imposeront véritablement que plus d'un siècle plus tard avec l'haussmannisme, pourtant présenté comme le paradigme de l'urbanisme technicien. La ville est assimilée à une oeuvre dans laquelle, selon les canons de la géométrie pythagoricienne homogénéité, symétrie, proportion, monumentalité, perspective dans les compositions urbaines des scénographies [PIT].



**Photo 1-11 : vue aérienne de la ville de Versailles en France, représentant la ville classique [SWC1.P11]**

#### **1.3.1.2.4 La ville libérale**

Elle correspond à la révolution industrielle : révolution technologique certes mais surtout croissance urbaine rapide, mobilisation du capital et domination de la bourgeoisie. L'influence classique y reste déterminante, mais la ville n'est plus considérée comme une œuvre d'art. L'idée d'une composition d'ensemble est abandonnée. Les acteurs sont dispersés (propriétaires, banquiers, lotisseurs, industriels...) et avant tout animés par le désir de profit. Le désordre, l'incohérence, les problèmes d'hygiène et la ségrégation sociale conduisent progressivement à l'émergence d'un urbanisme technicien et réglementaire. La réglementation de l'espace urbain pour des impératifs d'intérêt public se systématisent (alignements, usage des sols, densités, hauteurs des bâtiments). De grandes lois sanitaires sont votées (1875 en Grande-Bretagne, 1902 en France).

Leurs impacts urbanistiques sont importants : immenses quartiers de maisonnettes en bande dans les villes anglaises (row-houses), immeubles de logements denses (Mietkaserne) en Allemagne, immeubles HBM en France. Les premiers plans d'aménagement n'apparaissent

qu'au début du XX<sup>e</sup> siècle (lois de 1919 en Angleterre et France). Mais des transformations s'opèrent bien avant selon deux conceptions qui représentent encore de nos jours un clivage majeur de la pensée sur la ville [BUR].



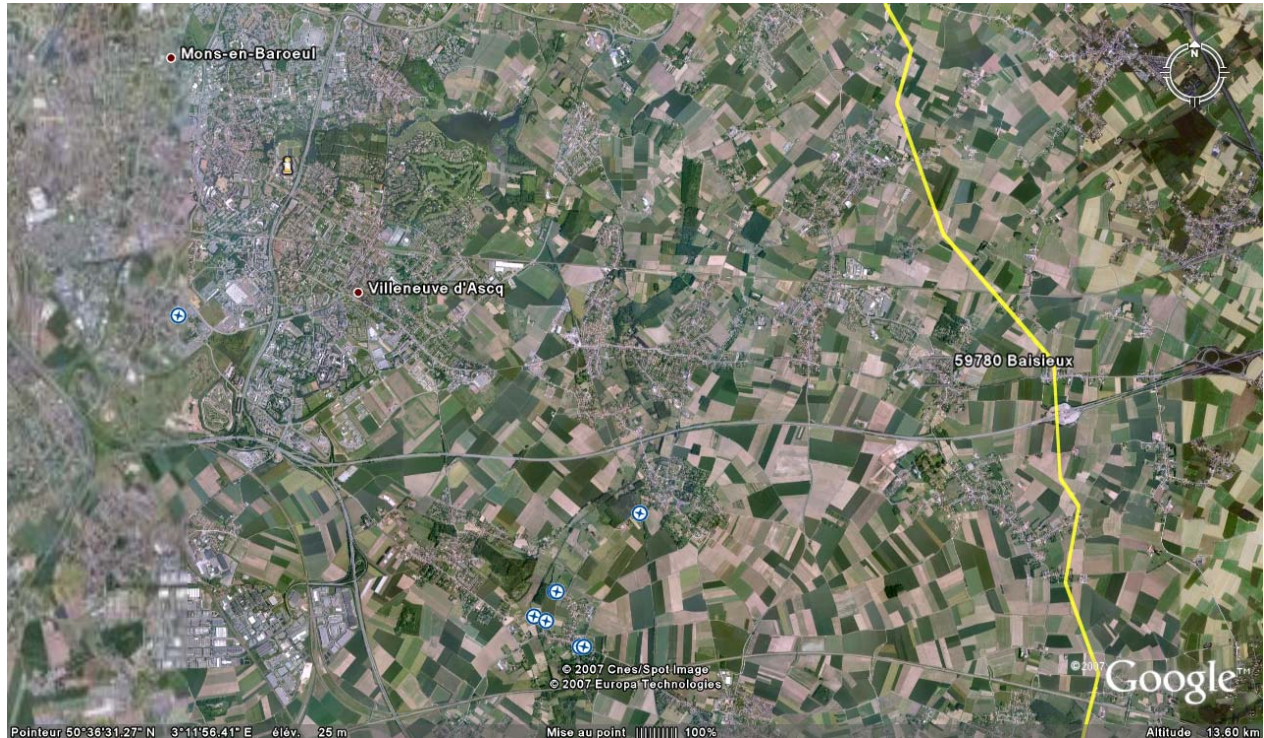
**Photo 1-12 : Vue aérienne des immeubles HBM dans le 14<sup>ème</sup> arrondissement de Paris en France, entre le boulevard des Maréchaux et le boulevard périphérique représentant la ville libérale [SWC1.P12]**

### **1.3.1.2.5 La ville contemporaine**

Les changements économiques de notre époque ont amené des couches sociales urbaines prospères à vouloir participer au pouvoir. Mais à côté d'elles, un prolétariat ouvrier se développe. Les progrès techniques nourrissent les conflits et s'accroissent avec eux, ce qui retire le côté protecteur de la ville.

Les stratégies militaires sont telles qu'une protection physique devient dérisoire; la politique est vue comme une solution pour la protection. Les débats politiques ne se font plus dans les rues. Dans certains pays le flux migratoire campagne/ville se stabilise, voire s'inverse aux alentours des grandes régions urbanisées. Il en résulte la rurbanisation : les citadins s'installent à la campagne tout en gardant un mode de vie urbain, un travail en ville. Ce phénomène produit un

«mitage» du paysage par un bâti parsemé, ou au mieux réparti en lotissements et crée en fin de compte une modification des paysages et des conflits entre les activités agricoles et les rurbains [DEL & al].



**Photo 1-13 : Vue aérienne de la banlieue Est de Lille à Villeneuve d'Ascq en France, représentant une ville contemporaine [SWC1.P13]**

### **1.3.1.3 Classification des villes selon les modes de transport**

L'évolution des formes urbaines est très liée aux mutations des systèmes de transport. Ceux-ci ont un triple impact : sur les densités, les modes et degré de l'étalement urbain, ses aspects sociaux et morphologiques. On peut définir au moins quatre périodes sociotechniques en fonction du mode de transport dominant : la ville du piéton, la ville du tramway, la ville du chemin de fer puis celle de l'automobile. Ces période ne sont que très grossièrement chronologiques et les formes produites subsistent ou se renforcent par effet d'inertie. Les temps de trajet restent assez constants mais les distances parcourues augmentent en raison de l'augmentation de la vitesse, ce qui se traduit en éloignement du centre donc en étalement.



### 1.3.1.3.1 La ville du piéton (walking city)

Elle correspond aux actuelles parties centrales des agglomérations. Elles sont la plupart du temps en extension limitée à la distance domicile travail que pouvait normalement parcourir un piéton. Au début du XIX<sup>e</sup> siècle, le rayon de la zone bâtie dense des grandes villes excédait rarement 1 à 2 kilomètres. L'aire ainsi définie correspond à peu près au centre historique des grandes villes actuelles comme Gand, Milan, Francfort ou à l'extension des secteurs sauvegardés de Bordeaux ou Rouen. Les quartiers les plus éloignés se situent à environ 3 à 4 kilomètres. Jusqu'au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, les extensions se sont effectuées à partir de ces centres sous forme des digitations denses mais étroites, les faubourgs. Les formes urbaines produites par cette phase subsistent notamment dans les villes européennes et très fonctionnellement encore dans les villes du tiers-monde. Elles ont en revanche quasiment disparues dans les villes américaines sauf dans quelques centres historiques [ALL & al].



**Photo 1-14 : Centre historique de la ville de Tourcoing dans la métropole lilloise en France, représentant une ville dans laquelle les déplacements se faisaient à pied jusqu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle [SWC1.P14]**

### 1.3.1.3.2 La ville du tramway

Elle symbolise les extensions en continuité sous forme de banlieues plus ou moins linéaires, surtout dans les pays neufs. Aux Etats-Unis, jusque dans les années 1830 – 1840, les villes sont compactes : espaces de travail et espaces résidentiels se confondent. Leur dilatation débute avec l'époque des villes industrielles dans les années 1840 – 1880, d'abord avec les omnibus et tramways hippomobiles (vitesse : 6 à 8 kilomètres/heure). Le tramway électrique a un rôle décisif dans l'étalement et la dissociation entre activités économiques et résidences, car plus silencieux, plus rapide, d'une plus grande capacité et moins cher. Il se diffuse rapidement à partir des années 1880 dans toutes les grandes villes américaines et australiennes induisant le boom immobilier des street cars suburbs. C'est au tramway que Los Angeles par exemple doit sa première extension. En Europe, pourtant pionnière dans cette technique, le développement est plus tardif (années 1890) : le tramway est d'abord mis au service des espaces centraux restructurés ; ce n'est que plus tard que des lignes desservent les faubourgs et les communes périphériques. Les banlieues s'y développent aussi sous des formes plus populaires et spontanées. Quant aux réseaux de métros, ils restent longtemps cantonnés à la ville dense ; sauf dans quelques grandes villes comme New York où par le biais de l'interconnexion des réseaux de Manhattan, Brooklyn et Bronx, le métro aérien (elevated), construit après 1904 renforce la croissance linéaire de l'agglomération [BAE].

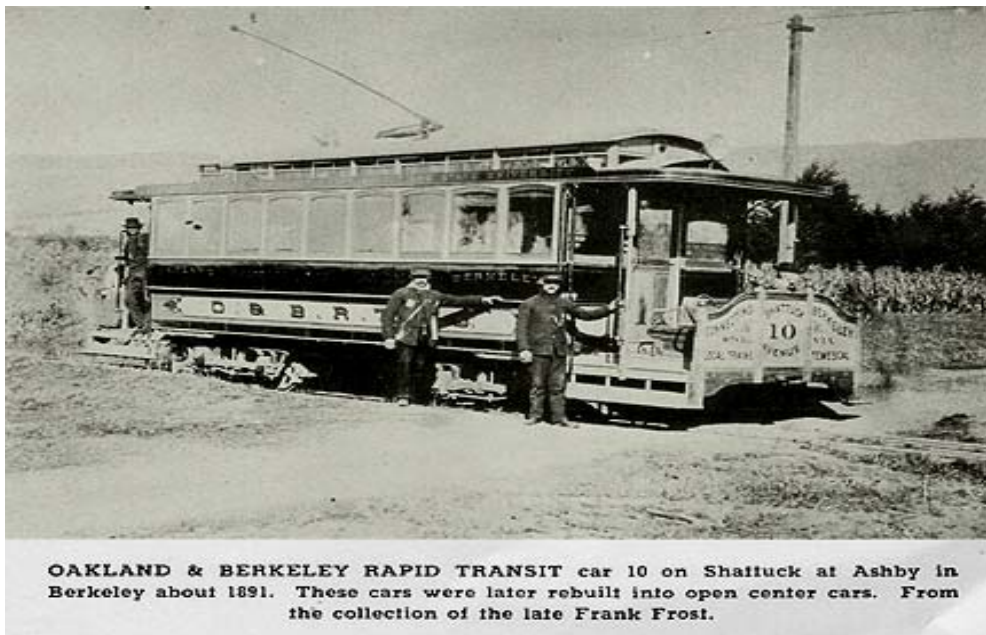


Photo 1-15: photo d'un street car représentant les premières générations des véhicules tramway  
apparus aux Etats-Unis [SWC1.P15]

### 1.3.1.3.3 La ville digitée (traced-city)

C'est d'abord celle du chemin de fer. Celui-ci a comme fonction principale le transport interurbain ou la jonction villes - ports. Son rôle dans la fonction résidentielle et les déplacements domicile - travail n'est que marginal. Pourtant les navettes quotidiennes, domicile - travail se sont développées rapidement chez les classes aisées et les lignes ont eu un effet déterminant sur la structure de certaines villes avant même le tramway. Des hausses des valeurs foncières et changement de l'usage du sol se produisent autour des gares terminus, mais aussi le long des axes ferroviaires dans la zone bâtie. Les champs urbains et donc les formes urbaines s'étirent et se fragmentent [KNO].

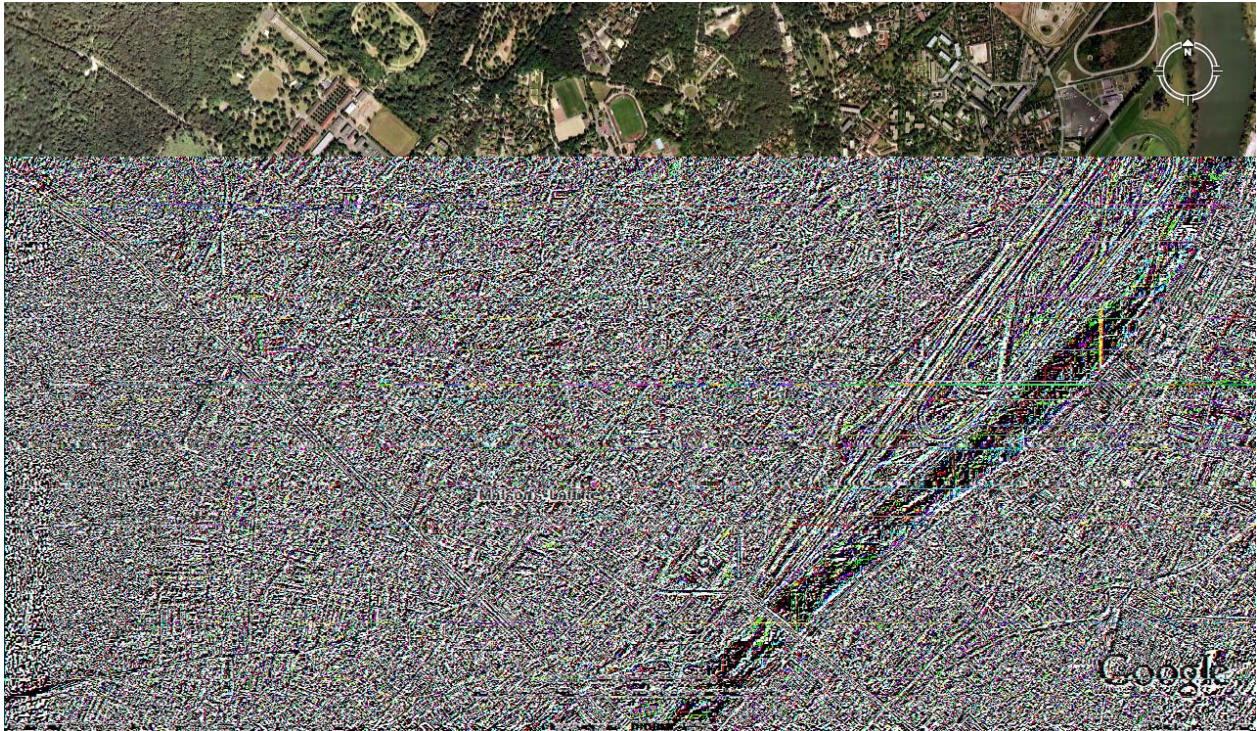


Photo 1-16 : Vue aérienne de la Maisons-Lafitte en France, représentant une ville digitée qui s'est développée autour d'une gare et d'un château, dans un plan de lotissement volontaire [SWC1.P16]

### 1.3.1.3.4 La ville de l'automobile (rubber city)

L'automobile est responsable du formidable processus d'étalement et d'éparpillement urbain des cinquante dernières années (urban sprawl). La mobilité individuelle rendant le champ urbain

plus uniforme, provoque aussi le comblement des vides entre les digitations (lotissements, équipements, centres commerciaux...).

Pourtant, les effets des axes persistent nettement par amélioration des performances sur les lignes ferroviaires et par effet cumulatif, le tracé de grandes radiales (freeways, highways) épousant d'assez près la forme des zones de fortes densités. Aux Etats-Unis, le phénomène ayant débuté plus tôt (1920) et dans un contexte culturel plus favorable, la suburbia forme l'essentiel du paysage métropolitain. Les comtés urbains que l'on peut définir comme espaces périurbains éloignés ou ruraux sous influence urbaine et qui s'étendent dans un rayon de 100 à 120 kilomètres à partir des freeways périphériques des centres-villes, sont l'aire de résidence de 60 millions d'habitants [HUB].



**Photo 1-17 : Vue aérienne du John Hancock Center à Chicago aux USA, représentant la ville de l'automobile s'étendant sur de très grandes distances (Photo Didier Forray) [SWC1.P17]**

## 1.4 Modèles des villes

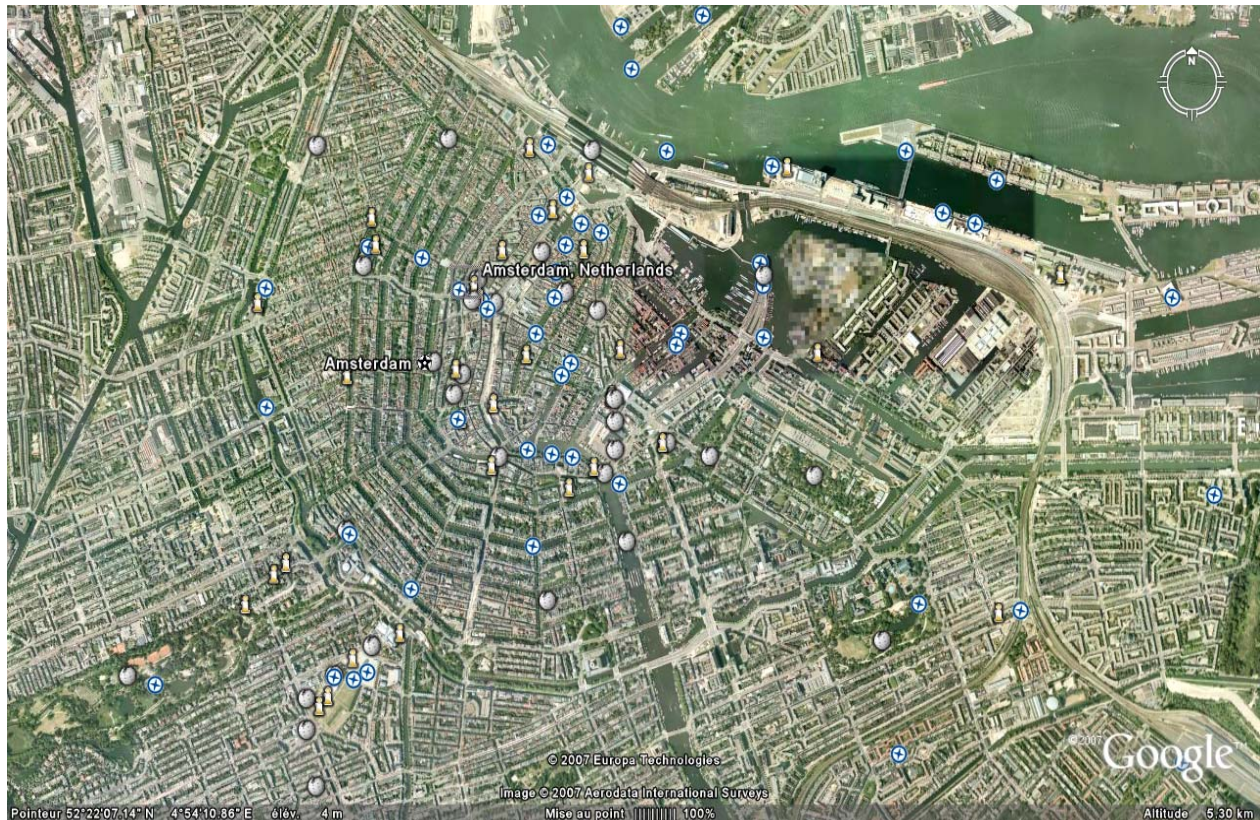
Selon **Jacques Lévy [LEV]**, il existe en principe deux modèles de villes dans le monde contemporain : le modèle d'Amsterdam et le modèle de Johannesburg. Ces modèles ne sont en réalité que des figures théoriques car ils peuvent être vus de manière symétrique comme des<sup>8</sup> choix de civilisations différentes, impossibles à hiérarchiser. La différence entre ces deux modèles peut s'interpréter par des choix urbains qui exerceraient une faible influence sur les performances d'ensemble d'une société ou plutôt par des hypothèses relatives à des inégalités dans la production des capitaux sociaux. Toutefois, du seul point de vue de l'urbanité ces modèles sont facilement hiérarchisables, le modèle d'Amsterdam étant plus efficace que celui de Johannesburg.

### 1.4.1 Le modèle d'Amsterdam

Avec sa forte identité, sa bourgeoisie portant pendant des siècles un projet de société urbaine associant liberté du marché et solidarités sociopolitiques, avec la cohérence et la continuité de ses politiques urbaines, la ville d'Amsterdam exprime de manière marquée, ce qu'il y a de plus spécifique dans la ville européenne. Dans ce modèle, la ville tend à maximiser l'avantage de la concentration, c'est-à-dire de coprésence et d'interaction du plus grand nombre d'opérateurs sociaux. Seul l'individu possède par le logement une intimité, c'est-à-dire un droit à l'écart.

---

<sup>8</sup> **Jacques Lévy** est professeur ordinaire de géographie et d'aménagement de l'espace à l'École polytechnique fédérale de Lausanne depuis octobre 2004. Il est directeur du Laboratoire Chôros. Ancien élève de l'École Normale Supérieure de Cachan (1971-1976) et Agrégé de géographie (1974), il participe au lancement (1975) de la revue "EspacesTemps", qui se consacre à une réflexion interdisciplinaire sur l'épistémologie, la didactique et les théories des sciences sociales ; il en est actuellement le coordinateur de la rédaction. Se spécialisant en géographie du politique, il entre au CNRS comme attaché, puis chargé de recherche (1984-1993). Docteur d'État (1993), il est nommé professeur des universités à Reims (1993-2004). À partir de 1989, maître de conférences puis professeur à l'Institut d'Études Politiques de Paris, il contribue par plusieurs enseignements au renouvellement du rôle de la géographie et des approches spatiales à différentes échelles dans les cursus de cet établissement. Il a été professeur (2000-2002) à l'Institut des hautes études d'aménagement et de développement du territoire (IHÉDAT).



**Photo 1-18 : Vue aérienne de la ville d'Amsterdam aux Pays-Bas premier modèle de ville selon Jacques Lévy, représentant le modèle de la ville européenne à forte densité [SWC1.P18]**

### **1.4.2 Le modèle de Johannesburg**

Dans ce modèle, la séparation sous toutes ses formes structure l'espace urbain, qui, à bien des égards, n'est qu'une mosaïque de quartiers fonctionnellement et sociologiquement homogènes, y compris ethniquement, et partiellement enclavés. La ville de Johannesburg avec ses traces brûlantes de la société d'apartheid, symbolise en la caricaturant, toute une famille des villes parmi lesquelles la plupart des agglomérations du centre et du nord de l'Amérique.



**Photo 1-19 : Vue aérienne d'un quartier de Johannesburg en Afrique du Sud deuxième modèle de ville selon Jacques Lévy, représentant le modèle de la ville de Johannesburg ou à faible densité.**

**[SWC1.P19]**

### **1.4.3 Les modèles dérivés des deux modèles de base**

Dans le monde actuel, on peut établir une distribution géographique très claire de ces deux modèles, quoique leur mise en valeur ne soit pas forcément perceptible dans toutes les sociétés. Par souci de simplification, on peut dire que les villes asiatiques ressemblent aux villes européennes, tandis que celles d'Afrique se rapprochent du modèle de l'Amérique du nord, bien entendu à quelques variantes près. En revanche, toutes les caractéristiques de l'un ou de l'autre modèle ne sont que rarement présentes dans leur intégralité.

#### **1.4.3.1 Le modèle Américain ou Californien**

Ce type de modèle se caractérise par des constructions réalisées au fur et à mesure des aménagements, sans aucune contrainte de gestion de l'espace. Chaque individu est libre des installations qu'il veut faire et de leurs emplacements : habitation, entreprises.

Dans ce modèle, la collectivité est peu contraignante sur la régulation des aménagements : elle peut intervenir à posteriori pour reprendre la gestion des routes à sa charge. L'espace est fortement occupé et la densité de population est faible. Le modèle américain est la réalisation de la ville horizontale.



**Photo 1-20 : Vue aérienne d'une partie de la ville de Los Angeles en Californie aux USA, représentant le modèle américain ou de ville dérivée du modèle de Johannesburg en Amérique [SWC1.P20].**

#### **1.4.3.2 Le modèle Européen ou Rhénan**

Le modèle Rhénan est caractéristique du modèle dit « européen » dans lequel les villes sont de taille et de densité moyennes. Ces villes sont souvent organisées autour d'un centre urbain dense où les immeubles font couramment 3-4 étages de hauteur. Elles peuvent avoir ou non des couronnes d'habitats en périphérie plus ou moins distantes de ces centres : petites, moyennes et grandes couronnes (modèle saint simonien).

Dans ces villes, l'intervention publique est forte. Il existe des plans d'habitat et des zones d'occupation du sol en fonction des usages. Ce modèle est caractérisé par la mixité des fonctions, et un aménagement concerté : commerces en bas des logements, écoles peu éloignées de l'habitat, commerces en centre ville. Globalement, les distances parcourues sont



raisonnables, et les transports en commun sont suffisamment efficaces. Actuellement, le modèle européen a tendance à se modifier, avec une consommation énergétique accrue et une densité de population en décroissance. Les nouveaux modes de construction transforment substantiellement le modèle d'origine. Il en résulte un modèle à géométrie spatio-géographique mixte, fait constaté lorsque les centres commerciaux ou les entreprises s'installent en périphérie de villes.



**Photo 1-21 : Vue aérienne d'une partie de la ville de Bruxelles en Belgique, représentant le modèle européen ou de ville dérivée du modèle d'Amsterdam [SWC1.P21].**

### **1.4.3.3 Le modèle Asiatique ou de type très dense**

Il correspond à un modèle de ville à très forte densité de population. Dans ce modèle, l'espace disponible est très utilisé, les constructions sont concentrées et se développent donc en hauteur. C'est un souhait collectif de rester groupé afin d'éviter un sentiment d'étouffement ou de manque d'espaces libres. En effet, ce modèle se réfère au Japon dont les contraintes spatiales imposent un développement urbain vertical.



**Photo 1-22 : Vue aérienne d'une partie de la ville de Yokohama au Japon, représentant le modèle asiatique ou de ville dérivée du modèle européen en Asie [SWC1.P22].**

#### **1.4.4 Typologie de plans ou de maillages d'une ville**

Le plan couvre au moins trois réalités situées à trois échelles différentes (la forme générale d'une agglomération autrement appelée la macroforme ; le plan général de la ville parfois pensé comme un tout, mais généralement polygénique, structuré par la trame viaire (tracé des voies) ou maillage ; enfin le plan ou maillage de détail (secteur de ville, lotissement) lui aussi très fréquemment polygénique). La macroforme et le plan de détail ne sont cités dans notre travail de thèse qu'à titre indicatif. De ce fait, nous présentons dans ce qui suit quelques plans à l'échelle d'une ville.

##### **1.4.4.1 Le plan ou maillage général**

Le plan ou maillage général est la première expression de la ville, un peu comme le plan de la maison que l'on dessine pour en faire comprendre la structure et la manière dont on y vit. C'est le support structurel du tissu urbain. Il a bien plus qu'une fonction circulatoire. Formé progressivement, il porte la marque du site, reflète l'histoire d'une ville et exprime sa personnalité. Bien qu'en évolution permanente, c'est l'élément le plus stable de la forme urbaine. Il permet d'évaluer la densité de la ville, le rapport des pleins et des vides, de

l'espace bâti et des espaces publics, leurs positions relatives, les aires et secteurs ainsi que la situation des principaux monuments qui ont souvent un impact essentiel sur la structuration du tissu urbain et la permanence des tracés urbains. D'une certaine manière, ce type de plan révèle l'architecture de la ville. La particularité du plan général est son processus de formation qui peut être soit organique, soit volontaire ou imposé.



Photo 1-23 : Maillage général de la ville de Londres en Angleterre montrant les différents monuments, édifices et principales avenues [SWC1.P23].

#### 1.4.4.2 Les plans ou maillages organiques

Beaucoup de tissus urbains n'obéissent à aucune règle d'organisation apparente (maillage des villes médiévales, médinas, vieux noyaux de certaines villes africaines...). Il est rare cependant que l'analyse ne révèle pas certaines logiques. Paradoxalement, ces plans qui se font d'eux-

mêmes, sans urbanisme, sont pour la plupart déterminés. Les facteurs déterminant le processus collectif et progressif de constitution d'un maillage spontané sont généralement la logique de la centralité et les contraintes du site. De ce point de vue, de nombreux plans empiriques, dits organiques, des villes médiévales sont en fait des adaptations intelligentes et subtiles à des contraintes de site.



**Photo 1-24 : Vue aérienne du centre ville de Nantes, photo de l'île de Versailles et des aménagements des quais aux bords de l'Erdre, du pont de la motte rouge, exemple d'un maillage ou plan organique ayant subi l'influence du site [SWC1.P24].**

#### **1.4.4.3 Les plans volontaires ou imposés**

Le plan volontaire est celui dont on peut imaginer le principe de création, les auteurs et les objectifs. Ils peuvent être économiques (logique de lotissement), politiques (structure de défense, mise en scène d'un pouvoir...), idéologiques (conception de l'urbain et de l'urbanité). Ce plan peut être parfois complètement artificiel : c'est le cas de certaines villes nouvelles. Mais, il est rare qu'il n'intègre pas des indications fournies par le contexte naturel ou hérité. Ces plans volontaires s'adaptent aussi à des sites contraignants, et ne sont donc pas forcément réguliers. Par conséquent on ne se réfère à quelques modèles simples que par commodité.

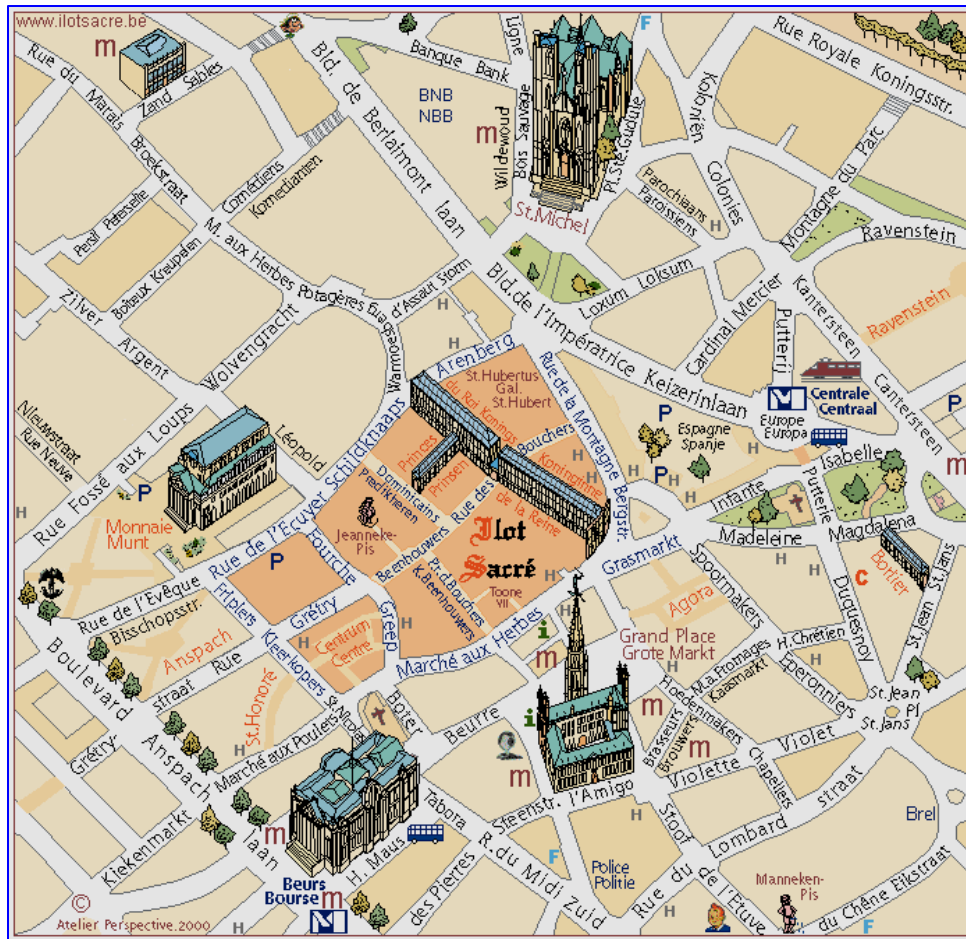


Photo 1-25 : Plan de la ville de Bruxelles en Belgique montrant quelques édifices et les principales avenues repartis partout dans la ville de façon imposée (i : information touristique - H : hôtel - m : musée - P : parking - F : fresque BD - C : casino) [SWC1.P25].

#### 1.4.4.4 Le plan radioconcentrique

On dit qu'une ville a un plan radioconcentrique lorsque ses quartiers s'organisent en cercles concentriques, du centre-ville à la périphérie. Dans ce plan, les voies de communication circulaires sont souvent appelées boulevards, tandis que les axes qui relient le centre de la ville à l'extérieur et qui forment des rayons sont appelés avenues. Ce plan traduit la croissance historique de la ville et se laisse glisser naturellement dans le modèle européen. Souvent la première ceinture de boulevards correspond aux anciens remparts que l'on a détruits pour la plupart au XIX<sup>e</sup> siècle. La majorité des villes historiques se sont développées selon un plan

radioconcentrique, les cours d'eau et canaux, généralement présents, ayant tenu un rôle spécifique. Ce type de plan demeure fortement lié à la topographie de la ville, en ce qu'un relief accidenté peut entraîner des modifications de la structuration. Il présente l'avantage d'encourager la centralité principale ainsi que la croissance de centres secondaires sur les carrefours des radiales et des voies circulaires. Il favorise l'efficacité des réseaux de transport centripètes avec hiérarchisation. A l'opposé, la convergence des flux de circulation sur le centre accentue la congestion des axes et les difficultés de la circulation du transit.



**Photo 1-26 : Plan de la ville de Palmanova, dans la région de Venise en Italie, Ancienne place forte vénitienne, construite en 1593, montrant une ville qui s'est développée en étoile autour d'une place hexagonale, où s'installe le marché [PUB1].**

#### **1.4.4.5 Le plan hippodamien**

Se dit d'une ville dont le plan d'urbanisme est fait de sorte que les rues se croisent en formant des angles droits, créant ainsi des îlots carrés ou rectangulaires.

On dit aussi que la ville a un plan quadrillé ou en damier. Ce plan est caractérisé par des rues rectilignes et larges et incarne de ce fait le modèle de la ville américaine. Il traduit la volonté

d'organiser rationnellement l'espace en s'accommodant à la quasi-totalité des topographies, mais présente en dépit de sa simplicité apparente, l'inconvénient de rallonger les temps de trajet (sauf si on ouvre des « diagonales » pour circuler) et d'être monotone.



Photo 1-27 : Plan de la ville de Los Angeles dans l'Etat de Californie aux USA, montrant le schéma type d'un plan hippodamien [SWC1.P27].

#### 1.4.4.6 Le plan linéaire

C'est une réalité ancienne souvent spontanée résultant des effets de site ou de facilité de transport. Elle a été théorisée et appliquée à plusieurs reprises : par A. Soria Y Mata dans la Ciudad Lineal (1882) à Madrid, organisée sur une ligne de tramway ; par Tony Garnier pour sa Cité industrielle (1901), très imparfaitement mise en œuvre dans le quartier des Etats-Unis à Lyon ; Le Corbusier pour la cité industrielle linéaire ; Milioutine pour Volgograd qui s'étire sur 60 kilomètres. Ce plan se fonde sur la construction d'une ville à proximité d'une ligne de transport

ou le long d'un fleuve. Ce plan se fonde sur la construction d'une ville à proximité d'une ligne de transport ou le long d'un fleuve.



**Photo 1-28- a - : Vue aérienne du plan de la ville du Caire en Egypt le long du Nil [SWC1P28-a-].**

Son principal avantage est l'accès à la campagne à condition de juguler la spéculation foncière de part et d'autre de l'axe, notamment au droit des stations, mais l'absence de centre et



d'urbanité est son inconvénient majeur. A cela, s'ajoutent les nuisances de l'axe de circulation, la congestion au fur et à mesure de son allongement (par addition des circulations locales et de transit) comme en témoignent les formes linéaires d'urbanisation spontanées sur la côte d'Azur ou le littoral méditerranéen espagnol. Toutefois, ce problème peut être réduit par la redondance des lignes de transport et la

mise à l'écart de certaines zones résidentielles (Marne-la-Vallée).

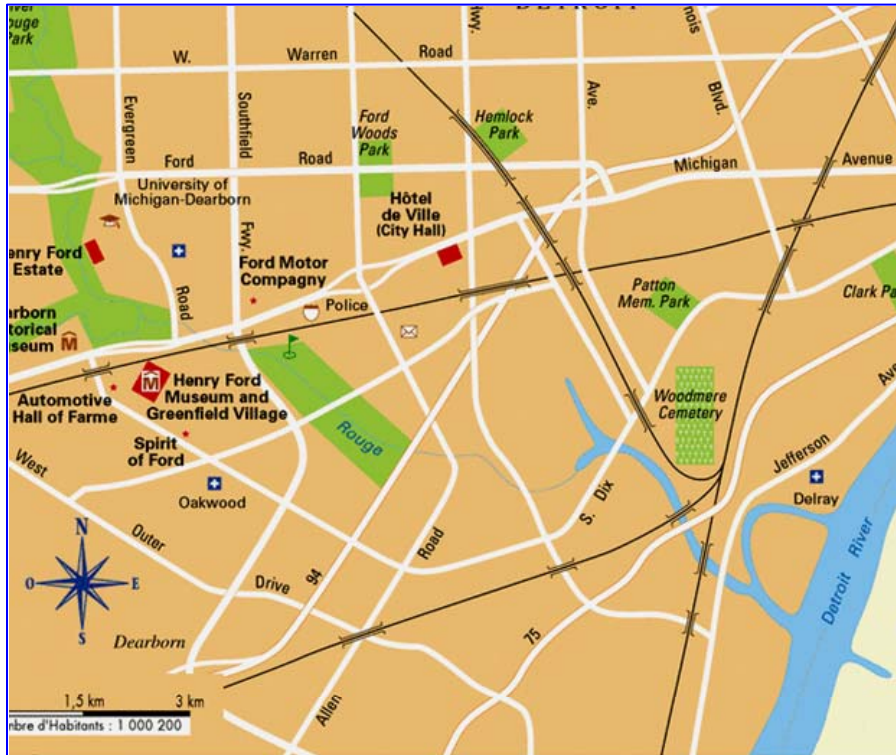
**Photo 1-28- b - : Vue aérienne de la ville du Caire en Egypt le long du Nil, schéma type d'un plan ou maillage linéaire [SWC1.P28-b-].**



#### 1.4.4.7 Le plan réticulaire distendu

On y retrouve les logiques du plan quadrillé et du plan linéaire. Dans ce plan, les voies sont très espacées, sinueuses et les interstices occupés par des parcs ou des espaces naturels ou agricoles. Ses avantages en terme de flexibilité, de fluidité de la circulation, de proximité de la nature sont certains.

En revanche, son caractère sociofuge (déficit de densité et de centralité) constitue tout de même



son principal inconvénient (ville de Milton Keynes : Grande-Bretagne). Il entraîne aussi une consommation élevée de terrain et des dépenses importantes en matières de VRD et suppose l'usage généralisé de l'automobile. Ce plan est généralement rencontré dans les banlieues des sociétés à niveau de vie élevé (Etats-Unis).

Photo 1-29: Maillage de la ville de Detroit dans l'Etat du Michigan aux USA, schématisant un plan réticulaire distendu [SWC1.P29].

#### 1.4.4.8 Le plan introverti

Caractéristique des villes islamiques traditionnelles, il est marqué par la fermeture, une organisation arborescente, un aspect labyrinthe : l'irrégularité et la sinuosité des rues, la fréquence des impasses. Dans ce plan, cette irrégularité, ce désordre est le résultat d'une évolution anarchique due à l'absence d'urbanisme et de pouvoir municipal. Il est souvent issu de la déformation d'un maillage quadrillé hellénistique (centre de Damas).

C'est la traduction spatiale d'une organisation sociale : hiérarchisation et disposition concentrique autour de la grande mosquée, souvent située à l'emplacement de l'agora ou du forum des villes préexistantes. Mais beaucoup de lotissements fermés récents ont des maillages assez semblables, de même que les marinas.



Photo 1-30 : Maillage de la vieille ville de Damas en Syrie, représentant une ville à plan ou maillage introverti [SWC1.P30].

#### 1.4.4.9 Les plans ou maillages mono ou polygéniques

Dans la plupart des villes, le maillage est complexe, polygénique. Il est constitué par la juxtaposition des tracés organiques, par une imbrication plus ou moins complexe des lotissements et de micro compositions urbaines. Ces dernières peuvent consister en un simple remaniement des tracés existants : les lotissements parisiens, les estates londoniens sont des structures ou en la mise en place de tracés tirant parti d'un potentiel fourni par l'existant : chemins et routes souvent très antérieurs à l'époque gallo-romaine. Dans ce type de plans, la frontière entre ces deux notions n'est pas toujours claire.

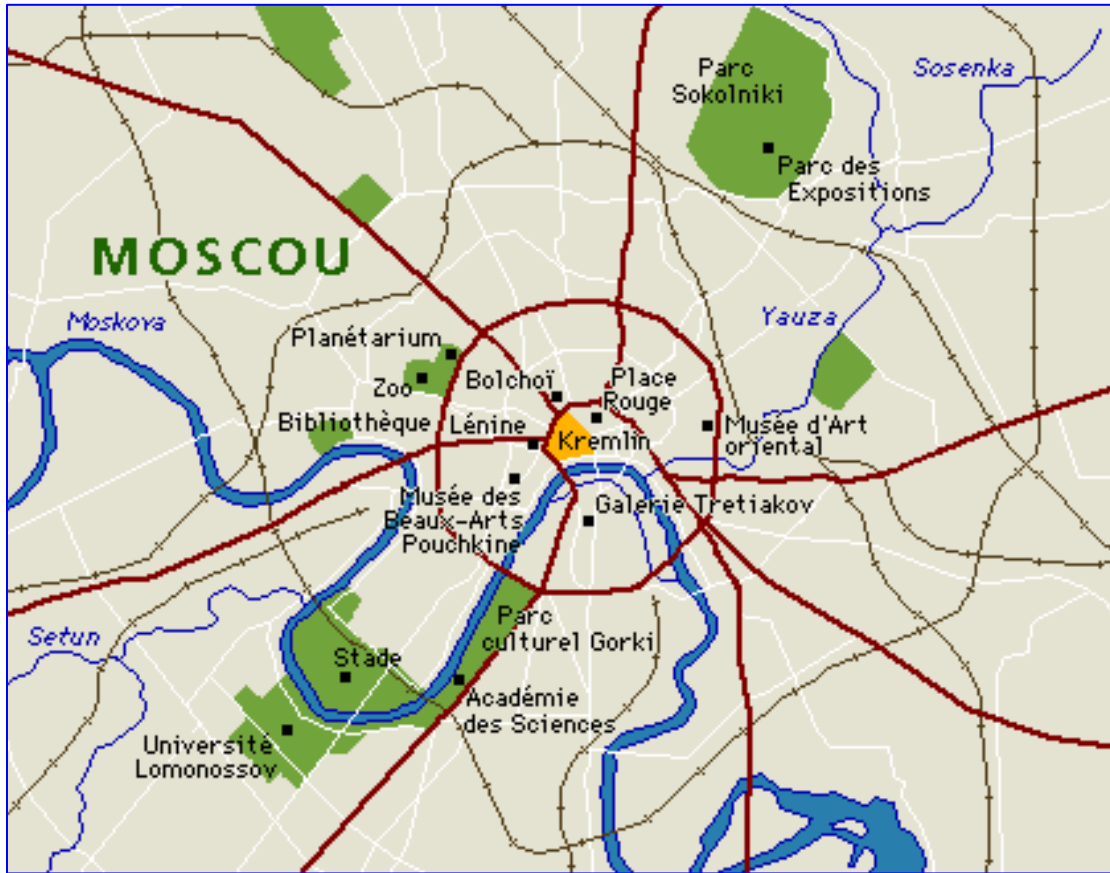


Photo 1-31 : Maillage de la vieille ville de Moscou en Russie, montrant le schéma d'un plan mono ou polygénique [SWC1.P31].

### **1.4.5 Les enjeux de la ville aujourd'hui**

Le renouvellement constant des méthodes d'urbanisme témoigne de la transformation perpétuelle des villes. La compréhension des principales causes de ces mutations se réalise par la prise en compte des différents enjeux de la ville d'aujourd'hui. Ces enjeux sont liés à plusieurs paramètres : la démographie, le mode de vie, les transports, les marchés foncier et immobilier, le développement durable. Les transports seront présentés au deuxième chapitre 2 mais les marchés fonciers et immobiliers plus le développement durable ne font pas partie de cette étude. De ce fait, nous abordons dans ce paragraphe, la démographie et le mode de vie ainsi que leur conséquences sur la ville d'aujourd'hui.

#### **1.4.5.1 La démographie**

La création et le développement des villes sont fortement liés à leur histoire démographique. Les mouvements migratoires sont tantôt provoqués par la croissance rapide de la population, tantôt issues de la volonté de peupler ou de repeupler certaines régions. De nos jours la différence des taux de natalité entre pays développés et en voie de développement est un fait démographique non négligeable.

Dans les pays en voie de développement, les flux migratoires des populations villageoises vers les grandes villes pour tenter d'y survivre sont responsables de la formation des bidonvilles dans les zones périphériques. De ce fait, la gestion de ces villes demeure toujours extrêmement difficile en raison du manque des ressources.

Dans les pays développés par contre, le problème est tout à fait différent et s'explique par la limitation des naissances liée à l'accroissement du revenu national, et par les progrès de la médecine qui ont permis d'allonger l'espérance de vie.

#### **1.4.5.2 Le mode de vie**

Le mode de vie qui d'ordinaire opposait la ville à la campagne a connu une évolution complète qui s'interprète par deux facteurs principaux : la modernisation rapide des techniques agricoles et l'entrée des femmes sur le marché du travail. La prise en compte du premier facteur met en

relief l'accès des paysans à un mode de vie de type urbain tandis que le second impose le développement des équipements dans les foyers pour alléger les tâches ménagères ainsi que des équipements publics afin de prendre en charge les enfants, et les personnes dépendantes pendant que les familles travaillent.

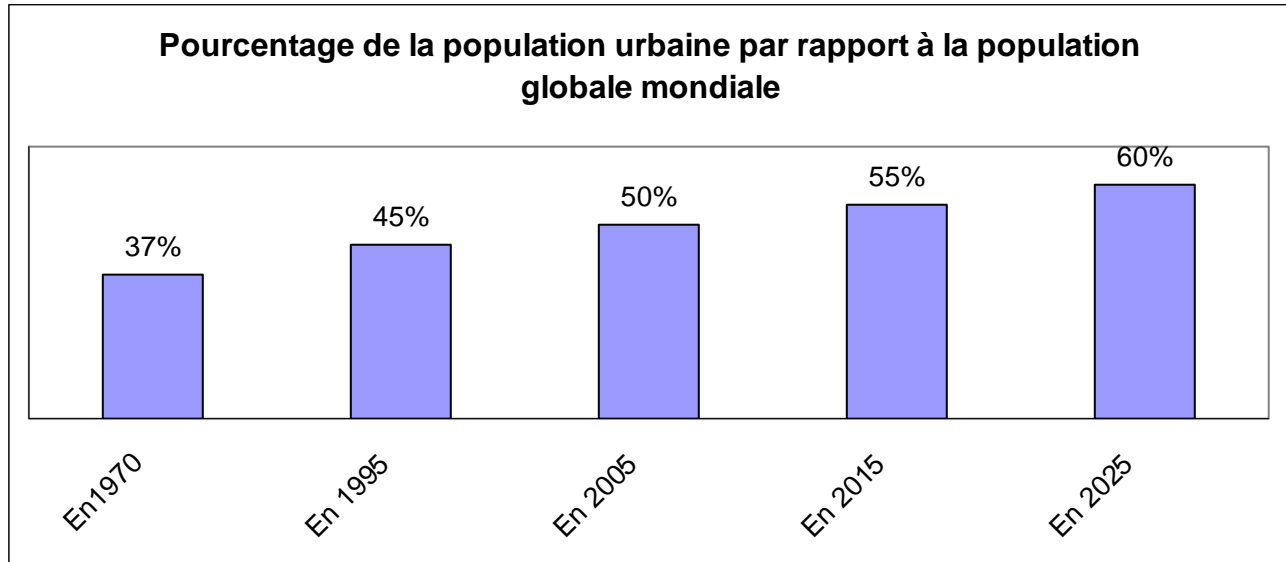
#### **1.4.6 Conséquences des enjeux de la ville aujourd'hui**

La prise en compte de tous les enjeux aujourd'hui font de la ville un lieu d'interaction entre l'habitat, la vie quotidienne et les modes de transport où se croisent des défis majeurs. De ce fait, la ville renvoie une image par la donnée de ces interactions. Pour illustrer ces propos, nous présentons dans ce qui suit des données chiffrées sur les proportions des populations qui habitent une zone urbaine, leur nombre de déplacements quotidiens en fonction de l'âge ou de l'activité professionnelle des personnes, sur les périodes pendant lesquelles ils effectuent leur déplacement, ainsi que sur les modes de transports qu'ils utilisent pour se déplacer.

##### **1.4.6.1 La population habitant une zone urbaine**

La croissance de la population mondiale résulte de plusieurs facteurs : d'une part, il y a de plus en plus de la croissance démographique naturelle des populations urbaines, d'autre part des mouvements migratoires des campagnes plus ou moins lointaines vers les villes et des passages des petits bourgs ruraux au statut de centre urbain – qui constitue à proprement parler le phénomène d'urbanisation – ainsi que de l'absorption de groupements ruraux à la périphérie des villes en extension **[GAV]**.

Entre 1970 et 1995, le taux d'urbanisation mesuré par le rapport de la population urbaine à la population totale, était de 37 à 45%. Depuis 2005, la moitié de la population mondiale réside et travaille en zone urbaine. Ce taux atteindra 55% en 2015 et 60% en 2025.

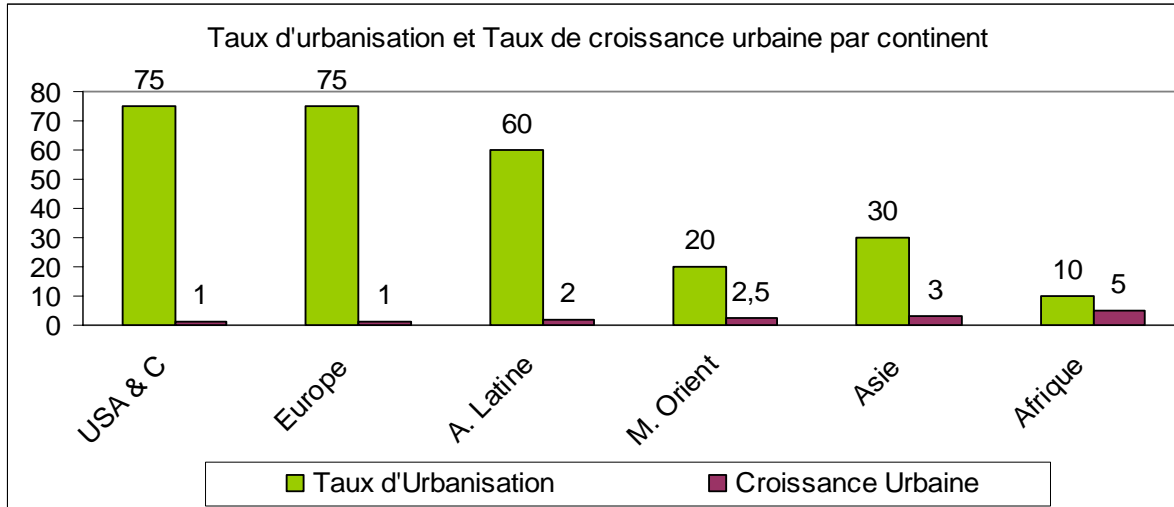


**Figure 1-1: Diagramme d'évolution du pourcentage de la population urbaine par rapport à la population mondiale. [ART1]. Note : Dans ce diagramme, on remarque que depuis 1995 l'augmentation de la population urbaine est stable à 5% tous les 10 ans.**

La différenciation par continent est un phénomène historiquement et géographiquement diversifié. A l'échelle des grandes régions du globe, trois grandes situations peuvent être repérées, en fonction de la combinaison du niveau d'urbanisation et du taux de la croissance démographique naturelle. Les continents dans lesquels l'urbanisation est la plus ancienne et la plus avancée sont l'Europe et l'Amérique du Nord qui ont des niveaux d'urbanisation voisins (de l'ordre de 75 %) et qui, va ayant des taux de croissance naturelle très faibles (ayant achevé leur transition démographique), connaissent des taux de croissance urbaine de l'ordre ou inférieur à 1%.

En Amérique latine, l'urbanisation est aussi avancée que dans le premier groupe, mais avec une croissance démographique assez soutenue et qui connaît un taux de croissance urbaine de l'ordre de 2% par an. On note que ce taux a été de l'ordre de 3,2% par an entre 1975 et 1990.

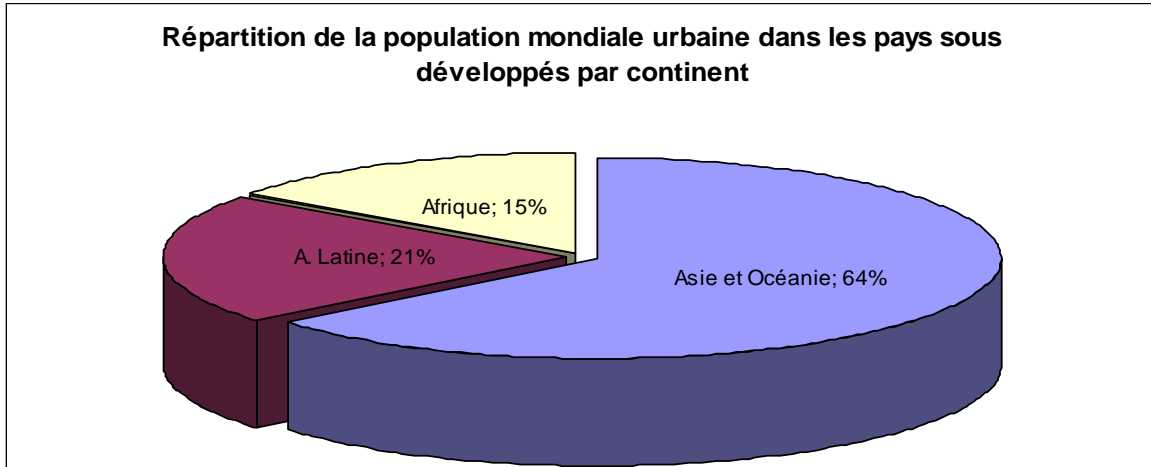
Les régions les moins urbanisées sont le Moyen-Orient, l'Asie (hors Japon), l'Afrique où le niveau d'urbanisation est inférieur à 50% mais où, suivant que la croissance démographique est ralentie (Chine) ou qu'elle est encore forte (jusqu'à 3% l'an), le taux de croissance urbaine se situe entre 2,5 et 5% l'an.



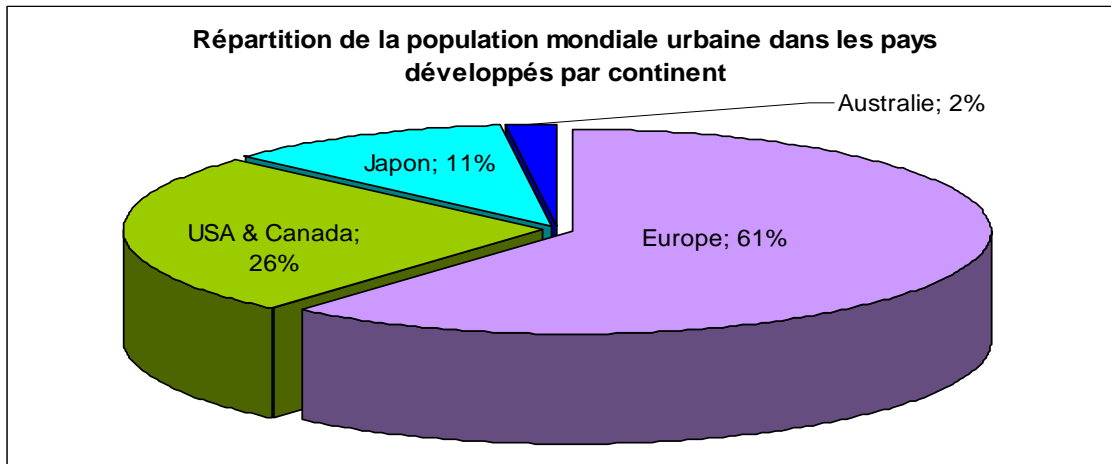
**Figure 1-2: Taux d'urbanisation et taux de croissance urbaine par continent [ART1].**

**Note :** Ce diagramme montre un taux d'urbanisation identique sur le continent européen et en Amérique du Nord, suivis de l'Amérique latine. Tandis que sur les autres continents, on prévoit une assez forte croissance urbaine 5% à l'horizon 2020.

La croissance urbaine la plus rapide se rencontre actuellement en Afrique où on l'estime à environ 4% l'an pour la période de 2000 à 2020. Le volume de population urbaine supplémentaire annuel le plus important se trouve toutefois en Asie, en raison des masses de population concernées : un milliard de citadins sont attendus en 2020, dont 500 millions pour la Chine et l'Inde seules. La répartition de la population urbaine mondiale tend en effet naturellement à se rapprocher de la répartition de la population mondiale : au début du 20<sup>ème</sup> siècle, les deux tiers de la population urbaine mondiale vivaient dans les pays développés ; à la fin du siècle, les deux tiers de la population urbaine se trouvaient dans les pays en développement.



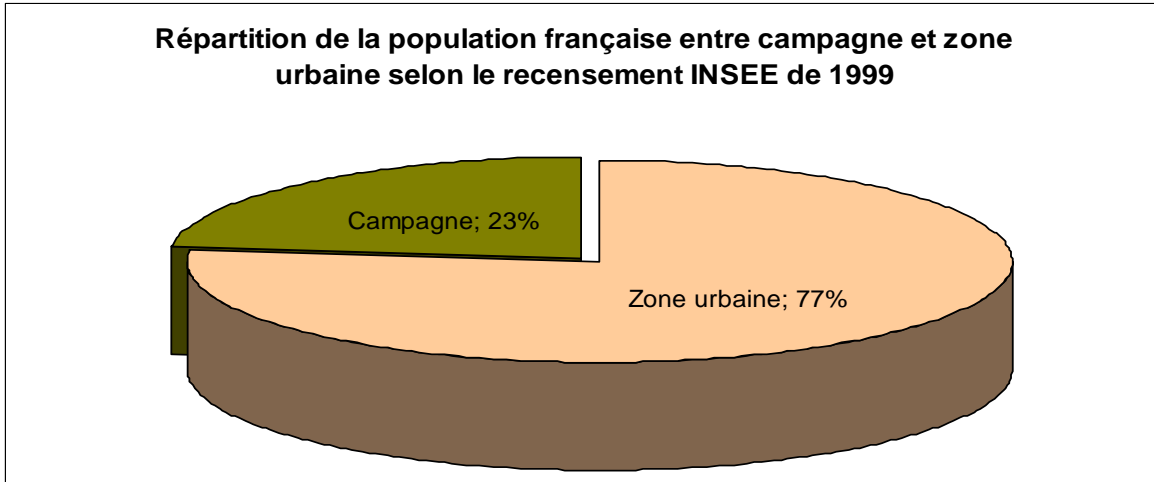
**Figure 1-3: Répartition de la population urbaine mondiale dans les pays sous développés par continent [ART1].**



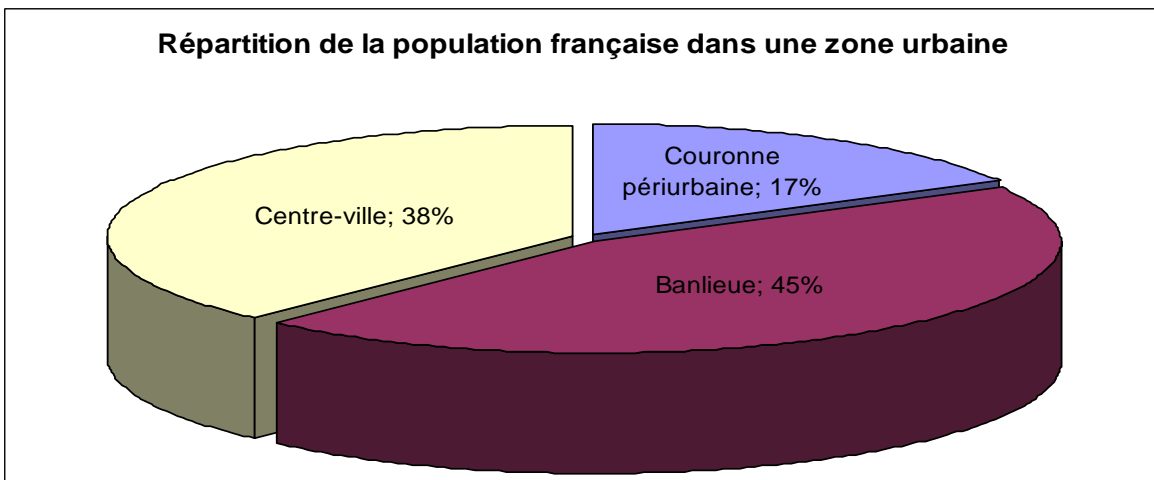
**Figure 1-4: Répartition de la population urbaine mondiale dans les pays développés par continent [ART1].**

A l'heure actuelle, 77 % des Français habitent dans une aire urbaine (38 % d'entre eux habitent la ville - centre, 45 % la banlieue et 17 % la couronne périurbaine). En 1999, l'INSEE a établi une liste de 354 aires urbaines. Elles recouvrent 13 908 communes ([BLA], [PON],





**Figure 1-5: Répartition de la population française entre la campagne et la zone urbaine selon l'INSEE [ART1].**

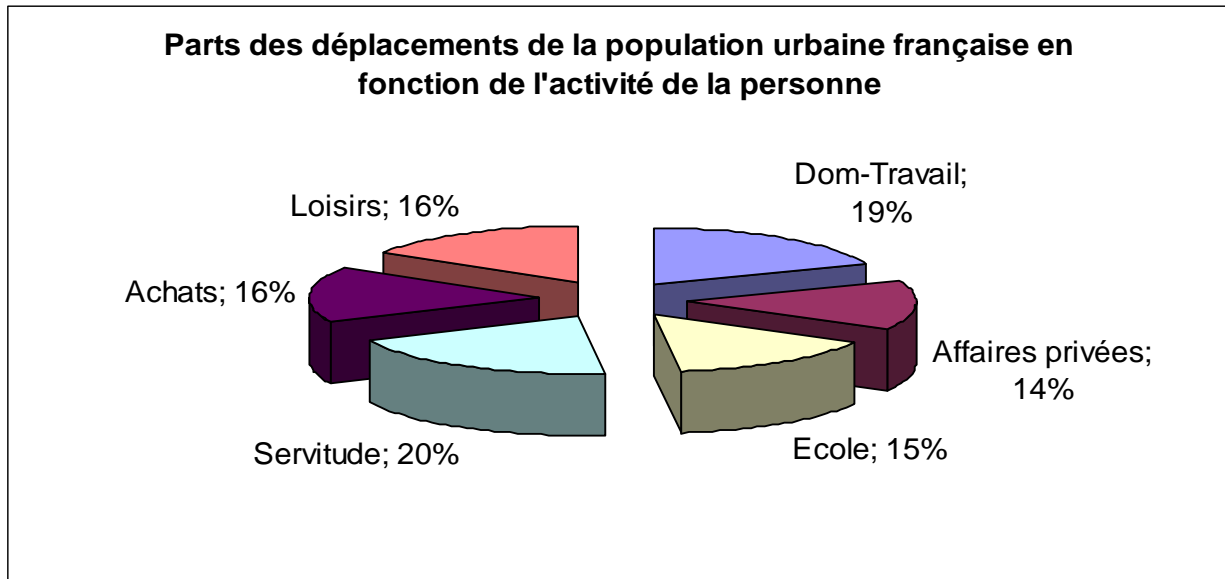


**Figure 1-6: Répartition de la population française dans aire urbaine. [ART1].**

#### 1.4.6.2 Les déplacements des populations en fonction de l'activité

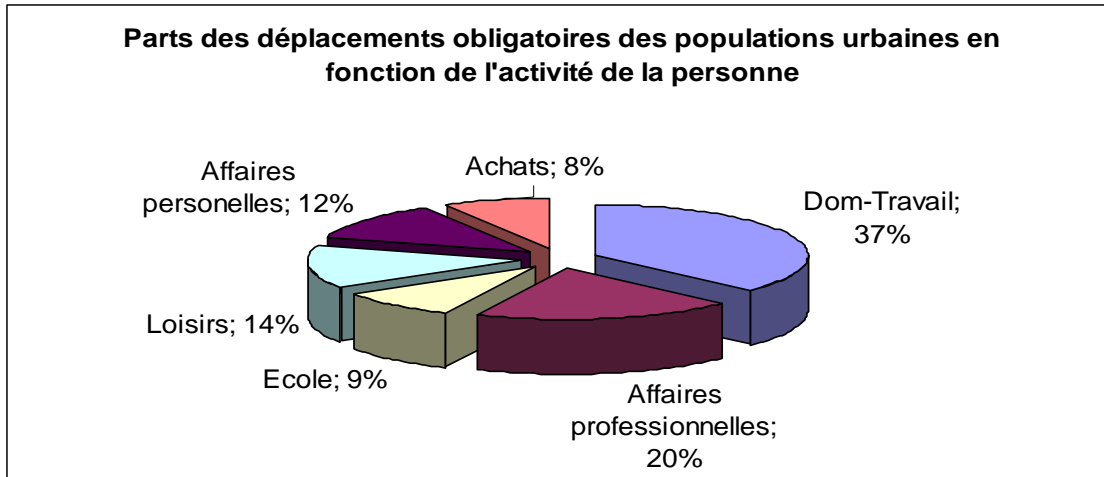
Les parts de déplacement des populations sont liées aux raisons d'effectuer ces déplacements et tiennent compte de l'âge de ceux qui se déplacent. Pour comptabiliser les déplacements, on peut soit considérer leur nombre ou bien la distance parcourue. Dans le premier cas, les statistiques donnent une image des activités des populations. Dans le second, les valeurs observées reflètent la consommation d'énergie due aux déplacements. Dans un rapport publié en octobre 2006 par le centre de recherche sur les transports urbains en France dans

« Sciences & Décisions », il est indiqué que près de la moitié des nos déplacements sont «obligés» (trajet domicile- travail : 19 %, affaires professionnelles : 14 %, école : 15 %). L'autre moitié est liée aux affaires personnelles – par exemple accompagner quelqu'un 20 % - , aux loisirs 16 % et aux achats 16 %.



**Figure 1-7: Répartition des déplacements des populations en fonction de l'activité de la personne [ART1].**

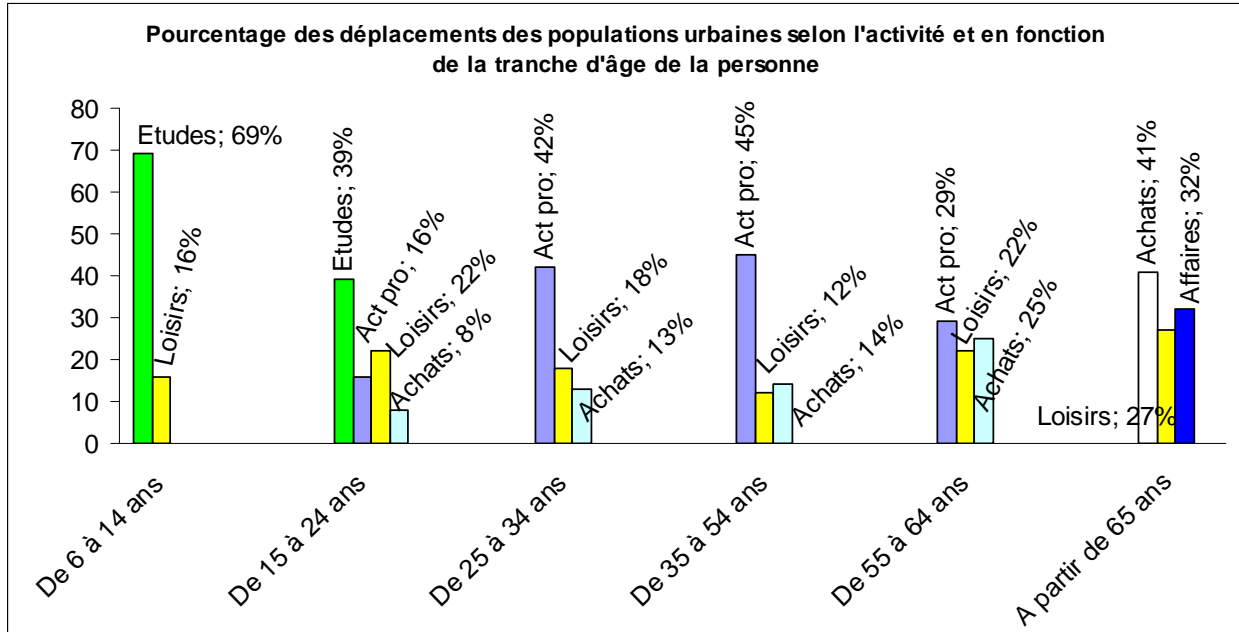
La part des déplacements «obligés» monte à 66 % si l'on prend en compte la distance parcourue (trajet domicile- travail : 37 %, affaires professionnelles : 20 %, école : 9 %). L'importance relative des déplacements non obligés change aussi : les loisirs représentent 14 % des kilomètres parcourus, les affaires personnelles 12 % et les achats 8 %. Cette décroissance des parts de déplacements liée respectivement à l'école de - 60 % et aux achats de - 50 % s'explique par la proximité des établissements scolaires et des centres commerciaux [IAURIF<sup>5</sup>].



**Figure 1-8: Répartition des déplacements obligatoires des populations en fonction de l'activité de la personne [ART1].**

Il est également indiqué dans ce même rapport que les motifs de déplacements varient avec l'âge de la personne. En effet, ce rapport montre que :

- Entre 6 et 14 ans, 69 % des déplacements sont faits pour se rendre à l'école et 16 % pour les loisirs.
  - Entre 15 et 24 ans, 39 % des déplacements sont dus aux études et 16 % à une activité professionnelle. Dans cette catégorie d'âge, les loisirs représentent 22 % des déplacements et les achats 8 % seulement.
  - Entre 25 et 34 ans, la principale source de déplacements est l'activité professionnelle (42 %), à laquelle on ajoute les loisirs représentant 18 % des déplacements et les achats 13 %.
  - Entre 35 et 54 ans, l'activité professionnelle représente 45 % des déplacements, les loisirs 12 % et les achats 14 %.
  - Entre 55 et 64 ans, l'activité professionnelle représente 29 % des déplacements, les loisirs 22 % et les achats 25 %.
  - A partir de 65 ans, 41 % des déplacements sont motivés par les achats et 27 % par les loisirs.
- Dans tous les cas, le complément à 100 est constitué des déplacements pour affaires personnelles. Ces chiffres montrent que de 6 à 24 ans nos déplacements sont essentiellement liés à la formation, entre 25 et 64 ans à l'activité professionnelle, puis au-delà, ils sont motivés par les achats **[COU]**.



**Figure 1-9: Répartition des déplacements des populations urbaines selon l'activité en fonction de l'âge de la personne [ART1].**

#### **1.4.6.3 Nombre de déplacements en fonction de l'activité professionnelle**

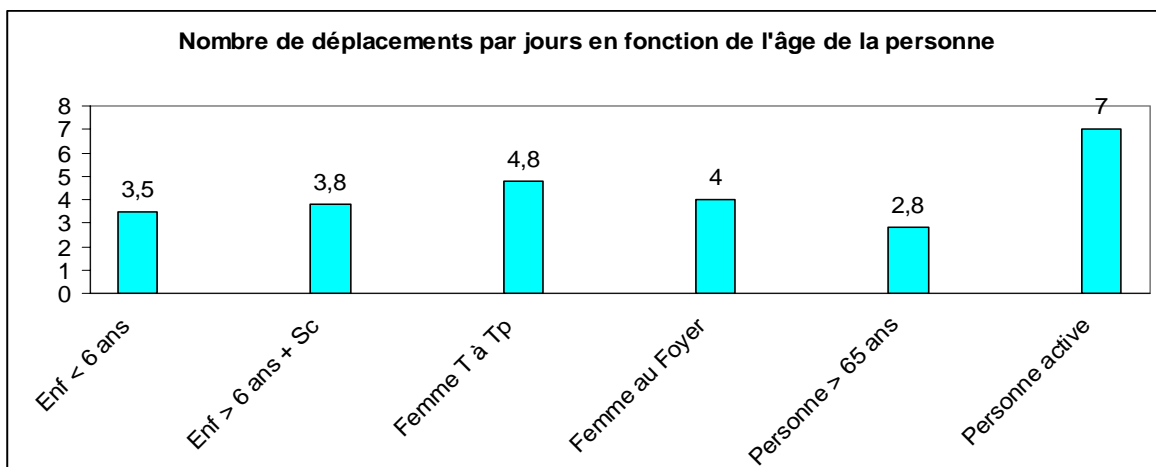
L'activité professionnelle est un élément caractéristique du nombre de déplacements. Une personne âgée de six ans ou plus fait 3,5 déplacements par jour. Ce nombre dépend de l'activité professionnelle et de la présence d'enfants dans le ménage. Bien qu'il semble difficile d'agir sur les déplacements liés à l'activité professionnelle, en revanche, une adaptation de l'organisation des transports peut réduire le nombre de déplacements liés aux enfants. On observe une augmentation régulière du nombre de déplacements pour les femmes et une diminution pour les hommes.

Les deux tiers des déplacements supplémentaires entre 1976 et 2001 ont été effectués par les femmes, principalement en raison de la part croissante des déplacements pour accompagner quelqu'un (47 % des déplacements sont dus aux achats et aux affaires personnelles chez les femmes contre 32 % chez les hommes).

Les personnes ayant des enfants et ne travaillant pas à temps plein se déplacent plus que la moyenne (4,2 déplacements par jour pour les personnes travaillant à temps partiel, 4 déplacements par jour pour les femmes au foyer). Viennent ensuite les enfants d'âge scolaire et les personnes ayant un emploi (3,8 déplacements par jour). Le nombre de déplacements quotidiens des plus de 65 ans reste faible (2,8 déplacements par jour). Il a cependant augmenté au cours des trente dernières années à cause des loisirs et des affaires personnelles (plus 0,25 déplacement par jour entre 1971 et 2001).

Enfin, 9 % de la population effectuent au moins sept déplacements par jour. Il s'agit principalement de travailleurs indépendants ou de personnes ayant entre 35 et 44 ans.

**([BUR], [COU], [BER])**



**Figure 1-10: Nombre des déplacements des populations urbaines selon l'activité en fonction de l'âge de la personne [ART1].**

#### 1.4.6.4 Moment de la journée où il y a plus de déplacements

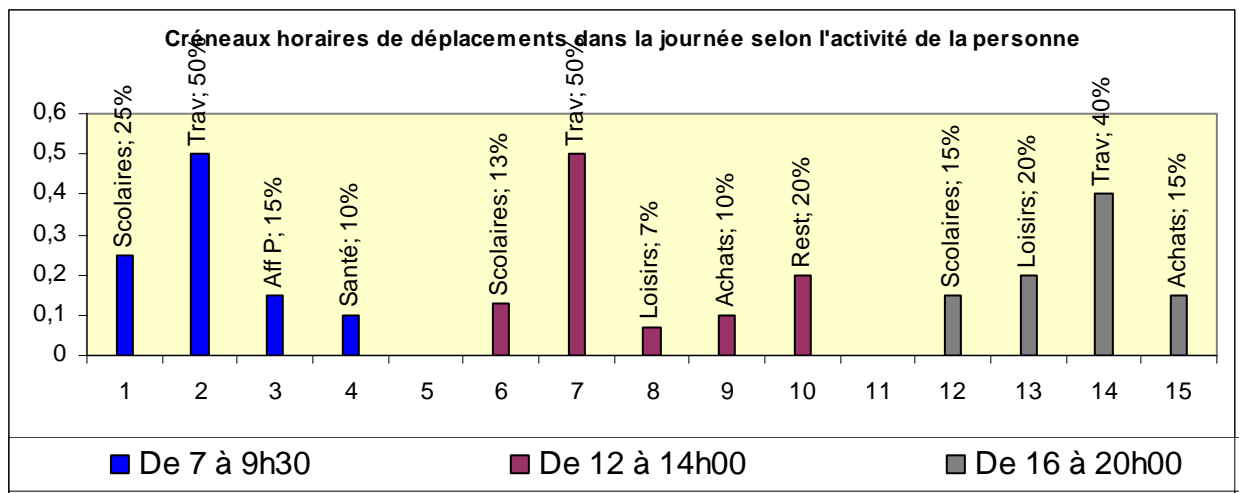
En dépit de l'étalement des déplacements et de l'enchevêtrement croissant de leurs motifs, deux périodes de pointe séparées par un plateau marquent toujours les déplacements. La première va de 7 h à 9 h 30 et culmine entre 8 h et 8 h 30. La seconde s'étend de 16 h à 20 h avec un maximum entre 18 h et 18 h 30. Le trafic reste élevé jusqu'à 21 h 30 puis décroît régulièrement jusqu'à minuit.

Jusqu'à 9 h, les déplacements se font quasi exclusivement en direction du lieu de travail (entre 7 h 30 et 8 h 30, 25 % des déplacements sont le fait des scolaires et des étudiants). La moitié des

déplacements est encore liée au travail entre 9 h et 10 h et entre 12 h et 14 h. Entre 12 h 30 et 13 h 30, les scolaires génèrent 13 % du trafic.

En matinée, le trafic est dû aux achats et aux affaires personnelles (accompagnement, santé). Les loisirs s'y ajoutent l'après-midi et sont la cause de plus de 15 % des déplacements entre midi et une heure.

La période de pointe du soir correspond à la superposition de plusieurs types d'activité. D'une part le retour du travail (40 % des déplacements entre 17 h 30 et 21 h) et des études (15 % des déplacements entre 16 h 30 et 18 h). D'autre part les affaires personnelles (un tiers des déplacements entre 16 h et 17 h, un quart entre 17 h et 18 h 30 et un cinquième ensuite). Viennent ensuite les achats (environ 15 % du trafic entre 16 h et 19 h) et les loisirs (20 % du trafic entre 19 h et 21 h 30). Les déplacements dus aux loisirs sont majoritaires après 20 h 30. On constate d'après ces chiffres que les périodes de grande affluence correspondent prioritairement aux déplacements obligés à la fois pour les professionnels et les scolaires (domicile -travail ou domicile -école) dans le sens aller et retour. **[DRE]**

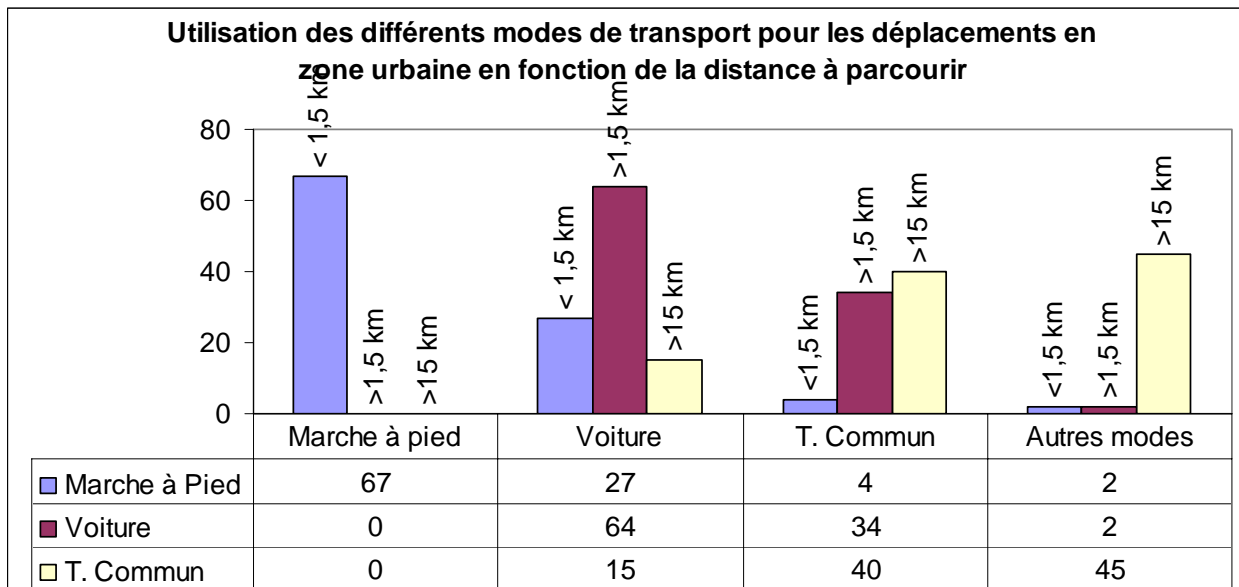


**Figure 1-11: Pourcentage d'utilisation des différents modes de déplacement en zone urbaine en fonction de la distance à parcourir [ART1].**

#### 1.4.6.5 Modes de déplacements en fonction de la distance

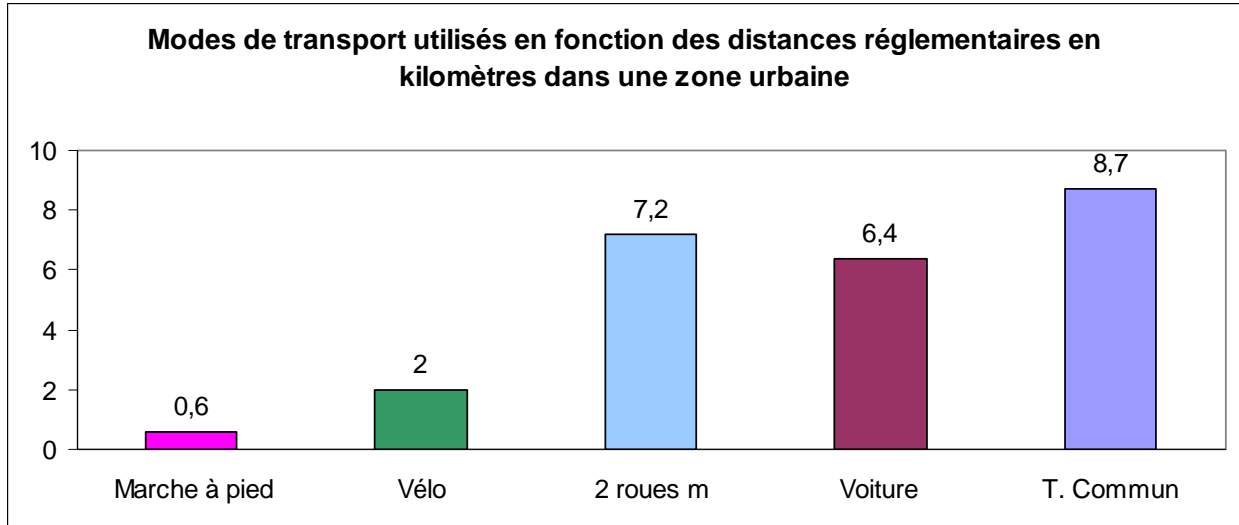
Le choix du mode de déplacement dépend de la distance à parcourir donc de l'espace urbain à traverser. En zone urbaine, les déplacements de moins d'un kilomètre et demi sont effectués à

pied (67 % des déplacements) ou en voiture (27 % des déplacements) mais pratiquement pas en transports en commun (4 %). Au-delà d'un kilomètre et demi, la marche à pied disparaît. La voiture est majoritaire (60 % des déplacements), suivie par les transports en commun (34 %). La part des transports en commun augmente avec la distance. En Ile-de-France, elle atteint près de 40 % pour les déplacements supérieurs à 15 km.



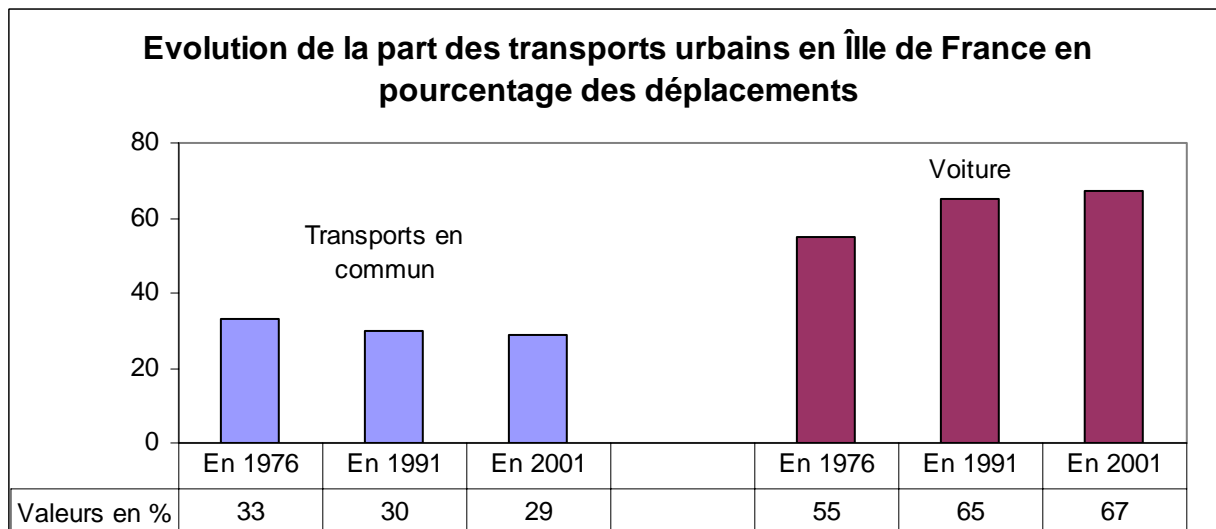
**Figure 1-12: Pourcentage d'utilisation des différents modes de déplacement en zone urbaine en fonction de la distance à parcourir [ART1].**

En moyenne, la distance parcourue à pied est de 600 mètres (cette distance correspond sensiblement à la distance inter station comme nous le verrons au chapitre 3), elle est de 2 km en vélo et de 7,2 km pour un deux-roues motorisé. La longueur moyenne des déplacements en voiture est de 6,4 km et elle atteint 8,7 km pour les transports en commun. Globalement, la part des transports en commun diminue depuis des années.



**Figure 1-13: Modes de transport utilisés en fonction des distances réglementaires en kilomètres dans une zone urbaine [ART1]. On précise que les distances concernant la voiture et les transports en commun sont des moyennes.**

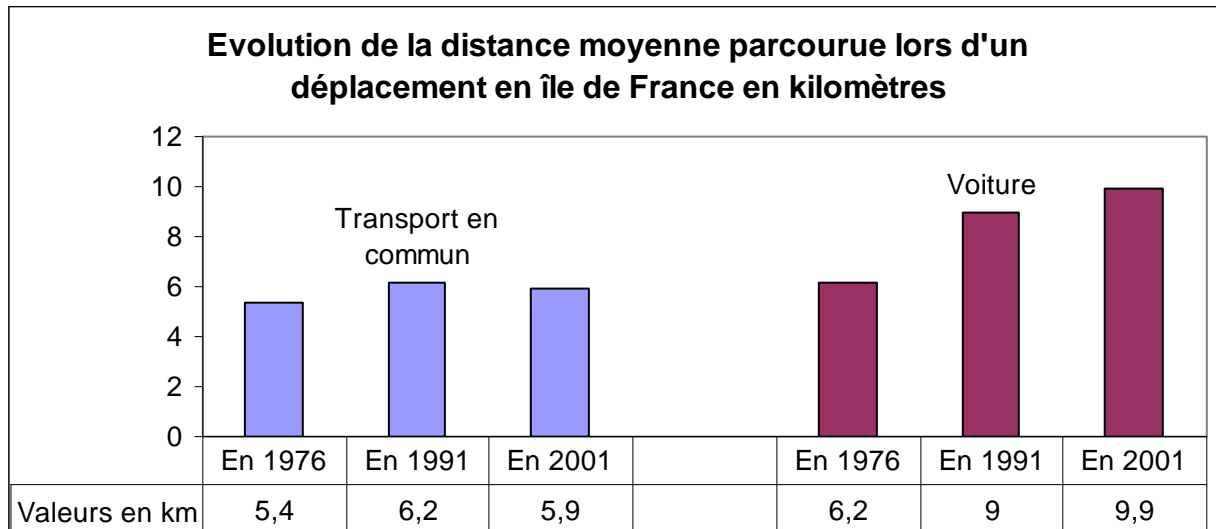
En Ile-de-France par exemple, la part des transports en commun est passée de 33 % du nombre des déplacements en 1976 à 30 % en 1991 et 29 % en 2001. La part de la voiture a en revanche progressé de 55 % en 1976 à 65 % en 1991 et 67 % en 2001.



**Figure 1-14: Evolution de la part des transports urbains en île de France en pourcentage des déplacements [ART1].**

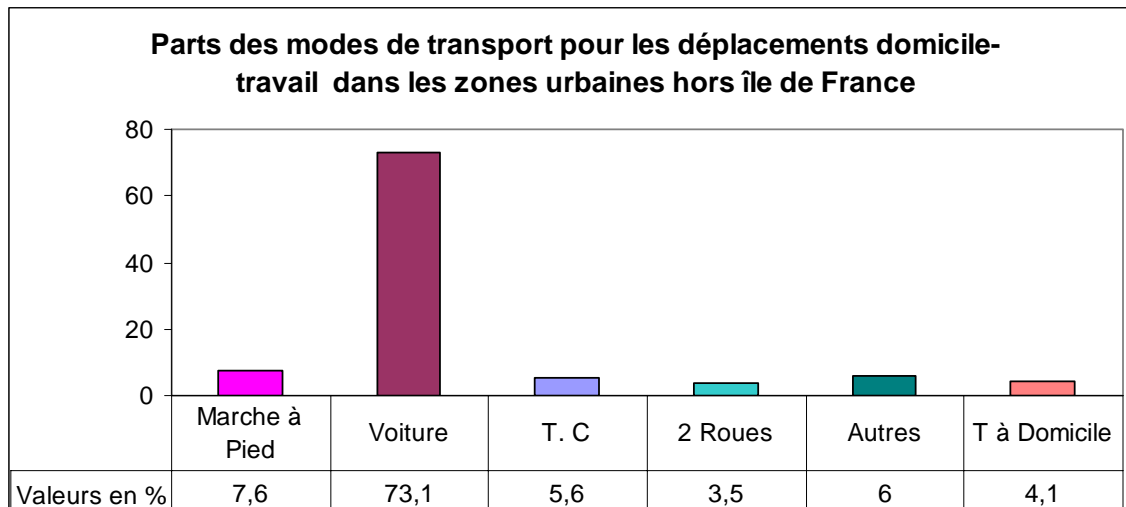


On observe la même tendance lorsque l'on prend comme critère la distance parcourue en moyenne lors d'un déplacement. En transport en commun, elle était en Ile-de-France de 5,4 km en 1976, de 6,2 km en 1991 et de 5,9 km en 2001. Pour la voiture particulière, les chiffres étaient respectivement de 6,2 km en 1976, de 9,0 km en 1991 et 9,9 km en 2001.



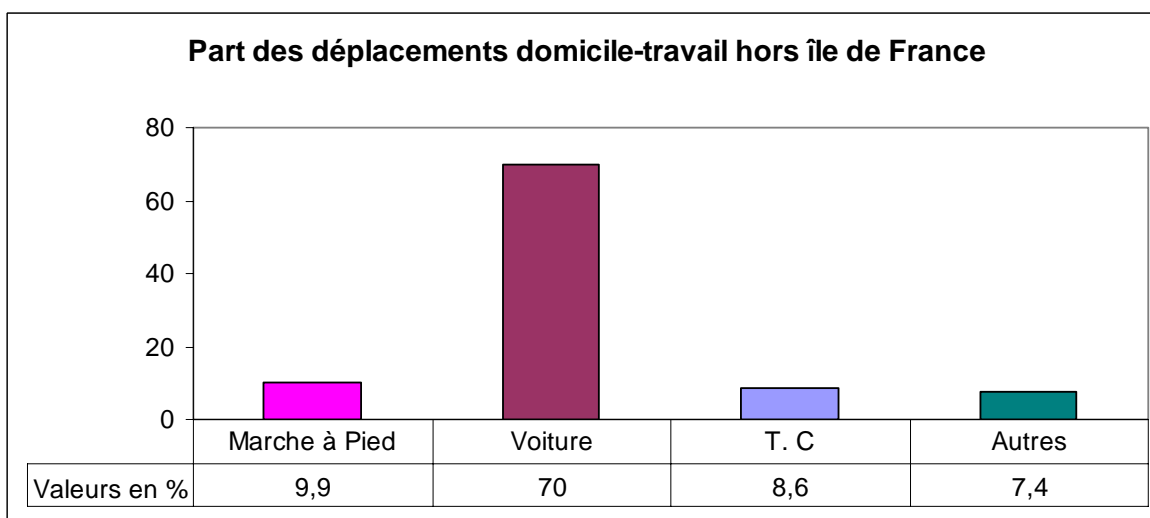
**Figure 1-15: Evolution de la distance moyenne parcourue lors d'un déplacement en île de France en kilomètres [ART1].**

Dans les agglomérations, la part relative des modes de déplacements change selon la taille des zones urbaines et la région. En moyenne sur l'ensemble des aires urbaines hors Ile-de-France, 73,1 % des déplacements domicile -travail se font en voiture particulière, 7,6 % à pied, 5,6 % en transports en commun, 6,0 % utilisent plusieurs modes de transport et 3,5 % se font en deux-roues. Les 4,1 % restants correspondent aux personnes qui travaillent à domicile.



**Figure 1-16: Part des déplacements domicile-travail en pourcentage dans les zones urbaines hors île de France. [ART1].**

La part de la voiture particulière est un peu plus faible dans les aires urbaines des très grandes villes (70 % en moyenne). Elle est en partie remplacée par les transports en commun (8,6 %) ou la combinaison de plusieurs modes de transport (7,4 %). La part de la marche à pied est plus importante que la moyenne nationale dans les agglomérations du Sud -Est (Marseille, Nice...). La marche y assure 9,9 % des déplacements domicile -travail. Ce phénomène s'explique par la proportion élevée de personnes travaillant dans leur commune de résidence (56,6 % contre 40,6 % pour la moyenne nationale).



**Figure 1-17: Part des déplacements domicile-travail en pourcentage hors île de France. [ART1].**

La voiture s'impose pour les déplacements domicile-travail dans les aires urbaines petites ou moyennes (moins de 100 000 habitants) de l'Ouest de la France (78,5 % des déplacements). Ce sont des zones où le travail est concentré et l'habitat dispersé (67,6 % de maisons individuelles contre 53,8 % pour la moyenne nationale). Les déplacements domicile-travail en voiture sont plus rapides que dans les autres aires urbaines (55 % durent moins de 10 minutes et 70 % moins de 15, contre 35 % et 54 % ailleurs).

Les deux-roues sont utilisés principalement dans les aires urbaines du Nord et du Sud-Ouest où l'habitat est dense et les déplacements courts. Ils restent cependant un mode de transport minoritaire avec 4,3 % des déplacements domicile -travail. **[NIE]**.

## 1.5 Conclusion du chapitre 1

Les informations développées dans ce chapitre ont permis de comprendre fondamentalement le fonctionnement de la ville en mettant en exergue sa place de centralité dans ce travail de thèse.

Dans un premier temps, nous avons pu noter que l'urbanisme est une discipline très ancienne à double facette dont l'idéologie repose théoriquement sur des thématiques en étroite filiation avec les sciences humaines puis, professionnellement sur la distribution, l'organisation et l'aménagement des espaces habitables, récréatifs, économiques et culturels.

Dans un second temps, nous avons pu noter que la ville est une œuvre d'art par laquelle s'exprime à travers le temps l'organisation d'une société, c'est-à-dire le témoin d'une époque, de la culture d'un peuple et plus largement la marque d'une civilisation ainsi que ses habitudes et modes de déplacements.

Puis, dans le désir de satisfaire ses besoins divers et variés, nous avons découvert pour l'usager à travers sa mobilité, les motifs, les modes et les créneaux horaires ainsi que le nombre de ses déplacements quotidiens.

Pour conclure, nous pouvons dire que la définition de la ville comme élément central dans notre travail de thèse se réalise par le fait qu'elle permet de rendre témoignage de l'ensemble des choix économiques, politiques, culturels, touristiques et de mobilité à travers lesquels, il est possible de traduire à l'aide de l'urbanisme au sens de la géographie urbaine et de l'architecture, la morphologie, c'est-à-dire le maillage qu'une société donne à un site dans le temps. Puis celui de l'usager comme acteur principal s'accompagnant par la mise en œuvre des différents modes de déplacements pour réaliser toutes les activités qui font fonctionner une ville au sens de l'aire urbaine.

## **CHAPITRE 2:**

# **LES TRANSPORTS EN COMMUN URBAINS**

## Tables des matières du chapitre 2

<b>2.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>83</b>
<b>2.2</b>	<b>Définition des transports en commun en site propre.....</b>	<b>84</b>
2.2.1	Rôle des transports en commun en site propre.....	84
2.2.2	Impact contextuel actuel des transports en commun en site propre.....	84
2.2.2.1	Impact pour les sites desservis.....	85
2.2.2.2	Impact pour la ville.....	85
<b>2.3</b>	<b>Éléments constitutifs des transports en commun en site propre.....</b>	<b>85</b>
2.3.1	Les infrastructures viaires et équipements.....	86
2.3.2	Les parcs d'entretien et de maintenance.....	86
2.3.3	Les matériels roulants.....	86
<b>2.4</b>	<b>Classification des transports en commun en site propre.....</b>	<b>86</b>
2.4.1	Classification selon la technique de guidage.....	86
2.4.2	Classification selon la fonction.....	87
2.4.3	Transports en commun en site propre en mode guidé.....	87
<b>2.4.3.1</b>	<b>Transports en commun en site propre en mode guidé sur rails.....</b>	<b>87</b>
2.4.3.1.1	Cas du tramway fer.....	87
2.4.3.1.1.1	Définition.....	87
2.4.3.1.1.2	Le véhicule.....	88
2.4.3.1.2	Typologie des tramways.....	89
2.4.3.1.2.1	Tramways de première génération PCC.....	89
2.4.3.1.2.1.1	Les performances techniques.....	89
2.4.3.1.2.1.1.1	La propulsion.....	89
2.4.3.1.2.1.1.2	Le freinage.....	90
2.4.3.1.2.1.1.3	Le frein rhéostatique.....	90
2.4.3.1.2.1.1.4	Les freins sur transmissions.....	90
2.4.3.1.2.2	Tramway de deuxième génération (le TFS).....	91

2.4.3.1.2.2.1	Les caisses.....	92
2.4.3.1.2.2.2	La motorisation.....	92
2.4.3.1.2.2.3	La conduite.....	93
2.4.3.1.2.2.4	Equipements commerciaux.....	93
2.4.3.1.2.2.5	La décoration extérieure.....	93
2.4.3.1.2.3	La troisième génération : le Citadis .....	95
2.4.3.1.2.3.1	La gamme Citadis.....	95
2.4.3.1.2.3.2	Le Citadis 302.....	96
2.4.3.1.2.3.3	Motorisation.....	97
2.4.3.1.2.3.4	Performances techniques.....	99
2.4.3.1.2.3.5	Le véhicule du Citadis.....	99
2.4.3.1.2.4	La voie.....	101
2.4.3.1.2.4.1	La pose continue.....	102
2.4.3.1.2.4.2	La pose discontinue.....	102
2.4.3.1.2.4.3	Qualités techniques d'une voie de tramway fer...102	
2.4.3.1.2.4.4	Fonction technique de la plate-forme.....	103
2.4.3.1.2.4.5	Fonction technique du rail.....	103
2.4.3.1.2.5	Typologie de rails.....	104
2.4.3.1.2.5.1	Le rail Vignole.....	104
2.4.3.1.2.5.2	Le rail à gorge ou rail Broca.....	104
2.4.3.1.2.6	Les stations.....	104
<b>2.4.3.2</b>	<b>Transports en commun en site propre en mode guidé sur pneumatique...106</b>	
2.4.3.2.1	Cas du métro automatique.....	106
2.4.3.2.1.1	Définition.....	106
2.4.3.2.1.2	La voie .....	106
2.4.3.2.1.3	Le véhicule.....	106
2.4.3.2.1.4	Les performances techniques.....	107
2.4.3.2.1.5	Les technologies utilisées.....	108
2.4.3.2.2	Les stations.....	108
<b>2.4.3.3</b>	<b>Transports en commun en mode non guidé sur pneumatique.....111</b>	
2.4.3.3.1	Cas de l'autobus.....	111
2.4.3.3.1.1	Définition.....	111

2.4.3.3.1.2	La voie.....	112
2.4.3.3.1.3	Le véhicule.....	112
2.4.3.3.1.4	Performances techniques.....	115
2.4.3.3.2	Cas du Trolleybus.....	115
2.4.3.3.2.1	Définition.....	115
2.4.3.3.2.2	Performances techniques.....	116
2.4.3.3.2.3	Le véhicule.....	116
2.4.3.3.2.4	La conduite.....	116
2.4.3.3.2.5	Le trolleybus et l'environnement.....	117
2.4.3.3.2.6	Différents constructeurs.....	117
2.4.3.3.3	Cas du Bus à Haut Niveau de Service BHNS.....	119
2.4.3.3.3.1	Définition.....	119
<b>2.4.3.4</b>	<b>Transports en commun en site propre de type intermédiaire.....</b>	<b>119</b>
2.4.3.4.1	Cas du tramway sur pneus.....	119
2.4.3.4.1.1	Définition.....	119
2.4.3.4.1.2	La voie.....	120
2.4.3.4.1.3	Le véhicule.....	120
2.4.3.4.1.4	Qualités et performances techniques.....	121
2.4.3.4.1.5	Citons un exemple, celui du futur tramway de Douais.....	121
2.4.3.4.2	Station.....	122
<b>2.5</b>	<b>Le panorama général des transports en communs.....</b>	<b>122</b>
2.5.1	Le risque de vol ou d'agression dans les transports en commun.....	124
2.5.2	Coûts et facteurs de choix des transports en commun.....	125
2.5.2.1	Les facteurs de choix.....	125
2.5.2.2	Les coûts.....	126
2.5.2.2.1	Les coûts d'investissement.....	126
2.5.2.2.2	Les coûts d'exploitation.....	126
2.5.2.2.3	Coûts du temps passé dans les transports en commun..	127
2.5.2.2.4	Coûts des nuisances dues aux transports en commun...	128
2.5.2.2.5	Coûts de la lutte contre le bruit des transports urbains...	129
2.5.2.3	Charges d'exploitation par habitant en euros.....	130



2.5.3	Les parts des TCSP dans les Pourcentage des Kilomètres Offerts des réseaux français.....	131
2.5.4	Les parts des TCSP dans les natures de voyage des réseaux français.....	132
2.5.5	La place des transports en commun dans le monde.....	133
2.5.6	Le financement des transports urbains.....	134
2.5.6.1	Provenance des moyens.....	134
2.5.6.2	Contribution des employeurs.....	135
2.5.6.3	Evolution des besoins de financement pour les transports en commun urbains .....	136
2.5.6.4	Comment financer l'évolution des besoins des transports en commun .....	137
2.5.6.5	Financement des transports en commun par contrat de partenariat public -privé .....	138
2.5.6.6	Financement des transports en commun par la loi du marché... ..	138
2.5.7	Le système de tarification.....	139
2.9.8	Modulation des tarifs des transports en commun selon des critères sociaux.....	140
2.5.8	Effets des transports en commun sur les impacts atmosphériques.....	140
2.5.8.1	Production de gaz à effet de serre.....	141
2.5.8.2	Moyen de réduction des émissions de gaz carbonique (CO <sub>2</sub> )....	142
2.5.8.3	Pollution par la circulation automobile en ville et sur la route.....	142
2.5.8.4	Evolution de la pollution de l'air en ville.....	143
2.5.8.5	Valorisation du Gaz Naturel .....	143
2.5.8.5.1	Présentation et avantages du GNV.....	144
2.5.8.5.2	Bref historique du GNV.....	144
2.5.8.5.3	Les autobus GNV.....	144
2.5.8.5.4	Sécurité.....	145
2.5.8.5.5	Les coûts.....	145
2.5.8.5.6	Les équipements nécessaires.....	145
2.5.8.5.7	Mélange GNV et hydrogène.....	146
2.5.8.5.8	L'accessibilité des transports en commun.....	146
2.5.8.5.9	Palette et emplacement(s) UFR.....	147
2.5.8.5.10	Aménagement intérieur des autobus.....	148
2.5.8.6	Présentation d'une étude économique et financière.....	149

2.5.8.6.1	Cas du Tramway.....	150
2.5.8.6.2	Cas du Métro automatique.....	151
2.5.8.6.3	Comparaison des 2 systèmes : le tramway et le métro automatique.....	152
2.5.8.6.3.1	Les coûts d'investissement.....	152
2.5.8.6.3.2	Les coûts d'exploitation.....	154
<b>Conclusion du chapitre 2.....</b>		<b>159</b>

## Liste des photos du chapitre 2

Photo 2-1 : Véhicule Tramway fer classique en France à St Louis Metrolink [SWC.II.1].....	88
Photo 2-2 : tramway de première génération, ancien PCC tram de Montréal [SWC.II.2].....	89
Photo 2-3 : TFS (Tramway Français Standard) 2030 de Grenoble [SWC.II.3].....	91
Photo 2-4 :Citadis à plancher bas (Low-Floor) Type 302 (Alstom, 2002) [SWC.II.4].....	99
Photo 2-5 : Aménagement accompagnant une ligne de tramway [SWC.II.5].....	105
Photo 2-6 : Rame du métro automatique OrlyVALsur viaduc [ART2.C.II].....	107
Photo 2-7 : Bus de type Agora3 [SWC.II 7].....	112
Photo 2-8 : Bus de type Scania [SWC.II 10].....	114
Photo 2-9: Trolleybus [SWC.II 9].....	115
Photo 2-10 : Tramway sur pneu le Translohr [ATE].....	120
Photo 2-11 : image d'un Bus Heuliez au Gaz Naturel [SWC.II 11].....	145
Photo 2-12 : Installations GNV à 2 modules de compression [SWC.II 12].....	146
Photo 2-13 : Accessibilité d'un Bus Renault Agora (Chambéry) (UFR) [SWC.II 13].....	147
Photo 2-14 : Structure d'un bus dotée d'une rampe d'accès rétractable [SWC.II 14].....	147
Photo 2-15 : Palette sortie actionnée par le conducteur progressivement. [SWC.II 15].....	148
Photo 2-16 : Emplacement spécifique réservé au fauteuil roulant [SWC.II 16].....	148
Photo 2-17 : Aménagement intérieur des autobus. [SWC.II 17].....	149

## Figures du chapitre 2

Figure 2-1 : Valeurs des débits horaires par sens des TC urbains en France [DSD <sup>1</sup> ]	123
Figure 2-2 : Valeurs minimales des intervalles de passage entre deux véhicules TC [DSD <sup>1</sup> ]	123
Figure 2-3 : Intervalles des vitesses commerciales des transports en commun urbains [DSD <sup>1</sup> ]	124
Figure 2-4 : Proportions des vols avec dans les TC [IAURIF <sup>1</sup> ], [IAURIF <sup>2</sup> ], [IAURIF <sup>3</sup> ]	125
Figure 2-5 : Variation des coûts d'investissement ([CER <sup>6</sup> ], [STIF <sup>1</sup> ], [CAB & al])	126
Figure 2-6 : Variation des coûts d'exploitation pour un véhicule des ([CER <sup>6</sup> ], [STIF <sup>1</sup> ], [CAB & al])	127
Figure 2-7 : Charges d'exploitation en euros par habitant en fonction du mode de TC [PAN]	130
Figure 2-8 : Parts des TCSP dans les PKO des réseaux français [PAN]	131
Figure 2-9 : Parts des TCSP dans la nature des voyages dans les réseaux français [PAN]	132
Figure 2-10 : Parts des TCSP dans la nature des voyages dans les réseaux français [PAN]	133
Figure 2-11 : Coûts de Génie Civil d'un Tramway selon le type de site [KUH <sup>1</sup> ], [KUH <sup>2</sup> & al], [KUH <sup>3</sup> & al], [PIER]	134
Figure 2-12 : Coûts de Génie Civil du Val selon le type de site [KUH <sup>1</sup> ], [KUH <sup>2</sup> & al], [KUH <sup>3</sup> & al], [PIER]	135
Figure 2-13 : Coûts d'investissement d'un Système Léger de Transport selon le type de site [KUH <sup>1</sup> ], [KUH <sup>2</sup> & al], [KUH <sup>3</sup> & al], [PIER], [GAR & al]	150
Figure 2-14 : Coûts d'investissement du VAL selon le type de site [KUH <sup>1</sup> ], [KUH <sup>2</sup> & al], [KUH <sup>3</sup> & al], [PIER], [GAR & al]	152
Figure 2-15 : Evolution des coûts d'exploitation du VAL de Lille depuis sa mise en service [KUH <sup>1</sup> ], [ETC], [BIJ], [CUD]	153
Figure 2-16 : Evolution des coûts d'exploitation du Tramway de Nantes depuis sa mise en service, [KUH <sup>1</sup> ], [ETC], [BIJ], [CUD], [KHU <sup>4</sup> ]	153
Figure 2-17 : Courbe de tendance moyenne mobile de l'évolution des coûts d'exploitation du Tramway de Nantes depuis sa mise en service, [KUH <sup>1</sup> ], [ETC], [BIJ], [CUD], [KHU <sup>4</sup> ]	155
Figure 2-18 : Diagramme de l'évolution des coûts d'exploitation du Tramway de Nantes depuis sa mise en service, [KUH <sup>1</sup> ], [ETC], [BIJ], [CUD], [KHU <sup>4</sup> ]	156
Figure 2-19 : Diagramme de la courbe de tendance moyenne mobile de l'évolution des coûts d'exploitation du Tramway de Nantes depuis sa mise en service, [KUH <sup>1</sup> ], [ETC], [BIJ], [CUD], [KHU <sup>4</sup> ]	157
Figure 2-20 : Diagramme de la courbe de fréquentation du réseau VAL de 1984 à 2000, [KUH <sup>1</sup> ], [KUH <sup>3</sup> ], [ETC], [BIJ], [CUD], [KHU <sup>4</sup> ], [YAN]	158
Figure 2-21 : Diagramme du budget d'exploitation du réseau VAL de Lille de 1994 à 2000 [KUH <sup>3</sup> ], [ETC], [BIJ], [CUD], [KHU <sup>4</sup> ], [YAN]	158

## Croquis du chapitre 2

Croquis 2-1 : Différents espaces à l'intérieur du Tramway Français Standard [SWC2.P1].....	92
Croquis 2-2 : Coupe d'une voiture du Tramway Français Standard (version Nantes) [SWC2.P2].....	93
Croquis 2-3 : Schéma standard d'un CITADIS [ATE].....	95
Croquis 2-4 -a : Coupe des voitures Citadis x01 (bogies Moteur et porteur) [SWC2.P4].....	98
Croquis 2-4 -b : Coupe des voitures Citadis x01 (bogies Moteur et porteur) [SWC2.P4].....	98
Croquis 2-5 : Coupe d'une voie de tramway [CER1].....	101
Croquis 2-6 : Principe de pose continue et discontinue [ITCS-C-T59].....	102
Croquis 2-7 : Coupe d'un rail Vignole [CER <sup>1</sup> ].....	104
Croquis 2-8 : Coupe d'un rail à gorge ou rail Broca [CER <sup>1</sup> ].....	104

## Tableaux du chapitre 2

Tableau 2-1 : Principales caractéristiques techniques des rames du Tramway Français Standard de Nantes [REV <sup>1</sup> ] page.....	94
Tableau 2-2 : Composition des rames Tramway de la gamme Citadis [REV <sup>1</sup> ].....	96
Tableau 2-3 : Caractéristiques générales des voitures Citadis [REV <sup>1</sup> ].....	97
Tableau 2-4 : Caractéristiques techniques du Citadis 302 de Bordeaux [REV <sup>2</sup> ].....	100
Tableau 2-5 : Caractéristiques techniques du VAL [REV <sup>3</sup> ].....	108
Tableau 2-6 : Caractéristiques générales de l'autobus de type Agora euro 3 court [REV <sup>4</sup> ].....	112
Tableau 2-7 : Caractéristiques générales d'autres types de bus [REV <sup>5</sup> ].....	114
Tableau 2-8 : Caractéristiques générales du Trolleybus [REV <sup>5</sup> ].....	118
Tableau 2-9 : Coûts d'exploitation du VAL [KUH <sup>1</sup> ], [ETC], [BIJ], [CUD].....	155
Tableau 2-10: Coûts d'exploitation du tramway [KUH <sup>1</sup> ], [ETC], [BIJ], [CUD], [KHU <sup>4</sup> ].....	156

## **2.1 Introduction**

Les transports en commun constituent l'une des composantes essentielles du fonctionnement d'une ville. En ce que concerne la réussite des activités commerciales, industrielles, sociales, de loisirs, culturelles et touristiques est basée sur des échanges rendus possibles grâce aux transports en commun, et en particulier aux transports en commun. Mais leur réalisation nécessite la construction d'infrastructures et des investissements importants ainsi qu'un entretien permanent. Afin de bien évaluer leur impact global, nous présentons dans ce chapitre les aspects infrastructures et matériels comme composantes principales des transports en commun. Mais nous donnons avant cela, la définition des transports en commun en site propre, leur rôle, leur impact contextuel aussi bien pour les sites desservis que pour la ville elle-même.

## **2.2 Définition des transports en commun en site propre**

Se dit d'un ensemble de réseaux de transport ou ensemble de lignes d'infrastructures viaires reliant plusieurs points de la ville, des matériels roulants associés et des systèmes d'aide à l'exploitation permettant d'informer les usagers et de faciliter la conduite. Lorsque ces opérations sont réalisées par barreaux complets de plusieurs kilomètres, ils sont appelés Transport en Commun en Site Propre (TCSP). De ce fait, ils se distinguent des aménagements ponctuels de carrefours ou de voirie de type «voie réservée» destinés à apporter une amélioration locale avec un objectif principal, sinon exclusif, d'accroître la vitesse commerciale. Leur durée de vie dépend de leur typologie, de la fréquence d'entretien et des conditions d'exploitation auxquelles ils sont soumis. Chacun d'eux présente des performances techniques spécifiques qui le différencient des autres.

### **2.2.1 Rôle des transports en commun en site propre**

Le rôle des TCSP est de réduire les écarts entre les quartiers de périphérie et le cœur de l'agglomération de façon fiable. Ils permettent d'insérer dans le jeu urbain les quartiers qui semblent a priori en être exclus en engageant les processus de transformations socio spatiale de l'agglomération. Les TCSP permettent également de façon précise de répondre aux interrogations suivantes : comment le transport peut-il contribuer à désenclaver les quartiers ? Quels territoires et donc quels niveaux décisionnels doivent être impliqués ? Quelles liaisons physiques et connexions sont souhaitables ? **[BOUR]**

### **2.2.2 Impact contextuel actuel des transports en commun en site propre**

Localement, les quartiers reliés par les TCSP ne sont pas tous identiques et leur impact varie assez fortement d'un quartier à l'autre. Le manque de recul dans ce domaine justifie l'intérêt de faire une analyse qui tienne compte d'un certain nombre de paramètres. Pour conduire cette analyse paramétrique, nous abordons progressivement au chapitre 3 l'attractivité des TCSP, leur contribution à la vie des habitants, les logiques de décision, leur utilisation , puis quelques cas illustratifs rencontrés en France et à l'étranger **[ANN]**.

### **2.2.2.1 Impact pour les sites desservis**

Les TCSP exercent en plus de leur fonction première qui consiste à favoriser l'emploi des transports en commun de préférence à la voiture une attractivité pour les sites desservis, qui peut se mesurer par leur impact sur la représentation du quartier dans la ville et la façon dont ils peuvent favoriser l'image du quartier et contribuer à la création d'une nouvelle géographie des territoires ; la conséquence de leur présence sur l'attractivité des sites (attractivité résidentielle et valeur ajoutée dans la desserte et l'implantation de commerces, d'équipements, de services ou d'activités économiques) ; puis la valorisation du site à la suite de l'implantation d'un TCSP, concernant les espaces et l'organisation spatiale [ANN].

### **2.2.2.2 Impact pour la ville**

La ville est souvent perçue comme morcelée en plusieurs quartiers représentant chacun un morceau de ville intégré au reste dans un fonctionnement global complexe. Les TCSP contribuent à l'intégration des quartiers même les plus éloignés et permettent de raccourcir les distances et surtout les temps en assurant physiquement une liaison de qualité avec le centre ville et les autres quartiers. De toute façon l'habitant de la ville ne trouve plus aujourd'hui la satisfaction de la totalité de ses fonctions et besoins dans son quartier. Pour sa satisfaction il est nécessaire d'avoir un bon niveau de service, correspondant à une capacité plus grande, une régularité et des cadencements synonymes de repères plus aisés dans le temps, une desserte fiable et une sécurité accrue [ANN].

## **2.3 Eléments constitutifs des transports en commun en site propre.**

Les transports en commun en site propre sont principalement constitués de trois ensembles : les installations fixes (qui se composent des infrastructures viaires, des équipements divers), les parcs d'entretien et de maintenance, et les matériels roulants.

### **2.3.1 Les infrastructures viaires et équipements**

Elles se repartissent en deux sous-ensembles : les tronçons de voie et les stations. Une illustration de ces deux sous-ensembles sera donnée plus loin quelque mode de TCSP. Les équipements divers concernent les systèmes d'aide à l'exploitation et à la conduite, mais ne seront pas étudiés dans notre travail de thèse.

### **2.3.2 Les parcs d'entretien et de maintenance**

On les appelle également garages parce qu'ils servent au stockage des matériels roulants. Ils comprennent souvent également des ateliers d'entretien et de réparation et des postes de régulation et de gestion des matériels roulants. Ils se trouvent en général en bout de ligne. Leur coût d'investissement est loin d'être négligeable.

### **2.3.3 Les matériels roulants**

Ils constituent l'ensemble des véhicules de transport en commun. La nature des véhicules ainsi que leurs principales caractéristiques varient en fonction de chaque mode. Dans ce qui suit, nous présentons une classification de ces différents modes selon qu'il soit guidé ou non.

## **2.4 Classification des transports en commun en site propre**

Les transports en commun en site propre peuvent être classés selon deux facteurs : leur technique de guidage et la fonction qu'ils assurent.

### **2.4.1 Classification selon la technique de guidage**

Suivant la technique de guidage, les transports en commun urbains en site propre se repartissent en deux modes :



- pour le mode guidé, on distingue : le Tramway fer, le Métro, le Tramway sur pneus, le Tram - train et le Train - tram, le bus guidé,
- pour le mode non guidé, on distingue : le Trolleybus (l'autobus électrique), l'autobus classique.

## **2.4.2 Classification selon la fonction**

Suivant la fonction qu'ils assurent, les transports en commun en site propre sont utilisés pour le :

- Transport urbain : Tramway fer, Métro, Tramway sur pneus, bus guidé, autobus
- Transport interurbain : Tram - train, Train - tram, autocar

En combinant les deux éléments de classification ci-dessus, on retiendra les transports en commun en site propre suivants : le Tramway fer, les différents types de Métro, le Tramway sur pneus, le bus guidé. Dans ce qui suit, nous présentons leurs infrastructures (voiries), les matériels roulants et leurs performances techniques selon le mode de guidage.

## **2.4.3 Transports en commun en site propre en mode guidé**

On distingue dans cette catégorie, deux types : les transports sur rail parmi lesquels on trouve les tramways fer et les métros lourds, puis les transports sur pneumatiques que sont les métros automatiques et le tramway sur pneus.

De manière simplifiée, il est possible de regrouper les éléments des transport en commun en site propre en trois sous-ensembles : La voire, le matériel roulant et le système d'alimentation. Ce dernier ne sera pas développé.

### **2.4.3.1 Transports en commun en site propre en mode guidé sur rails**

#### **2.4.3.1.1 Cas du tramway fer**

##### **2.4.3.1.1.1 Définition**

Le Tramway fer est un moyen de transport en commun urbain constitué de rames, circulant sur des voies ferrées équipées de rails plats (alors que ceux des trains sont légèrement inclinés

vers l'intérieur de la voie). Ces voies sont implantées soit en site propre, en site mixte ou en site partagé. Il assure un transport de surface, un guidage intégral, le plus souvent une circulation bidirectionnelle c'est-à-dire avec un poste de conduite à chaque extrémité du véhicule, et une traction électrique. Il intègre la conduite à vue sur un site franchissable et lorsqu'il passe en site propre intégral (le plus souvent souterrain), le tramway devient un **métro léger** (concept appliqué dans plusieurs pays mais peu pratiqué en France, à l'exception du « metrobus » de Rouen).

#### 2.4.3.1.1.2 Le véhicule

Le tramway fer a connu une évolution historique qu'on classe en trois générations. La conception des tramways vécut une révolution au cours des années 1930 quand, en 1931, une conférence réunissant plusieurs présidents de compagnies de tramways américaines, le *Electric Railway Presidents Conference Committee*, élaborera les spécifications du tramway PCC dont le but était d'offrir aux voyageurs un moyen de transport confortable susceptible de les détourner de l'automobile.



Photo 2-1 : Véhicule Tramway fer classique lors de son retour en France à St Louis Metrolink [SWC.II.1]

### 2.4.3.1.2 Typologie des tramways

#### 2.4.3.1.2.1 Tramways de première génération PCC

Elle apparaît après la Seconde Guerre mondiale en Europe de l'Ouest (Bruges et Nivelles, en Belgique) et de l'Est (Tatra en Tchécoslovaquie et Konstal en Pologne). Lors du démantèlement de certains réseaux nord-américains, des véhicules furent vendus à des réseaux européens. Si l'on compte le nombre de véhicules construits, sans forcément garder l'esthétique américaine mais en gardant le principe mécanique, les PCC restent les tramways les plus produits dans le monde.



Photo 2-2 : tramway de première génération, ancien PCC tram de Montréal [SWC.II.2]

##### 2.4.3.1.2.1.1 Les performances techniques

Elles se déclinent généralement par le mode de propulsion et le mode de freinage.

###### 2.4.3.1.2.1.1.1 La propulsion

Le tram PCC offrait un système de propulsion graduel. La conduite se faisait à l'aide de pédales. En fonction de la position de la pédale de traction, une plus ou moins grande quantité de courant est envoyée dans le 'moteur pilote'. Celui-ci positionne un contact à l'endroit désiré d'un gradateur à plot multiple, offrant une centaine de crans de traction. Ce gradateur est appelé *accelerator* ou contrôleur. Il est à noter que dans une PCC, les 4 moteurs sont tout le temps câblés en *série parallèle*. Bien que réputés pour être de grands consommateurs de courant électrique, les PCC ont des accélérations puissantes et progressives. Par contre, les tramways de l'époque antérieure étaient électriquement construits d'une toute autre manière : conduite aux manettes avec généralement 3 sortes de couplage de moteurs et pour chaque couplage 3 ou 4 crans de vitesse.

#### **2.4.3.1.2.1.1.2 Le freinage**

Le système de freinage d'une PCC pouvait être également tout-électrique, ce qui avait l'avantage d'éliminer le compresseur. Les freins sont des freins à patins appliqués directement sur la voie, ce qui permet d'éliminer une source importante d'usure des tables de roulement des roues. Pour les PCC qui décidaient de garder l'air comprimé, le compresseur était beaucoup plus petit qu'un compresseur classique, car il fonctionnait en permanence, plutôt que lorsque requis.

#### **2.4.3.1.2.1.1.3 Le frein rhéostatique**

Ce freinage est fonctionnel au-dessus de 4 km/h. Il consiste à dissiper l'énergie mécanique produite par le déplacement de la voiture en courant absorbé dans les résistances de freinage de l'accélérateur. Les moteurs sont des machines fonctionnant en courant continu. Ces machines sont réversibles selon la forme d'énergie qu'on leur fournit : énergie électrique = moteur, énergie mécanique = dynamo. Ce freinage n'existe donc que tant que les roues tournent, il convient donc dans certains cas de sabler. Le B.C.S. (boîtier de commande statique) influence le moteur pilote, ce dernier fait varier le rhéostat qui régule la traction et le freinage rhéostatique. Lorsque la vitesse est fortement réduite (inférieure à 4 km/h), le freinage rhéostatique devient inefficace ; à ce moment, un dispositif automatique remplace le freinage rhéostatique par un freinage sur transmission.

#### **2.4.3.1.2.1.1.4 Les freins sur transmissions**

Ce frein est constitué d'un tambour avec mâchoires. Le tambour est monté directement sur l'arbre de transmission. Les mâchoires sont commandées par un dispositif électromécanique appelé « actuator » Celui-ci est composé d'une bobine qui, quand elle est alimentée en tension, devient un électroaimant. Cet électroaimant avale un noyau en acier qui en se déplaçant vers le centre de la bobine comprime un ressort, l'actuator, qui entre en travail. C'est ce déplacement du noyau qui, par le biais de la tringle qui le prolonge, va écarter les garnitures qui étaient appliquées sur le tambour. Quand la tension est supprimée, le ressort est libéré et le noyau avec la tringle reprennent leur position normale. Les garnitures s'appliquent alors sur le tambour, le

frein est donc appliqué, l'actuator est au repos. Ce frein sur transmission est également utilisé comme frein de stationnement.

#### 2.4.3.1.2.2 Tramway de deuxième génération (le TFS)

Il apparaît dans les années 80 comme le tramway de référence en France. Les rames du TFS forment des ensembles indéformables, d'une longueur de 29,40 m pour 44,2 t. Elles ne peuvent pas circuler en unités multiples; néanmoins, en cas de force majeure (par exemple pour rapatrier une rame avariée au dépôt), deux rames peuvent être reliées au moyen d'un attelage de secours, constitué d'une barre d'attelage et d'un câble électrique. Dans ce cas, compte tenu des capacités de freinage notablement diminuées de l'ensemble, la vitesse d'acheminement est limitée, pour la RATP, à 10 km/h.

Conçu et construit par Alsthom (l'actuelle *Alstom*) en 1986, il a été produit à plus de 150 exemplaires, et est emblématique du grand retour du tramway en France entamé au milieu des années 1980. Après son premier succès à Nantes (la première agglomération en France à se lancer dans la reconstruction de lignes de tramways, au début des années 1980), à Grenoble, puis à Paris (où la RATP l'a retenu pour ses lignes T1, puis T2 à ses débuts). Le TFS paraissait

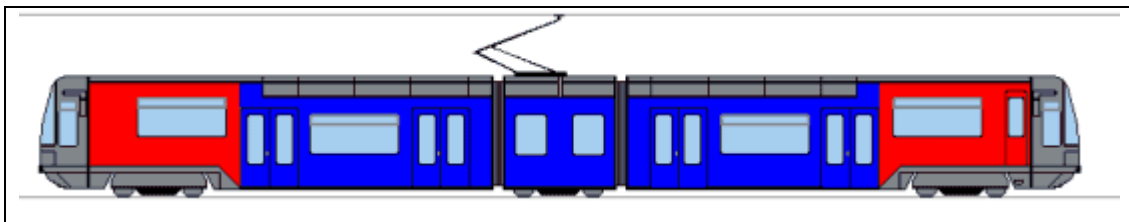


destiné à équiper l'ensemble des villes françaises où se recréait un réseau de tramway jusqu'à ce qu'un accident à Strasbourg ait mis un coup d'arrêt brutal à sa commercialisation. Aujourd'hui, il est remplacé, à la fois au catalogue d'Alstom et dans la plupart des nouvelles métropoles converties au tramway, par la gamme Citadis (troisième génération) **[BIG]**.

**Photo 2-3 : TFS (Tramway Français Standard) 2030 de Grenoble, photo de Herman R. Silbiger 5/11/2002, [SWC.II. 3].**

#### 2.4.3.1.2.2.1 Les caisses

La rame est composée de deux caisses en acier de 2,3 mètres de large jointes par une nacelle centrale sur laquelle se trouve implanté l'unique pantographe et un bogie tracteur surbaissé. Seule la partie centrale du plancher voyageur des deux caisses est surbaissée à 34,5 cm pour permettre un accès de plein pied avec les quais, permettant ainsi l'accès aux PMR (Personnes à Mobilité Réduite) et des échanges rapides de voyageurs grâce aux 4 portes latérales. Les compartiments extrêmes sont surélevés au dessus des bogies moteurs à 87,5 cm et nécessitent l'emprunt d'un (court) escalier intérieur de trois marches.



**Croquis 2-1 : Disposition des différents espaces à l'intérieur du Tramway Français Standard [SWC2.P1]**

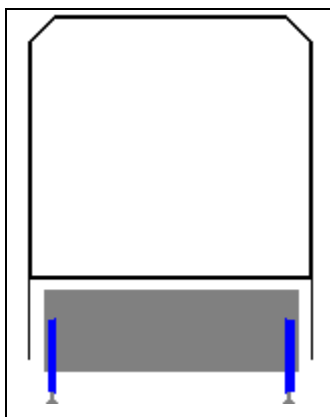
Les différents « espaces » à bord du TFS sont définis selon la légende suivante :

- Accès, espaces urbains et accessibles aux personnes à mobilité réduite
- Espaces « suburbains »
- Compartiments techniques

Cette disposition permet à chaque élément d'offrir une capacité de 174 passagers (dont 60 assis) même si le succès des lignes RATP a tendu à faire monter ce chiffre vers 250 passagers, ce qui est le maximum admissible dans des conditions de confort très relatives. [DID<sup>1</sup>].

#### 2.4.3.1.2.2.2 La motorisation

Les deux bogies moteurs sont dotés chacun d'un moteur à courant continu de 275 kW alimentés par l'intermédiaire d'une électronique de puissance. Cette motorisation permet de fortes accélérations parfaitement adaptées à une ligne de tramway (arrêts fréquents, vitesse maximale de 70 km/h, y compris en milieu urbain) [DID<sup>2</sup>].



**Croquis 2-2 : Coupe d'une voiture du Tramway Français Standard (version Nantes) [SWC2.P2]**

#### **2.4.3.1.2.2.3 La conduite**

Le machiniste est l'unique agent de bord et n'est pas receveur. Cependant il est chargé de la fermeture des portes à l'image des réseaux urbains et des RER qui ne disposent plus de chefs de trains depuis les années 80. La conduite est centrale et assistée par électronique par l'intermédiaire d'un manipulateur de traction freinage unique. Un ensemble d'éléments de communication sol-rame complètent ce dispositif (boîtier ICS, infrarouge SAM, Radio) et notamment la commande embarquée des aiguilles [DID<sup>2</sup>].

#### **2.4.3.1.2.2.4 Equipements commerciaux**

Les rames RATP disposent de 54 places assises auxquelles il convient d'ajouter 4 strapontins ; du SIEL bus et de composteurs magnétiques embarqués [DID<sup>2</sup>].

#### **2.4.3.1.2.2.5 La décoration extérieure**

La décoration extérieure (ou «livrée») des TFS était dérivée des rames grenobloises, mais la RATP a souhaité appliquer aux rames du tramway la même livrée que l'ensemble de son parc. C'est ainsi que les rames de la seconde commande furent livrées en blanc et vert et que le reliquat sera modifié lors des passages en atelier [DID<sup>3</sup>].

<b>Caractéristiques générales</b>	
Longueur hors tout	39.150 m
Largeur de caisse	2.300 m
Hauteur maximale au-dessus du rail	3.250 m
Hauteur du plancher au-dessus du rail	Motrices : 870 mm Caisse centrale : 350 mm
Hauteur des accès au-dessus du rail	350 mm
Entre-axe des pivots de bogies	10.650 m
Masse à vide en ordre de marche	51 960 kg
Masse en charge normale	68 480 kg
Masse en charge exceptionnelle	74 150 kg
Nombre de bogies moteurs	2
Nombre de bogies porteurs	2
Mode de traction	Electrique
<b>Diagramme</b>	
Alimentation électrique	750 V continu
Capacité	74 places assises, capacité maximale (assis+debout) en charge normale (4 pass/m <sup>2</sup> ) : 236 passagers, en charge maximale (6 pass/m <sup>2</sup> ) : 317 passagers
<b>Caractéristiques mécaniques</b>	
<b>Traction</b>	
Vitesse maximale	70 km/h
Puissance maximale à la jante en traction	550 kW
Accélération moyenne de 0 à 40 km/h en charge normale et en palier	0.83 m/s <sup>2</sup>
Accélération moyenne de 0 à 70 km/h en charge normale et en palier	0.60 m/s <sup>2</sup>
Accélération résiduelle à 70 km/h en charge normale et en palier	0.27 m/s <sup>2</sup>
<b>Freinage</b>	
Décélération moyenne en freinage	1.35 m/s <sup>2</sup>

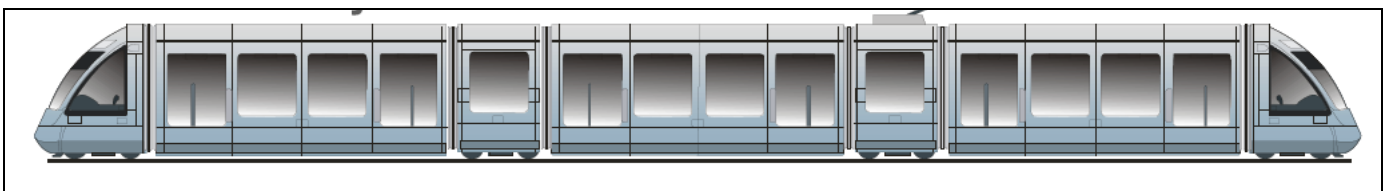


maximal de service en charge normale et en palier	
Décélération moyenne en freinage d'urgence en charge normale et en palier	2.70 m/s <sup>2</sup>
Décélération moyenne en freinage de sécurité en charge normale et en palier	1.65 m/s <sup>2</sup>

**Tableau 2-1 : Principales caractéristiques techniques des rames du Tramway Français Standard de Nantes [REV<sup>1</sup>]**

### 2.4.3.1.2.3 La troisième génération de tramway : le Citadis

C'est un modèle de tramway à plancher bas produit par Alstom, à Aytré, près de La Rochelle depuis 2000. Il a commencé à être commercialisé à Montpellier et à Orléans. Outre le plancher bas, les Citadis disposent de plus de places assises et d'une plus large vision sur l'extérieur. Le concept du Citadis permet, à partir de modules standardisés, de produire des tramways différents pour chaque réseau client, notamment en utilisant une face avant au design personnalisé. Mais de fortes contraintes techniques de résistance ont été imposées par l'adoption d'un attelage automatique qui permet depuis septembre 2004, de faire circuler les rames Citadis en duo [INR].

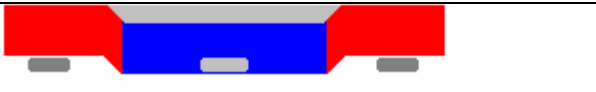






**Croquis 2-3 : Schéma standard d'un CITADIS [ATE]**

#### 2.4.3.1.2.3.1 La gamme Citadis

La gamme Citadis comprend un modèle de base auquel on peut adjoindre différentes options. Deux éléments de "chassis type" ont été élaborés pour cette gamme, le premier à plancher mi-bas (héritage du TFS), le second à plancher bas intégral sachant qu'une rame peut mixer les

deux modèles. De plus, en raison de la modularité il est très simple de modifier la composition des rames en combinant des caisses et des nacelles afin d'obtenir la composition souhaitée. L'électronique de puissance est une version de la gamme "ONIX" (à base d'IGBT) utilisée sur les éléments **Z2N 20900** et sur les **TER 2N**, les boggies "Arpège" sont commun à toute la gamme Citadis, l'informatique "Agate" dérive des systèmes déjà en service dont le **MP 89**, ... Enfin le design est partiellement laissé au choix du client final puisque le nez sera l'élément de personnalisation du réseau. Le modèle "301" est en fait le successeur du TFS puisqu'il est directement inspiré des ultimes rames livrées à Grenoble ou à St Etienne **[DID<sup>4</sup>]**.

Modèle	Plancher	Longueur	Typologie	Composition	Schéma
301	Bas partiel	30 m	Tramway urbain	C-N-C	
401	Bas partiel	40 m	Tramway urbain	C-N-C-N-C	
302	Bas intégral	30 m	Tramway urbain	C-C-N-C-C C-N-C-N-C	
402	Bas partiel	40 m	Tramway urbain	C-C-N-C-N-C- C	
500	Mis partiel	40 m	Tramway urbain	C-N-C	
<b>C</b> :Caisse <b>N</b> : Nacelle					

**Tableau 2-2 : Composition des rames Tramway de la gamme Citadis [REV<sup>1</sup>] et Croquis 2-4 : Composition des différentes rames de Tramway de la gamme CITADIS [ATE]**

#### 2.4.3.1.2.3.2 Le Citadis 302

La version 302 est un tramway urbain de 30 m à plancher bas intégral (0,35 m du rail) de 30 m de long. Le nez et les aménagements intérieurs sont laissés au choix du client. Les caisses sont modulaires et intégralement modifiables sur catalogue. La largeur est ainsi de 2,40 mètres pour les rames Citadis 302 de la ligne T2 et de 2,65 mètres pour les Citadis 402 de la ligne T3 (TMS). La longueur est également variable puisqu'on fonctionne sur la base d'éléments

interchangeables : les différentes combinaisons entre nacelles, remorques et motrices permettent d'envisager toutes les options avec la faculté de modifier les rames durant leur service [DID<sup>4</sup>].

<b>Caractéristiques générales des voitures Citadis</b>		
<b>Typologie de Citadis</b>	<b>Citadis 302</b>	<b>Citadis 402</b>
Composition des rames	M-Ns-Np-Ns-M	
Longueur des rames	32,70 m	40,97 m
Largueur des rames	2,40 m	2,65 m
Puissance (kW)	480 kW	720 kW

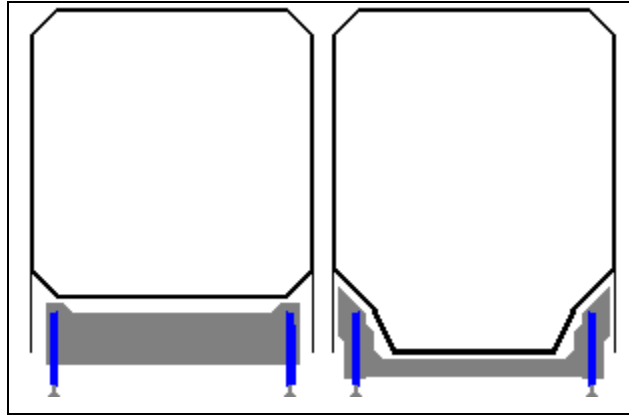
**Tableau 2-3 : Caractéristiques générales des voitures Citadis [REV<sup>1</sup>]**

Le nez est également une option importante pour l'exploitant puisqu'en dehors de la livrée extérieure et des aménagements commerciaux c'est le seul élément de personnalisation. Ainsi le nez version RATP se distingue fortement des rames lyonnaises, montpelliéraines ou autres. Les caisses sont en aluminium ce qui permet d'alléger la structure tout en conservant une bonne résistance et une faculté de maximiser les baies vitrées contribuant ainsi à donner une impression d'espace pour le voyageur. Les châssis sont mixtes acier/aluminium et les liaisons entre espaces voyageurs se font par l'intermédiaire d'intercirculations étanches dérivées des éléments **Z2** et repris récemment sur les **Z2N 20900** [DID<sup>4</sup>].

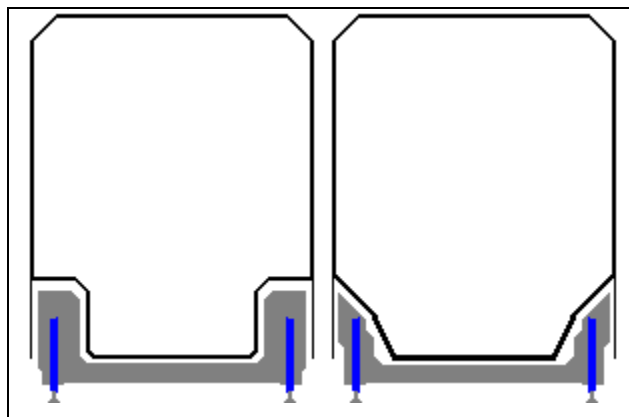
#### **2.4.3.1.2.3.3 Motorisation**

La principale contrainte des rames à plancher bas est de dégager les espaces sous les caisses afin de permettre un accès des voyageurs de plein pied. Sur le TFS, le plancher bas est partiel ce qui permet de faire appel à des bogies moteurs classiques aux extrémités. Les rames Citadis étant à plancher bas *intégral* posent la contrainte d'éviter le cœur de l'ensemble des bogies, contrairement au TFS de Nantes qui ne faisait appel qu'à des bogies classiques (porteur et moteurs). Les bogies porteurs ont donc du être revus. Les progrès dans les matériaux et la motorisation ont permis d'implanter deux moteurs de 120 kW par boggie. Celui ci est construit sur un châssis cadre en acier avec un report d'extrémité des axes des disques de freinage et un

placement judicieux des moteurs de traction. La motorisation est utilisable en traction mais également en freinage à récupération ou rhéostatique. L'ensemble est alimenté en 400 V par les équipements de toiture [DID<sup>4</sup>].



**Croquis 2-4 - a : Coupe des voitures Citadis x01 (bogies Moteur et porteur) [SWC2.P4]**



**Croquis 2-4 - b : Coupe des Citadis x02 (bogies Moteur et porteur) [SWC2.P5]**

Il n'y a donc plus d'essieux sur les rames Citadis mais des axes latéraux comprenant une roue et les éléments de freinage auquel s'ajoutent des équipements de traction sur les bogies moteurs : cette invention est baptisée du nom d'Arpège dans la gamme commerciale d'Alstom. Ici aussi la modularité prime et la même gamme de bogie est utilisée sur l'ensemble des rames Citadis dans le monde.

#### 2.4.3.1.2.3.4 Performances techniques

Les véhicules de la gamme Citadis sont en général dotés de plusieurs moteurs (4 moteurs) de 140 kW et peuvent atteindre en 100 m les 50 km/h, avec une accélération maximale de l'ordre de 1.3 m/s<sup>2</sup>. Leur vitesse de pointe tourne autour de 77 km/h avec homologation des rames à 70 km/h. Le Citadis est aussi plus léger qu'un TFS, grâce à l'adoption de l'aluminium, mais avec une capacité de résistance supérieure. Diverses options peuvent être choisies, dont la climatisation des espaces voyageurs. La motorisation est de type asynchrone, avec commande par onduleurs à IGBT. Le freinage combine frein électrodynamique, frein à disque à actuation électrohydraulique et patins magnétiques. La vitesse maximale de circulation est comprise, selon les réseaux, entre 50 et 80 km/h (tous les véhicules étant conçus d'origine pour cette dernière vitesse) [INR].

#### 2.4.3.1.2.3.5 Le véhicule du Citadis

Il s'agit d'un véhicule modulaire pouvant aller de 20 à 50 m, la largeur pouvant varier de 2,32 à 2,65 m. Les clients ont le choix entre un véhicule à plancher mixte (le plancher est bas sur environ 70% de la longueur avec bosses subsistant au droit des bogies d'extrémités) ou un véhicule à plancher bas intégral (le plancher est à la même hauteur sur toute la longueur du véhicule, et au même niveau que la partie basse des véhicules à plancher mixte). Mais ils ont également le choix de la livrée extérieure, de la forme du bout avant et du design intérieur (couleurs, types et forme des sièges). La coloration intérieure des véhicules Citadis contraste avec celle des rames du TFS et l'esthétique est originale. En cabine, les Citadis de la Ratp à



Paris présentent une particularité : le manipulateur traction- freinage linéaire a cédé la place à un modèle rotatif, comme sur les Eurotram de Strasbourg. Les tableaux ci-dessous donnent les caractéristiques quatre types de Citadis : les types 301, 302, 401, 402 [CUB].

**Photo 2-4 :Citadis à plancher bas (Low-Floor) Type 302 (Alstom, 2002) 2244 de Bordeaux, photo de Jean-Pierre Vergez 3/26/2006, [SWC.II.4]**

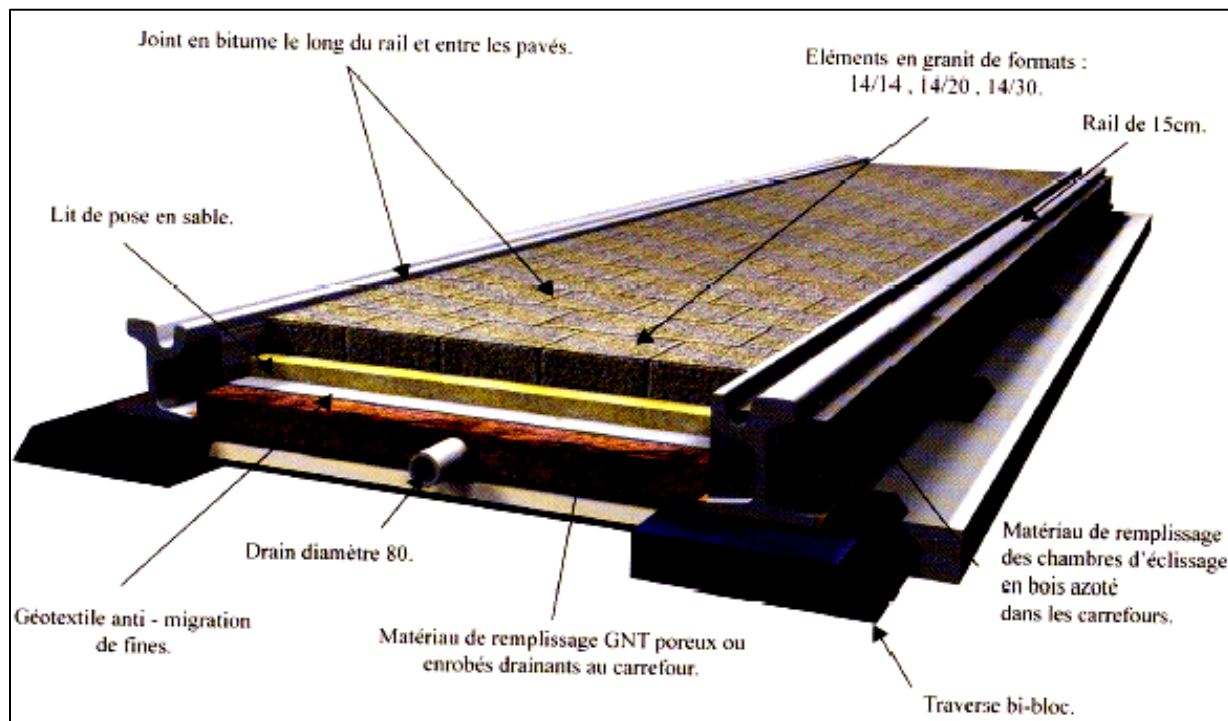
<b>Caractéristiques générales</b>	
Longueur hors tout	32.850 m
Largeur de caisse	2.400 m
Hauteur maximale au-dessus du rail	3.270 m
Hauteur du plancher au-dessus du rail	350 mm
Hauteur des accès au-dessus du rail	320 mm
Entre-axe des pivots de bogies	11.143 m
Masse à vide en ordre de marche	41 340 kg
Masse en charge normale	56 610 kg
Masse en charge exceptionnelle	62 565 kg
Nombre de bogies moteurs	2
Nombre de bogies porteurs	1
Alimentation électrique	750 V continu
<b>Diagramme</b>	
Capacité	64 places assises (48 fixes et 16 à assise relevable). Capacité maximale (assis+debout) en charge normale (4 pass/m <sup>2</sup> ) : 170 passagers et en charge maximale (6 pass/m <sup>2</sup> ) : 255 passagers
<b>Caractéristiques mécaniques</b>	
<b>Traction</b>	
Vitesse maximale	60 km/h
Puissance maximale à la jante en traction	692 kW
Accélération moyenne de 0 à 40 km/h en charge normale et en palier	1.10 m/s <sup>2</sup>
Accélération moyenne de 0 à 60 km/h en charge normale et en palier	0.86 m/s <sup>2</sup>
Accélération résiduelle à 60 km/h en charge normale et en palier	0.40 m/s <sup>2</sup>
<b>Freinage</b>	
Décélération moyenne en freinage maximal de service en charge normale et en palier	1.50 m/s <sup>2</sup>

Décélération moyenne en freinage d'urgence en charge normale et en palier	2.85 m/s <sup>2</sup>
Décélération moyenne en freinage de sécurité en charge normale et en palier	1.80 m/s <sup>2</sup>

**Tableau 2-4 : Caractéristiques techniques du Citadis 302 de Bordeaux [REV<sup>2</sup>] :**

#### 2.4.3.1.2.4 La voie

La voie du tramway fer comporte deux sous-ensembles : la plate-forme en béton et les rails reliés à un support. Sur la plate-forme sont disposés des matériaux de remplissage couverts d'un revêtement soit en gazon, en pavés, en grave bitume, ou en enrobé...). La voie est identifiée par son système de pose, et la variation de la liaison rail support permet d'obtenir différents types de pose : pose continue et pose discontinue [CER<sup>1</sup>].



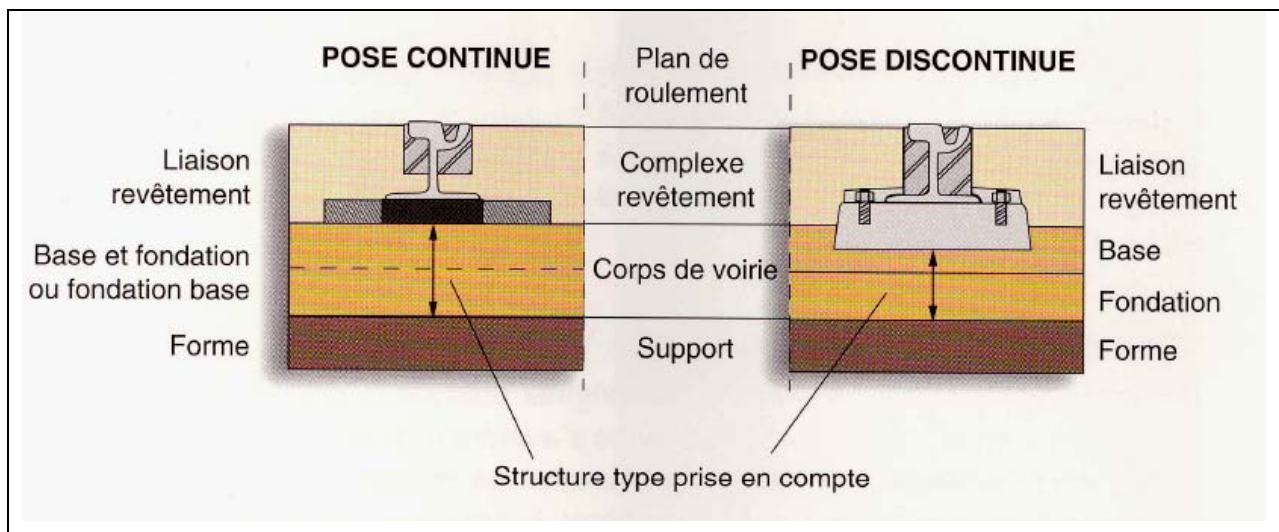
**Croquis 2-5 : Coupe d'une voie de tramway avec éléments modulaires de 8 cm d'épaisseur avec un revêtement en pavés de granit) [CER1].**

#### 2.4.3.1.2.4.1 La pose continue

C'est une pose sur semelle continue, ou ancrée sur dalle. Dans cette pose, le rail est fixé grâce à une selle en acier ou en béton de résine. Pour assurer un bon fonctionnement de la plate-forme, la dalle doit disposer d'un gabarit de pose. La plate-forme a une faible épaisseur et amortit peu les vibrations. Elle se place généralement à plus de 12 m des façades des bâtiments [CER<sup>1</sup>].

#### 2.4.3.1.2.4.2 La pose discontinue

Elle peut être sur traverse bi bloc ou monobloc autrement appelée pose sur ballast ou sur selles métalliques ancrées. Dans cette pose, le rail est maintenu sur la traverse par des systèmes de fixation propre à chaque fabricant ou réseau, selon que la traverse est en bois, en métal ou en béton monobloc ou bi bloc [CER<sup>1</sup>].



**Croquis 2-6 : Principe de pose continue et discontinue [Les infrastructures de transports collectifs de surface [Collection Technique Cimbéton T59]**

#### 2.4.3.1.2.4.3 Qualités techniques d'une voie de tramway fer

Pour avoir les meilleures qualités techniques, on demande à la voie d'un tramway fer :



- d'être à même de répondre aux exigences du matériel roulant, en lui assurant les meilleures conditions de roulement, de confort et de sécurité ;
- de s'adapter aux exigences de l'insertion des modes de transports en commun dans leur milieu et leur environnement;
- de permettre la création de paysages urbains de qualité et, plus généralement une requalification des espaces ;
- de répondre aux contraintes économiques de l'exploitation : entretien minimum, maintenance et changement de rails ne nécessitant qu'un minimum d'arrêt d'exploitation [CER<sup>1</sup>].

#### **2.4.3.1.2.4.4 Fonction technique de la plate-forme**

Au-delà de recevoir les rails, sa vocation essentielle est de réduire les efforts verticaux sur le sol support à des limites acceptables. De plus, elle doit reprendre les efforts dynamiques latéraux générés par le passage des rames et de participer également à la dispersion des vibrations. A l'origine, les plates-formes étaient en ballast d'épaisseur plus ou moins importante, en fonction du sol rencontré et des efforts engendrés par la circulation des matériels roulants.

Actuellement les plates-formes des transports en communs en mode guidé sur rails genre tramway fer sont dimensionnées pour une portance de sol support préalablement déterminée, puis réalisées en béton dosé entre 200 et 350 kg/m<sup>3</sup> de ciment. Elles sont coulées et compactées ou posées sur un tapis anti-vibratile, reposant lui-même sur un béton de propreté dans le cas des dalles flottantes [CER<sup>1</sup>].

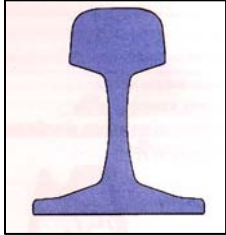
#### **2.4.3.1.2.4.5 Fonction technique du rail**

Il assure deux fonctions principales : le support et le guidage du matériel roulant ainsi que le transport des courants de retour de traction vers la sous-station. Les rails des voies ferrées ont un écartement standard HO de 1435mm et sont en acier. Il convient de signaler parfois la présence de lignes à écartement métrique (Mongy lillois). Sur les plates-formes des transports en commun, on rencontre généralement deux profils de rails [CER<sup>1</sup>].

### 2.4.3.1.2.5 Typologie de rail

#### 2.4.3.1.2.5.1 Le rail Vignole

C'est le profil de rail standard en chemin de fer, utilisé par la SNCF entre autres. Il est utilisé pour le tram-train, train-tram et localement pour le tramway sur les sections à pose sur ballast. Il est caractérisé par sa forme symétrique, ainsi que par sa base élargie (ou patin) qui facilite la



fixation du rail sur la traverse. La caractéristique mécanique principale du rail Vignole pour le renvoi de charge est son inertie verticale. Celle-ci dépendant de la masse du rail et de sa hauteur, les différentes catégories de rail Vignole sont caractérisées en France par leur masse linéaire [CER<sup>1</sup>].

Croquis 2-7 : Coupe d'un rail Vignole [CER<sup>1</sup>]

#### 2.4.3.1.2.5.2 Le rail à gorge ou rail Broca

Ce rail comprend une bavette faisant office de contre-rail permettant à celui-ci d'être posé en site urbain multimodal sans gêner la circulation routière. Les rails sont livrés sur le chantier en



longueur de 18 m et sont alors soudés ou éclissés bout à bout sur le site. Par ailleurs, ils peuvent subir des traitements thermiques permettant de modifier leur résistance aux frottements et de réduire entre autres les crissements dus aux contacts rail - roue, notamment dans les courbes de faible rayon [CER<sup>1</sup>].

Croquis 2-8 : Coupe d'un rail à gorge ou rail Broca [CER<sup>1</sup>]

### 2.4.3.1.2.6 Les stations

Les stations d'une ligne de tramway sont des installations fixes. Elles peuvent être aménagées à l'aide de simples quais. A l'origine les plates-formes des stations se limitaient à une hauteur correspondant à une ou deux contremarches du plancher des véhicules [CER<sup>2</sup>].



**Photo 2-5 : Aménagement accompagnant la ligne de tramway T3 à la station Porte de Versailles dans le 15e arrondissement de Paris en France, montrant combien le Tramway permet une requalification de la ville [SWC.II.5].**

Actuellement les normes exigent que le plancher se trouve au maximum à 5 cm du niveau du quai. [CER<sup>2</sup>].

Dans la catégorie des transports en commun urbain en site propre en mode guidé sur rails, on trouve également, les Tram- trains, et les Train- tram... Les métros lourds relèvent d'une technologie similaire à celle du chemin de fer, avec souvent un gabarit plus réduit

## **2.4.3.2 Transports en commun en site propre en mode guidé sur pneumatique**

### **2.4.3.2.1 Cas du métro automatique**

#### **2.4.3.2.1.1 Définition**

Le métro automatique est un moyen de transport en commun urbain équipé de roues pneumatiques, à conduite entièrement automatique, et qui roule en site propre intégral. Ce concept est issu de la recherche de meilleures performances techniques (vitesses élevées, réduction des intervalles entre rames, accroissement de la sécurité), ce que la conduite humaine ne permettait pas d'obtenir aux heures de pointe, c'est-à-dire celles où la conduite doit être la plus performante et où l'attention des conducteurs risquerait d'être sollicitée au-delà de ce qui est humainement possible. L'usager est sensible à la haute fréquence de passage qu'apporte l'automatisme intégral, en supprimant toute longue attente en station. Cette qualité redonne de l'attrait au transport public. De plus, une haute fréquence peut être aussi obtenue en heures creuses en fractionnant les rames entre heures de pointe et heures creuses, ce qui apporte une souplesse supplémentaire d'exploitation [KUH<sup>1</sup>].

#### **2.4.3.2.1.2 La voie**

Elle comporte deux pistes de roulement dont l'écartement est adapté à celui des pneumatiques, deux contre rails assurant le guidage, et un rail central ou latéral de prise de courant aux stations. Ce système diffère de celui d'un métro classique sur pneumatique dont la voie est munie de deux rails en acier autorisant la circulation de matériel ferroviaire, notamment pour les opérations d'entretien, et également de deux pistes de roulement.

#### **2.4.3.2.1.3 Le véhicule**

Il peut être à petit gabarit : VAL à Lille en 1983, à Toulouse en 1993 et à Rennes en 2002), ou à grand gabarit : ligne D à Lyon en 1991, suivi de la ligne 14 à Paris en 1998. L'intérêt des petits gabarits des véhicules s'explique par les coûts de Génie Civil. A capacité équivalente le coût du

génie civil (tunnel et station souterraine avec la méthode en tranchée couverte, niveau superficiel) le VAL 206 est inférieur de 8 à 17 % à celui du tramway pour des capacités allant de 7000 à 20000 passagers/heure/sens et en adoptant des intervalles de 60 secondes pour le VAL et 90 secondes pour le tramway. Pour un tunnel profond, les écarts de coûts entre Val 206 et tramway se situent entre 17 et 31 % en faveur du Val pour des capacités situées entre 7000 et 20000 passagers/heure/sens [KUH<sup>1</sup>].



Photo 2-6 : Rame du métro automatique OrlyVAL sur viaduc [ART2.C.II].

#### 2.4.3.2.1.4 Les performances techniques

Ce mode de transport offre des vitesses élevées qui permettent de réduire le nombre de véhicules nécessaires pour transporter un même nombre de passagers. Il permet au véhicule de s'adapter au mieux aux caractéristiques de la voie et d'adopter la vitesse de consigne maximum en fonction des distances entre stations. Il permet enfin de réduire les intervalles entre rames en conservant le même niveau de sécurité. Les temps d'arrêt en station sont programmés, les temps mort sont supprimés, les erreurs humaines éliminées, la conduite est optimisée et respectée [ART3.C.II].

#### 2.4.3.2.1.5 Les technologies utilisées

Les véhicules de ce mode de transport sont munis d'équipements électroniques de sécurité basés sur la technologie « fail-safe » : le système de protection automatique par cantonnement fixe, la protection des quais par portes palières : VAL de Lille, Toulouse, Orly, Rennes et ligne 14 à Paris, ou double barrière de rayons infrarouges espacés d'intervalles de 15 cm passant au-dessus des voies pour la ligne D de Lyon. Ils utilisent un microprocesseur protégé par le codage des données (SACEM) pour les fonctions de sécurité. Ces technologies ont beaucoup évoluées. En effet, les portes palières sont maintenant électriques au lieu de pneumatiques sur les véhicules, on utilise des thyristors dans la commande de puissance, les fibres optiques pour les transmissions au sol (ligne 2 du VAL de Lille), des moteurs roues (VAL 208) [ART3.C.II].

#### 2.4.3.2.2 Les stations

Les stations de métro automatique sont équipées de distributeurs automatiques de billets. La surveillance est en permanence assurée par un système de caméra vidéo, et les voies sont protégées par un système de vitrage. L'accès aux quais se fait à l'aide d'escaliers, d'escalators (escaliers roulants) et d'ascenseurs. La hauteur des quais est à fleur avec le plancher du véhicule, facilitant de ce fait, l'accès des personnes sur fauteuils roulants ou accompagnées d'enfants en bas âge [ART3.C.II].

Caractéristiques générales	
Rame	VAL 206 (Lille/Toulouse/Orly)
Type	Métro automatique
Vitesse maximale	80 km/h
Composition	2 motrices
Longueur	25,84 m
Masse à vide en ordre de marche	28 920 kg
Masse en charge normale	32 440 kg
Masse en charge exceptionnelle	45 560 kg
Mode de traction	Electrique

Alimentation électrique	750 V continu
Contrôle- commande traction / freinage électrodynamique	Pilotage automatique intégral Consignes transmises par lignes de train basse tension
Commande du freinage	Electrique à deux voies : freinage de service par lignes de train basse tension communes avec la traction, freinage d'urgence par boucle d'urgence
Puissance maximale à la jante en traction	604 kW
Effort de traction à la jante au démarrage	
Distance et temps pour atteindre les 80 km/h en charge normale et en palier	1945 m / 1 mn 40 sec
Types de signalisations compatibles	Pilotage automatique intégral
Compatibilité en UM	Entre elles, en secours uniquement

<b>motrice</b>	
Longueur hors tout	12,920 m
Largeur de caisse	2,060 m
Hauteur maximale au-dessus du rail	3,250 m
Hauteur du plancher au-dessus du rail	0,950 m
Entre - axe des pivots de bogies	10,000 m
Masse en ordre de marche	14 460 kg
Masse en charge normale	16 220 kg
Masse en charge exceptionnelle	22 780 kg
Nombre de bogies	2
<b>Bogie</b>	
Roulement	Pneumatique
Entraînement caisse- bogie	Par traverse de charge et couronne pivotante
Diamètre de roue neuve	472 mm (pneu gonflé à 11,5 bars)
Transmission de l'effort de traction	Par cardan et pont moteur
Suspension primaire	Par plots caoutchouc
Suspension secondaire	Pneumatique

<b>Captage</b>	
Type	Frotteur 3ème rail
Nombre	2 par bogie
<b>Equipement de traction</b>	
Schéma de traction	Réglage de tension par hacheur (1 par bogie)
Indépendance de commande	Bogie par bogie
Type de commande	Electronique à micro -processeur
Tension d'alimentation des équipements de traction	750 V continu aux moteurs
Technologie des équipements de puissance	Hacheurs à thyristors refroidis par air
<b>Moteur de traction</b>	
Type	Courant continu
Nombre	1 par bogie
Installation	En caisse
Puissance unitaire maximale	205 kW

<b>Freinage</b>	
Frein dynamique	Electrodynamique de type rhéostatique
Puissance en freinage électrodynamique	
Frein mécanique	2 disques en fonte ventilé Ø mm épaisseur mm par essieu
Garnitures de frein à disque	Matériau composite
Effort maximal de freinage par bogie	Vide en ordre de marche : 5695 daN Charge normale : 6400 daN Charge exceptionnelle : 6400 daN
Frein de parking	A ressort, à application automatique
Tension d'alimentation des auxiliaires motrice	72 V continu

<b>Espaces voyageurs</b>	
Motrice	Non fumeurs 44 places + 12 strapontins



	Capacité maximale (assis+debout) : 104 passagers
<b>Portes</b>	
Portes d'accès voyageurs	Coulissantes, à 2 vantaux
Nombre de portes d'accès voyageurs	6 par motrice
Actuation des portes d'accès voyageurs	Pneumatique
<b>Confort thermique</b>	
Type	Chauffage / ventilation
Nombre	1 unité par motrice
Chauffage	Par ventilation d'air chaud obtenu à partir d'une batterie de chauffe
<b>Intercirculation</b>	
Type	Passerelles simples
Portes de fermeture	Battantes
Actuation des portes	Manuelle, non manoeuvrable par les voyageurs

**Tableau 2-5 : Caractéristiques techniques du VAL [REV<sup>3</sup>]**

### 2.4.3.3 Transports en commun en mode non guidé sur pneumatique

#### 2.4.3.3.1 Cas de l'autobus

##### 2.4.3.3.1.1 Définition

Un autobus est un véhicule automobile qui sert au transport en commun de voyageurs. Il roule uniquement en surface, soit en partageant la voirie avec d'autres véhicules, partiellement dans des couloirs réservés, soit en site propre lorsqu'il s'agit de grandes distances pour atteindre des vitesses commerciales élevées [CER<sup>3</sup>].

### 2.4.3.3.1.2 La voie

C'est la structure classique des voies routières avec revêtements soit en matériaux souples (enrobé, asphalte...), en matériaux modulaires (pavés, briques...) ou en matériaux durs (béton...). En raison de la ponctualité des efforts (passage au même endroit) en particulier dans les stations, les revêtements sont conçus de plus en plus en béton [CER<sup>3</sup>].

### 2.4.3.3.1.3 Le véhicule

Les véhicules ont des longueurs variables, une largeur maximale d'essieu de 2,55 m et sont soumis à la réglementation du code de la route. Les caractéristiques des véhicules sont fortement liées au type de desserte et à leur fonctionnalité. En France, avec 75% du parc de bus en circulation, le bus standard (12 mètres) reste le véhicule de transport urbain par excellence [CER<sup>3</sup>].

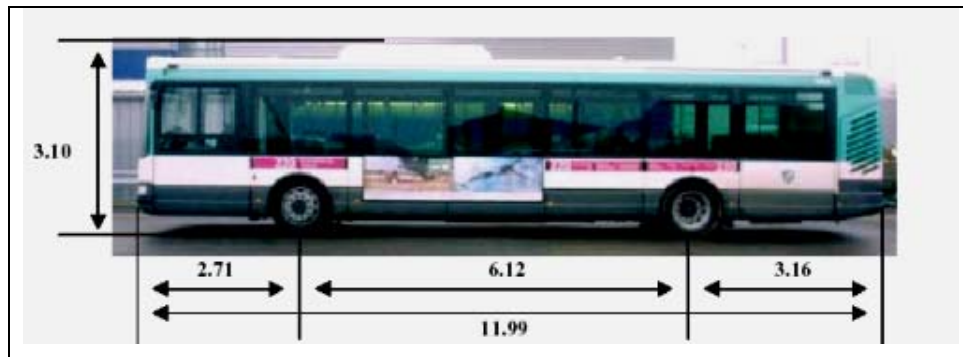


Photo 2-7 : Bus de type Agora3 [SWC.II 7].

Caractéristiques techniques	
Longueur	11.99 m
Largeur	2.50 m
Hauteur (climatisation comprise)	3.10 m
<b>Garde au sol :</b>	
Véhicule en charge maximale autorisée :	
Sous organes	14,06 cm
Sous carrosserie	30,7 cm

Porte à faux avant	2.71 m
Empattement	6.12 m
Porte à faux arrière	3.16 m
Déport du porte à faux arrière	0.60 m
Rayon de giration hors tout	11.22 m
Poids à vide	11.64 t
Poids total en charge	19.00 t
Moteur diesel turbo compressé	245 chevaux

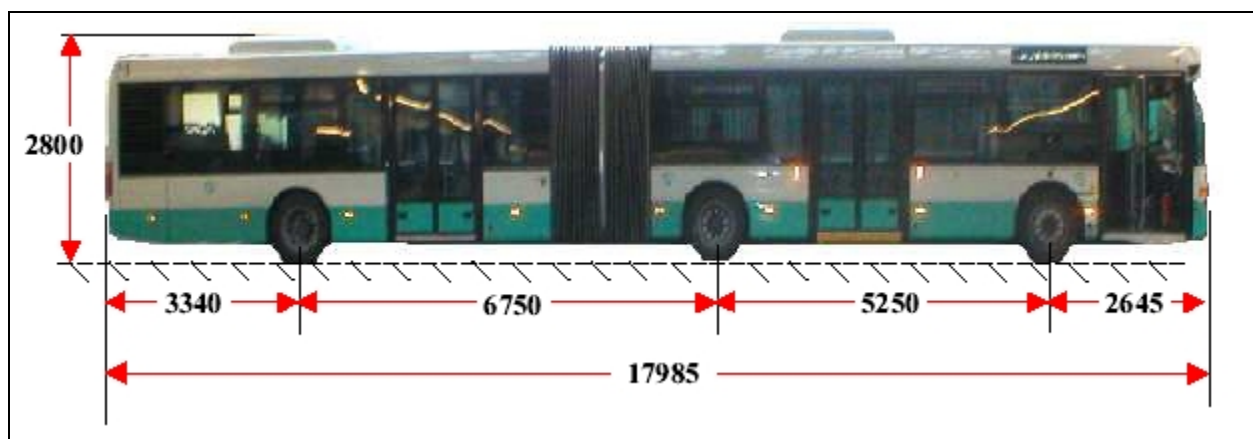
<b>Système de freinage</b>	
Frein de service	à disques à l'avant et à l'arrière
Frein d'exploitation	dispositif agissant sur les freins avant et arrière
Frein de stationnement	pneumatique à vide d'air, la commande est pneumatique à action mécanique
Boîte de vitesses	ZF 4 vitesses
Ralentisseur	Hydraulique intégré à la boîte et couplé au frein principal
Réservoir de carburant	240 litres
Capacité voyageurs	Assis : 28. Debout : 67. Total : 95 + conducteur
Electricité	Dispositif « GMS » (Global Management System) : assure la commande, la surveillance, la protection et le diagnostic des fonctions électriques du véhicule.

**Tableau 2-6 : Caractéristiques générales de l'autobus de type Agora euro 3 court [REV<sup>4</sup>]**

Il existe d'autres types de Bus utilisés dans les réseaux de transport en commun de France parmi lesquels on compte les PR 180.2 de l'Orlybus de Scania fabriqués à Angers (49). [CER<sup>3</sup>].

<b>type de bus</b>	<b>Scania</b>
Boîte de Vitesses	ZF 4 vitesses
Longeur	17,985 m
Hauteur	2. 80 m (clim comprise)
Largeur	2.50 m
Places Assises	55
Places debout	77
Total	132 (+ conducteur)
Moteur	Turbo compressé 260 chevaux.
Poids à vide	16 t
Poids en charge	29 t
Caractéristiques	UFR, CLIM, Vitres athermiques...
Frein de stationnement :	Pneumatique à vide d'air, la commande est pneumatique à action mécanique.
Frein de service :	A disques à l'avant et à l'arrière.
Frein d'exploitation :	Dispositif agissant sur les freins avant et arrière.
Ralentisseur :	Hydraulique intégré à la boîte et couplé au frein principal.
Réservoir :	400 litres

**Tableau 2-7 : Caractéristiques générales d'autres types de bus [REV<sup>5</sup>]:**



**Photo 2-8 : Bus de type Scania [SWC.II 8]**

#### 2.4.3.3.1.4 Performances techniques

L'accessibilité du bus depuis le milieu des années 90 est facilitée par la généralisation du plancher bas. Début 2004, 55% du parc est composé d'autobus à plancher bas alors que, fin 2001, ce taux n'était que de 41%. Selon la taille des agglomérations, des différences existent : 36% du parc à plancher bas dans les agglomérations de moins de 100 000 habitants, 48% dans les agglomérations de 100 à 250 000 habitants et 57% dans les grandes agglomérations. Ce taux s'élève à 66% pour la RATP. Cette accessibilité s'accompagne d'autres équipements, comme les palettes (24% du parc), les systèmes d'agenouillement (25%) ou les espaces UFR (26%), les annonces sonores des stations (20%). Ces équipements complémentaires sont plus récents, plus divers, et donc moins présents

#### 2.4.3.3.2 Cas du Trolleybus

##### 2.4.3.3.2.1 Définition

Le **trolleybus** est un véhicule de transport en commun de voyageurs, sur pneumatiques, comme l'autobus, mais propulsé par un moteur électrique, comme le tramway. Il est alimenté en courant continu de 600 volts par deux lignes de contact aériennes espacées de 50 cm, situées entre 4,25 m et 6 m de haut et piloté manuellement. Sur les premiers modèles, le contact était établi par deux roulettes, appelées chariots ou *trolley*, en anglais (*du vieux français «troller» = traîner*), montées chacune au bout d'une perche. Par la suite, les roulettes disparurent au profit de frotteurs à base de graphite. La réglementation actuelle oblige les trolleybus à être équipé



d'un moteur thermique auxiliaire, afin de pouvoir se déplacer à vitesse réduite dans des espaces dépourvus de lignes aériennes de contact, par exemple lors de déviations pour travaux ou lors de manœuvres de garage. D'autres sont appelés bi mode **(ancien réseau de Nancy, par exemple)** car muni de deux chaînes de traction indépendantes : moteur

diesel avec boîte de vitesses, et équipement électrique de trolleybus. Ils peuvent ainsi parcourir des antennes terminales non pourvues de ligne de contact [CER 4].

**Photo 2-9: Trolleybus [SWC.II 10]**

#### **2.4.3.3.2.2 Performances techniques**

Un trolleybus classique est un bus électrique. Les fils d'alimentation ont un profil en forme de "8", la partie supérieure du 8 permet de maintenir le fil avec une pince qui laisse le passage libre au capteur de la perche sur la partie inférieure du 8. La liaison entre les bifilaires et les supports se fait par des potences montées sur des poteaux métalliques, ou des câbles tendus (appelés *suspensions*) entre 2 poteaux ou entre 2 façades d'immeubles. Certains modèles peuvent être guidés mécaniquement par un rail ou par une assistance optique (caméra infrarouge). Dans ce cas, les perches autorisent un désaxement du véhicule de 4 mètres de part et d'autre de la ligne d'alimentation (indispensable pour que le trolleybus puisse éviter une voiture stationnée devant lui par exemple).

Le passage dans un carrefour ou une bifurcation nécessite un aiguillage un peu analogue à celui d'une voie ferrée. Par défaut, l'aiguille est en position droite; pour bifurquer sur une autre ligne, le chauffeur depuis sa cabine, déclenche un signal électrique qui dévie la lame de l'aiguille juste avant le passage de son véhicule [CER 4].

#### **2.4.3.3.2.3 Le véhicule**

On trouve généralement des véhicules des modèles dits standard ou articulés selon leur longueur, comprise aujourd'hui entre 9 et 25 mètres [CER 4].

#### **2.4.3.3.2.4 La conduite**

Le poste de conduite du Vétra Chausson VBC par exemple est extrêmement réduit : une pédale à gauche pour démarrer (à la place d'une pédale d'embrayage), une pédale de frein et l'accélérateur à droite. Il y a en plus un inverseur de marche, et le frein à mains classique. Des

commandes permettent d'actionner l'ouverture et la fermeture des portes. Le tableau de bord est muni de divers compteurs, vitesse, ampèremètre et d'équipements tels que coupe-circuits. [CER 4].

#### **2.4.3.3.2.5 Le trolleybus et l'environnement**

Le trolleybus est un véhicule particulièrement respectueux de l'environnement car il est très silencieux et n'émet pas de polluants atmosphériques. Ainsi, la production moyenne de CO2 d'un trolleybus est d'environ 4g/ km/voyageur contre 80 pour un bus diesel et 180 pour une voiture particulière. Le tableau ci-dessous donne les principales caractéristiques techniques d'un trolleybus standard et d'un trolleybus articulé [CER 4]

#### **2.4.3.3.2.6 Différents constructeurs**

En France, le constructeur IRISBUS (issu de Renault Véhicules Industriels après fusion avec IVECO) construit des Cristalis (en versions standard et articulée) à Rorthais dans le département des Deux-Sèvres. Il fournit Lyon et Saint-Étienne, ainsi que Bologne en Italie.

Ces engins modernes à plancher bas intégral, avec palette rabattable à la porte du milieu, agenouillement du côté des portes lors des arrêts et climatisation, sont mus par un système de moteur roue. Ils sont équipés d'un moteur d'autonomie diesel, qui peut être remplacé par une version «bi mode», c'est-à-dire un moteur diesel dimensionné au type de véhicule (standard ou articulé). En terme de coût, les Cristalis sont chers : 620.000 €uros (commande de Limoges passée en septembre 2004).

Dans le reste de l'Europe, il existe deux familles de constructeurs de trolleybus :

- VAN HOOL et NEOPLAN qui proposent du matériel « haut de gamme » de type Cristalis
- Il existe également un ensemble de fournisseurs offrant avec des prix plus abordables des modèles présentant tous les standards de qualité des véhicules d'Europe de l'Ouest, à savoir le plancher surbaissé, la climatisation, une palette rabattable pour les usagers en fauteuil roulant et l'agenouillement aux arrêts comme :

« **SOLARIS** » avec sa gamme «Trollino» qui présente trois capacités différentes : standard classique de 12 mètres, standard long de 15 mètres à trois essieux et articulé de 18,50 mètres à trois essieux. Toutes les versions « Trollino » peuvent être équipées de batteries assurant l'autonomie dans les dépôts (qui n'ont pas de lignes aériennes électriques) ou pour contourner un obstacle en ligne commerciale en cas de travaux importants ou accident nécessitant une déviation.

« **TRANS-ALPHA** » avec son modèle «5298-01» qui fut présenté au salon international de l'U.I.T.P. à Madrid au printemps 2003. Il circule notamment dans les rues de Moscou. Pour l'instant, il n'existe qu'en version standard de 12,50 mètres.

« **B.K.M.** » avec sa gamme de trolleybus en version standard de 11,77 mètres nommée « 321 » et articulée de 18 mètres appelée « 333 ».

« **KAROSA-IRISBUS** » avec son trolleybus «24 Tr», présenté officiellement le 25 septembre 2003 à Pilsen. Il est construit en république Tchèque sur la base de l'autobus IRISBUS Agora Standard. Le trolleybus « 24 Tr », possède tous les atouts de l'autobus Agora (climatisation, plancher bas, palette rabattable, agenouillement) et est muni d'un moteur d'autonomie « SKODA » qui a la particularité d'être à batteries, se rechargeant par récupération lors des freinages [CER<sup>4</sup>].

<b>Caractéristiques techniques</b>		
<b>Type de Trolleybus</b>	Trolleybus Standard	Trolleybus articulé
Longueur (m)	11,3 – 12	17,5 – 18
Largeur (m)	2,4 – 2,5	2,4 – 2,55
Hauteur (m)	3 – 3,7	3 – 3,7
Masse à vide (t)	10 – 13	16,5 – 17,5
Nombre de places	95 – 105	120 – 150
Masse en charge (t)	13 – 16	23 – 28
Vitesse maximale (km/h)	60 – 80	60 – 80
Pente maximale (%)	13 – 15	13 – 15
Puissance de motorisation électrique (kW)	120 – 185	150 – 230
Groupe d'autonomie (kW)	40 – 70	40 – 80
Tension d'alimentation (v)	600 – 750	600 – 750
Motorisation	CC ou asynchrone	CC ou asynchrone
Electronique de commande	GTO puis IGTB	GTO puis IGTB



Accélération maximale (ms-2)	1,1 – 1,3	1,1 – 1,3
Système de perches	Abaissement automatique, rapide, avec recentrage depuis le poste de conduite	

**Tableau 2-8 : Caractéristiques générales du Trolleybus [REV<sup>5</sup>]**

### **2.4.3.3.3 Cas du Bus à Haut Niveau de Service BHNS**

#### **2.4.3.3.3.1 Définition**

Le Bus à Haut Niveau de Service (BHNS) est un mode de transport collectif en cours de développement en Europe. Le concept du BHNS combine la qualité du transport par rail et la souplesse du transport par autobus. Ce concept vise à améliorer la rapidité, la fiabilité et l'identité du réseau, en jouant sur les voies de circulation, le matériel, les stations, le plan d'exploitation. Les matériels routiers peuvent se décliner en fonction de différents types d'alimentation énergétique plus ou moins polluante, diesel, gaz naturel de ville, biocarburant, électricité. Les services de transport à la demande ou taxis peuvent compléter les services des réseaux [PEN].

### **2.4.3.4 Transports en commun en site propre de type intermédiaire**

#### **2.4.3.4.1 Cas du tramway sur pneus**

##### **2.4.3.4.1.1 Définition**

Le tramway sur pneus, est une sorte de transport routier guidé hybride, situé entre l'autobus avec lequel il partage le roulement sur pneumatiques, le trolleybus avec lequel il partage l'alimentation et la traction électrique, et le tramway fer, avec lequel il partage le guidage. Le concept de tramway sur pneus est né au début des années 80 en Belgique, il fut d'abord appelé GLT (Guided Light Transit), à l'esthétique plus ou moins désirable. L'idée d'avoir un véhicule à cheval entre le bus et le tramway fer est issue du besoin de combler la différence entre les capacités du bus articulé (2000 voyageurs par heure et par sens) et le tramway fer (de 3000 à 5000). Dès le départ, ce nouveau mode "intermédiaire" est imaginé en site propre (pour une

question de régularité), et d'une conception plus légère pour minimiser le coût par rapport au tramway classique [ORS].

#### 2.4.3.4.1.2 La voie

La voie du tramway sur pneus est une voirie réservée qui comporte deux parties : une plateforme en béton couverte d'un revêtement soit en matériaux souples (asphalte, enrobé...), soit en matériaux durs (béton...) servant de piste de roulement aux pneumatiques, et un rail central en acier servant à la fois au guidage et à l'alimentation électrique. La voie de ce mode de transport se dégrade assez rapidement par orniérage en raison de l'usure répétée due au roulement des pneumatiques aux mêmes endroits [ORS].

#### 2.4.3.4.1.3 Le véhicule



Croquis 2-14 : Tramway sur pneu [ATE]

Deux familles existent. La première consiste en des véhicules ne pouvant sortir du mode guidé, électriques alimentés par un fil aérien unique et un pantographe. Ils peuvent être à poste unique



de pilotage et boucle de retournement en terminus (Caen) ou à double poste comme le STE de Lohr Industrie. La seconde consiste en des véhicules bimodaux (mode guidé et mode routier) utilisant une énergie de type trolleybus à deux fils aériens, avec moteur thermique de secours (Bombardier de Nancy) [ORS].

Photo 2-10 : Tramway sur pneu le Translohr [ATE]

#### **2.4.3.4.1.4 Qualités et performances techniques**

Pour une régularité équivalente, l'infrastructure plus légère par rapport au tramway classique minimise le coût d'investissement. Mais la raison principale avancée pour le choix de ce type de mode mixte réside, grâce à la meilleure adhérence, dans le franchissement de pentes importantes, ce qui explique son choix pour les trois villes françaises de Caen, Nancy et Clermont-Ferrand. Le roulement sur pneumatiques permet également de meilleures accélérations, des distances de freinage plus courtes, des rayons de giration plus réduits et une réduction du bruit de roulement, en particulier en courbe.

Signalons que le guidage n'est pas nécessairement assuré par un rail mais peut l'être par des dispositifs optiques (bandes de peinture sur la chaussée, système Civis) ou magnétiques (fil noyé dans la chaussée ou plots, exemple du futur « tramway » Evéole de Douai). Ce guidage peut ne pas être appliqué sur la totalité d'une ligne, mais simplement au droit des stations pour mieux assurer la mise à quai.

L'appellation ici aussi n'est pas encore bien figée, entre tramway et bus guidé. Il semblerait qu'en France le mot tramway se fige sur un modèle bien défini de véhicule.

Par ailleurs des recherches sont menées pour standardiser les véhicules sur pneu, qu'ils soient employés en VAL ou en Tramway sur pneu (projet NEOVAL de Siemens et Lohr Industries) [ORS].

#### **2.4.3.4.1.5 Citons un exemple, celui du futur tramway de Douai.**

Après avoir étudié différentes solutions, le Syndicat Mixte des Transports du Douaisis a opté pour un tram sur pneus à guidage magnétique. Le tram sur pneus est un mode de transport public, situé entre l'autobus, avec lequel il partage le roulement sur pneumatiques, et le tram, avec lequel il partage le guidage au sol. Le guidage magnétique, qui évite la pose de rails, représente un coût d'investissement moindre que celui d'un tramway classique. Il offre également la possibilité pour la rame de quitter ponctuellement le tracé initial en cas d'accident de parcours. Ce tram sur pneus circulera sur une voie qui lui sera entièrement réservée.

Prioritaire sur les autres véhicules, il ignorera les difficultés de circulation. Sa motorisation sera hybride : moteur thermique et moteur électrique sur batteries sans chargement extérieur.

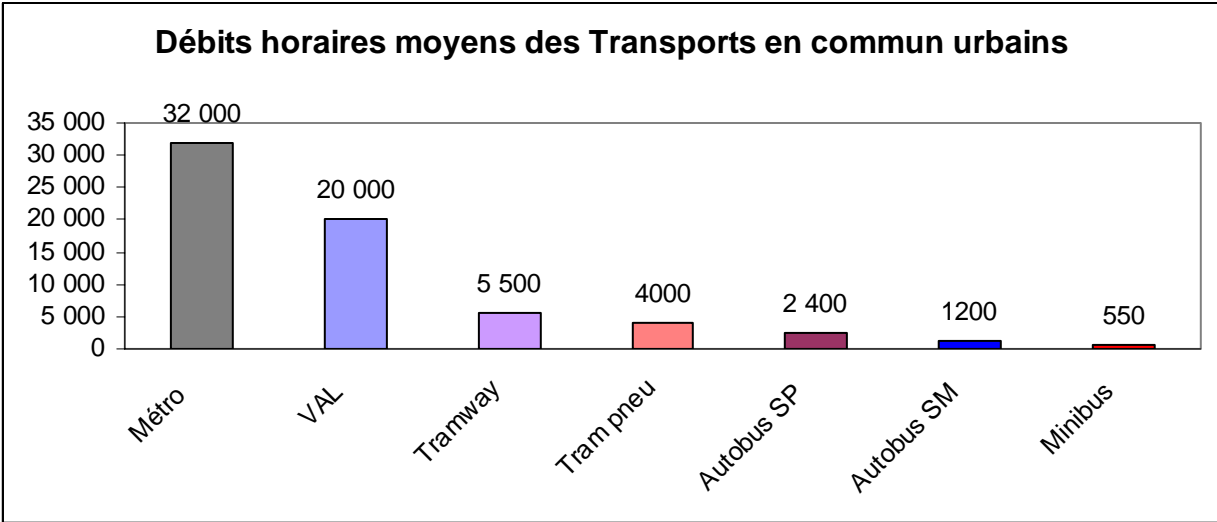
Le choix du Syndicat Mixte des Transports du Douaisis s'est porté sur un matériel particulièrement novateur, déjà en circulation à Eindhoven (Pays-Bas). Il existe deux versions de ce tram : une version courte de 18 m pour l'accueil de 120 passagers et une version longue de 24 m pouvant transporter jusqu'à 180 passagers **[ORS]**.

#### **2.4.3.4.2 Station**

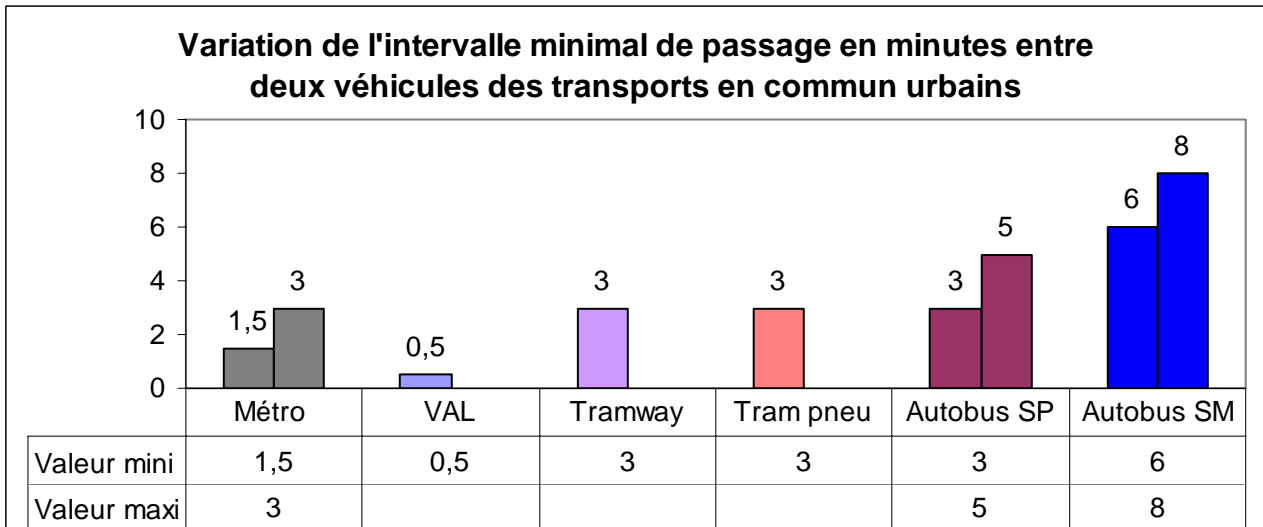
Les stations des tramways sur pneus sont un compromis entre stations de tramway et de bus à haut niveau de service.

### **2.5 Panorama général des transports en commun**

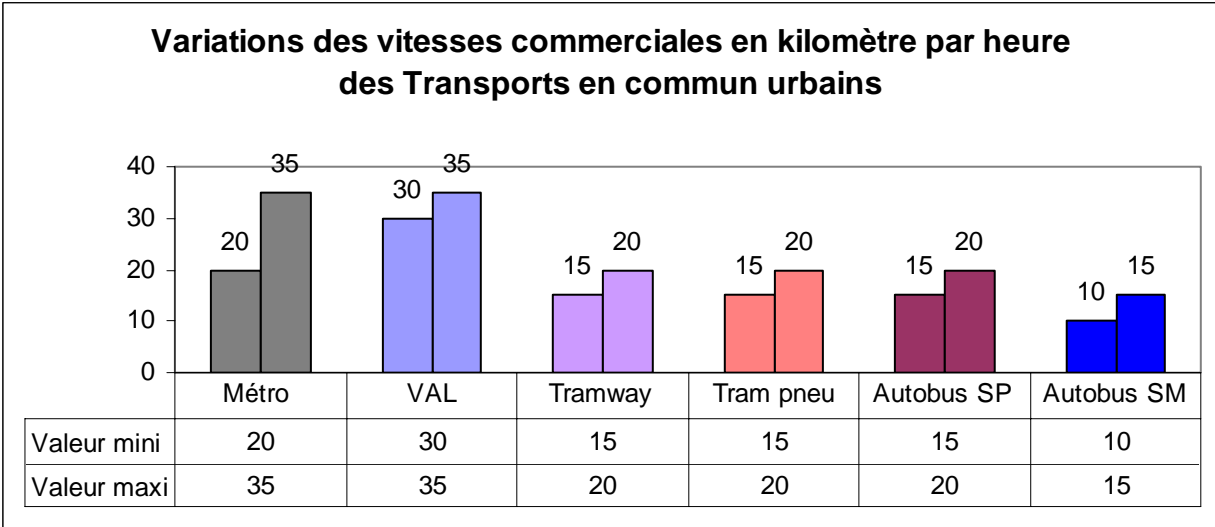
Sont concernés essentiellement les modes de transport retenus dans notre travail de thèse. Dans un rapport publié en octobre 2006 par le centre de recherche sur les transports urbains en France dans « Sciences & Décisions », il est indiqué qu'un métro a un débit horaire maximal de 32 000 personnes avec un intervalle minimal compris entre 1,5 et 3 minutes. Sa vitesse commerciale va de 20 à 35 km/h. Un métro automatique léger (VAL) a un débit horaire maximal de 20 000 personnes et une vitesse commerciale comprise entre 30 et 35 km/h. Un tramway a un débit horaire maximal de 5 500 personnes avec un intervalle minimal de 3 minutes. Sa vitesse commerciale va de 15 à 20 km/h. Un tramway sur pneus dont l'appellation exacte est système guidé sur pneus présente les mêmes caractéristiques mais un débit horaire maximal plus faible (4000 personnes). Un autobus en site propre a un débit horaire maximal de 2400 personnes avec un intervalle minimal compris entre 3 et 5 minutes. Sa vitesse commerciale est comprise entre 15 et 20 km/h. Un autobus roulant au milieu des voitures a un débit horaire et une vitesse plus faibles (1 200 personnes avec un intervalle minimal de 6 à 8 minutes et une vitesse de 10 à 15 km/h). Le débit maximal tombe à 550 personnes avec un minibus. Ces chiffres sont observés habituellement en France sur les segments les plus chargés avec 4 personnes debout au mètre carré (conditions standards de mesure dans le domaine des transports). La vitesse prise en compte pour décrire les performances des transports en commun est la vitesse commerciale, qui inclut donc le temps passé aux arrêts **[DSD<sup>1</sup>]**.



**Figure 2-1 : Diagramme des valeurs des débits horaires par sens des transports en commun urbains en France [DSD<sup>1</sup>]**



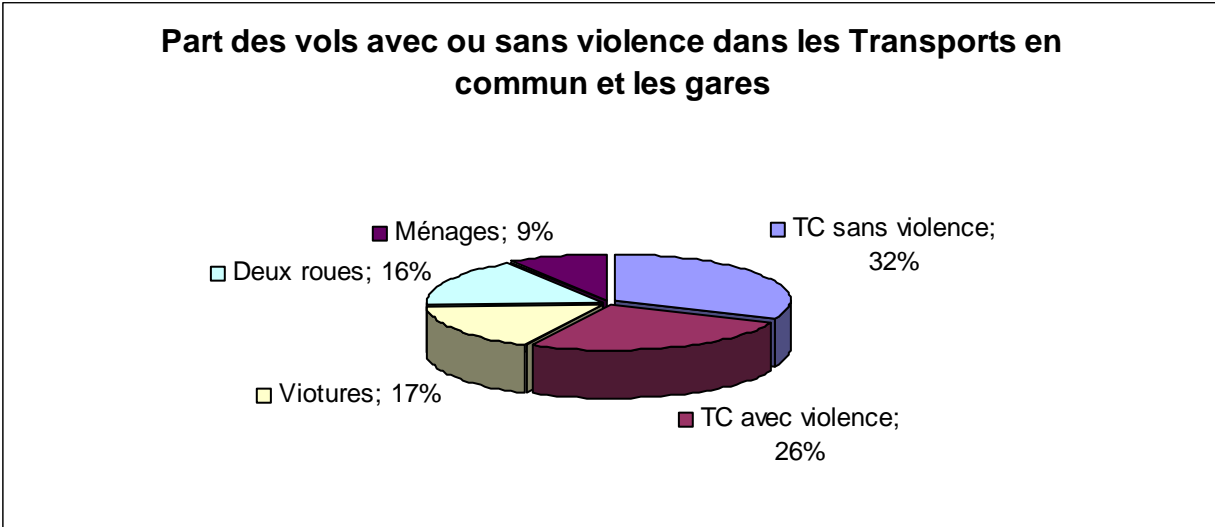
**Figure 2-2 : Diagramme des valeurs minimales des intervalles de passage entre deux véhicules des transports en commun urbains [DSD<sup>1</sup>]**



**Figure 2-3 : Diagramme des intervalles des vitesses commerciales des transports en commun urbains [DSD<sup>1</sup>]**

### 2.5.1 Le risque de vol ou d'agression dans les transports en commun

La situation en Ile-de-France montre grâce aux enquêtes réalisées périodiquement par la Région que 31 % des vols sans violence (argent, bijoux, portables...) et 25 % des agressions (principalement les vols avec violence et les violences verbales) ont lieu dans les transports en commun ou dans les gares. 2,8 % des Franciliens ont été victimes d'un vol (ou d'une tentative de vol) dans les transports en commun et 1,5 % d'une agression au cours des trois années 2000, 2001, 2002. Les plus exposés aux vols et aux agressions dans les transports en commun sont les jeunes de moins de 30 ans. Le risque est trois fois plus élevé pour eux que pour une personne ayant entre 30 et 60 ans et sept fois plus que pour une personne ayant plus de 60 ans. Au cours des années 2000, 2001 et 2002, 22 % des ménages franciliens possédant une voiture ont été victimes de la dégradation ou de la destruction de leur véhicule, 21 % d'un vol (ou d'une tentative) d'objets à l'intérieur de leur voiture et 17 % du vol (ou d'une tentative) de leur voiture. Le chiffre est de 16 % pour les deux-roues. A titre de comparaison, 9 % des ménages ont été victimes du cambriolage (ou d'une tentative) de leur logement ([IAURIF<sup>1</sup>], [IAURIF<sup>2</sup>], [IAURIF<sup>3</sup>])



**Figure 2-4 : Diagramme des proportions des vols avec ou sans infraction dans les transports urbains [IAURIF<sup>1</sup>], [IAURIF<sup>2</sup>], [IAURIF<sup>3</sup>]**

## 2.5.2 Coûts et facteurs de choix des transports en commun

Les coûts des transports en commun englobent l'investissement, l'exploitation, le coût du temps passé dans les transports en commun, le coût des nuisances dues aux transports en commun, ainsi que le coût de leur impact.

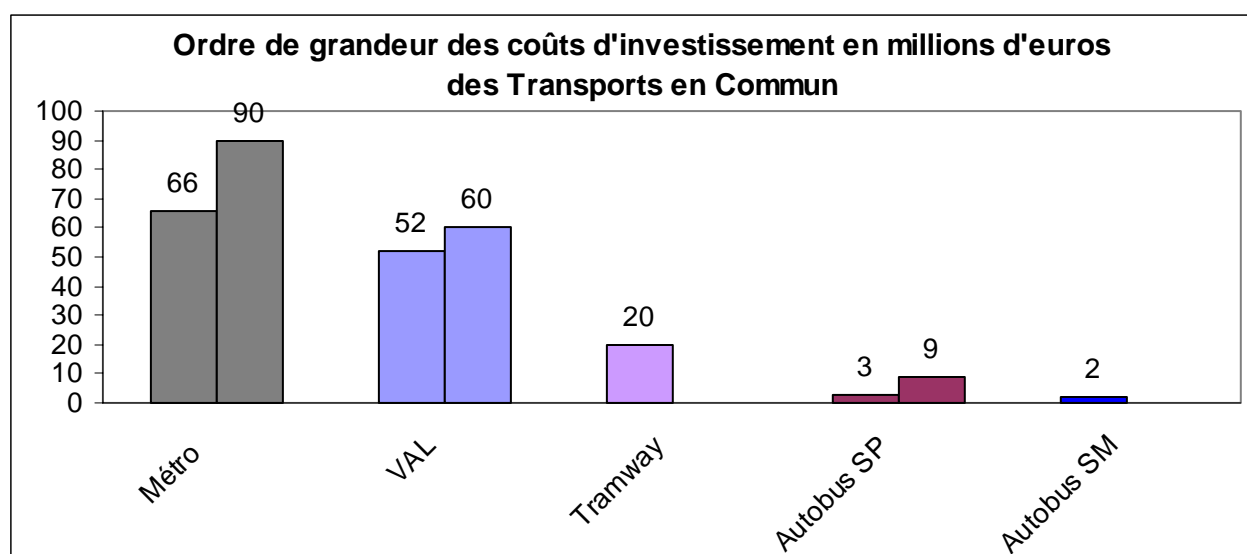
### 2.5.2.1 Les facteurs de choix

Le trafic et la capacité d'écoulement, combinés avec les contraintes financières des AOT, sont des éléments déterminant dans le choix d'un système de transport. Les coûts d'investissement et d'exploitation peuvent varier sous l'effet de contraintes liées à d'autres paramètres extérieurs au système de transport qui peuvent être la nature du site, la densité de la population au kilomètre carré.

## 2.5.2.2 Les coûts

### 2.5.2.2.1 Les coûts d'investissement

Selon les mêmes sources, le coût moyen d'investissement pour un kilomètre de voie double est de 66 à 90 millions d'euros pour un métro classique souterrain, de 52 à 60 millions d'euros pour un métro automatique léger (VAL) souterrain, environ 20 millions d'euros pour un tramway, de 3 à 9 millions d'euros pour un bus en site propre (voie réservée) et environ 2 millions d'euros pour un bus partageant la chaussée avec les autres véhicules. Ces chiffres intègrent l'ensemble du projet, l'infrastructure, les matériels roulants, les installations fixes, les équipements et les stations.



**Figure 2-5 : Diagramme de variation des coûts d'investissement globaux par kilomètre de voie double y compris le matériel et les infrastructures en millions d'euro ([CER<sup>6</sup>], [STIF<sup>1</sup>], [CAB & al])**

### 2.5.2.2.2 Les coûts d'exploitation

Le coût d'exploitation pour un véhicule par an et par kilomètre est de 8,8 à 12 euros pour un métro classique, de 4,3 à 4,9 euros pour un VAL, de 4 à 4,9 euros pour une rame de tramway et de 2,3 à 2,9 euros pour un autobus. Ces coûts d'exploitation comprennent l'achat d'énergie, les charges de personnel, la sous-traitance, les frais généraux, et les impôts et taxes. En



investissement, une rame de métro classique coûte de 3 à 6 millions d'euros, une rame de VAL environ 2,5 millions d'euros, une rame de tramway de 1,5 à 2,2 millions d'euros, un autobus guidé sur pneus entre 0,7 et 1,6 millions d'euros selon qu'il soit simple ou articulé et un autobus standard environ 0,3 millions d'euros.

Par ailleurs ces différents systèmes n'offrent pas la même capacité d'adaptation ni la même qualité de service. En effet, un critère de choix important à ne pas oublier est le débit horaire nécessaire pour faire face à l'évolution prévisible de la demande. De même la demande de qualité de service devrait aller en croissant. Par ailleurs, la lutte contre l'augmentation de l'effet de serre pèsera de plus en plus en faveur des « moteurs propres » (traction électrique, biocarburants) ([CER<sup>6</sup>], [STIF<sup>1</sup>], [CAB & al]).

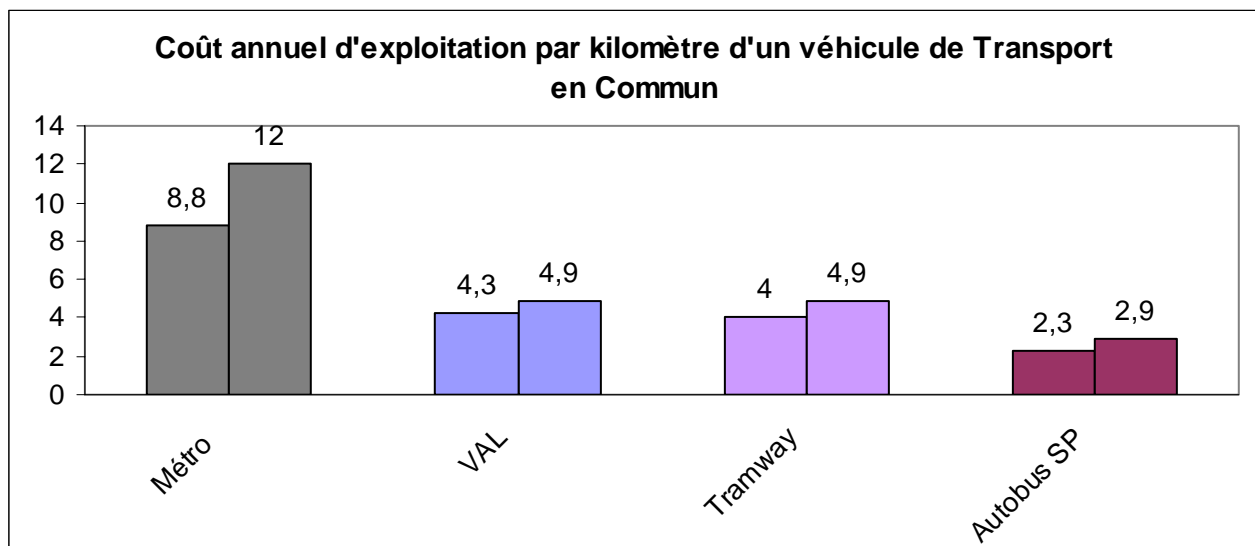


Figure 2-6 : Diagramme de variation des coûts d'exploitation pour un véhicule des transports en commun urbains par an et par kilomètre ([CER<sup>6</sup>], [STIF<sup>1</sup>], [CAB & al])

### 2.5.2.2.3 Coût du temps passé dans les transports en commun

Les ménages ayant des revenus moyens ou faibles ont tendance à s'éloigner du centre ville pour compenser le coût du logement. Mais cet avantage est contrebalancé par le temps passé en transport et le coût correspondant pour se rendre en centre ville. Plusieurs études menées par des économistes ont analysé la répartition géographique des ménages en Ile-de-France en fonction de leurs revenus. En faisant l'hypothèse qu'en moyenne les gens avaient trouvé un

équilibre entre coût du logement et coût des transports (y compris la durée du voyage), ces études ont débouché sur la conclusion que les personnes semblent considérer que le coût d'une heure passée dans les transports équivaut à environ 59 % d'une heure de salaire brut, quel que soit le niveau socio-économique.

Le fait que l'éloignement soit inversement proportionnel aux revenus des ménages (les plus pauvres habitent plus loin) a deux conséquences :

- Les logements éloignés du centre ville deviennent plus attractifs si le prix d'un déplacement en transports en commun est le même quelle que soit la distance parcourue. La mise en place d'un tel tarif aura tendance à favoriser l'élargissement des aires urbaines.
- Les logements situés à proximité du centre ville deviendront encore plus attractifs si le prix du pétrole augmente beaucoup. Le prix des logements suivra donc cette augmentation et les ménages ayant des revenus moyens ou faibles ne pourront pas se rapprocher.

Bien sûr, le prix des logements est également modulé par la proximité d'équipements collectifs locaux et par la qualité de l'image et du peuplement du quartier. **([BOI], [INS], [ROU], [IAURIF<sup>4</sup>])**

#### **2.5.2.2.4 Coûts des nuisances dues aux transports en commun**

Les transports ont des effets négatifs sur la qualité de la vie et sur l'environnement. Certains de ces effets sont dus à l'utilisation du pétrole comme carburant (la pollution de l'air, les émissions de gaz à effet de serre) ou à la conception des véhicules (le bruit) alors que d'autres sont la conséquence directe de la circulation (les embouteillages, les accidents). Depuis une trentaine d'années, les constructeurs d'automobiles ont considérablement amélioré les véhicules afin de limiter la pollution et les risques d'accidents.

La prédominance de la voiture particulière a un impact direct sur la mobilité des non-automobilistes. D'une part, les transports en commun sont pris dans les embouteillages. D'autre part, les trottoirs sont en partie utilisés pour le stationnement des voitures et le cheminement des piétons est interrompu par les grands axes de circulation (les quartiers sont morcelés en îlots) **([MOB], [REF], [BOI], [BLA], [IAURIF<sup>5</sup>], [ROL<sup>1</sup>]).**

Pour pouvoir évaluer l'impact des politiques de transport, les économistes ont attribué un coût aux nuisances provoquées par les transports. Les valeurs estimées sont en partie affaire de

convention et peuvent donc différer selon les pays. Par exemple, le coût d'un tué sur la route varie du simple au triple selon les pays européens.

En France, le coût des nuisances est régulièrement évalué par les pouvoirs publics. Le barème est très détaillé. Par exemple le coût d'une heure passée dans les transports est modulé par le confort : il coûte deux fois plus cher pendant les temps d'attente. En France, le barème (2001) donne :

- 0,1 euro pour 3,7 kilogrammes de CO<sub>2</sub> (une voiture à essence émet 0,27 kg de CO<sub>2</sub> aux 100 km en ville et une voiture diesel 0,25 kg),
- Le bruit entraîne une baisse de 1 % de la valeur du logement,
- 1,5 million d'euros pour un tué dans un accident de la route dans les transports en commun (1 million si la victime utilisait une voiture particulière),
- La pollution atmosphérique en centre ville coûte 0,03 euro au kilomètre pour une voiture particulière et 0,28 euro pour les poids lourds,
- 59 % d'une heure de salaire brut pour une heure passée dans les transports,
- 0,45 euro par heure passée dans les transports pour une tonne de marchandise à haute valeur. ([BOI], [LEP], [INS], [ROL<sup>2</sup>], [STIF<sup>1</sup>])

#### **2.5.2.2.5 Coûts de la lutte contre le bruit des transports urbains**

En 2003 les dépenses de protection contre le bruit se sont élevées à environ 23 euros par habitant (+ 9 % par rapport à 2002). Elles ont été réalisées à 61 % par les entreprises, 28 % par les ménages et 11 % par les administrations publiques. Elles comprenaient principalement les dépenses liées à l'isolation phonique des logements, puis celles concernant les véhicules automobiles (remplacement des pots d'échappement) ainsi que les travaux d'insonorisation des voies routières et ferroviaires (murs antibruit, revêtements insonores sur les routes).

La plupart des rues et carrefours des villes françaises et neuf axes routiers sur dix en Ile-de-France dépassent le seuil réglementaire toléré pour les nuisances sonores. Plus d'un quart de la population des centres-villes est exposé dans la journée à un bruit dépassant ce seuil et seulement 3,5 % en zone rurale. En 1995, de 500 à 600 groupes scolaires et près d'un million de logements étaient soumis à des bruits qui étaient au moins trois fois plus forts que le seuil toléré.

Les sources de bruit changent selon la vitesse du véhicule. En dessous de 50 km/h, le bruit est dû principalement au moteur alors que le bruit des pneumatiques sur la chaussée est largement

prédominant à partir de 100 km/h. Le bruit des moteurs est dû au choc des pistons et il est amplifié par les vibrations de la carrosserie. Depuis 1970, une série de directives européennes a imposé une diminution du niveau sonore des voitures.

La façon la plus efficace de diminuer le bruit est de remplacer le moteur classique par un moteur électrique. Le progrès est spectaculaire dans le cas des deux-roues pour lesquels le moteur est la principale source de bruit. ([CCF], [ROL<sup>2</sup>], [STIF<sup>2</sup>])

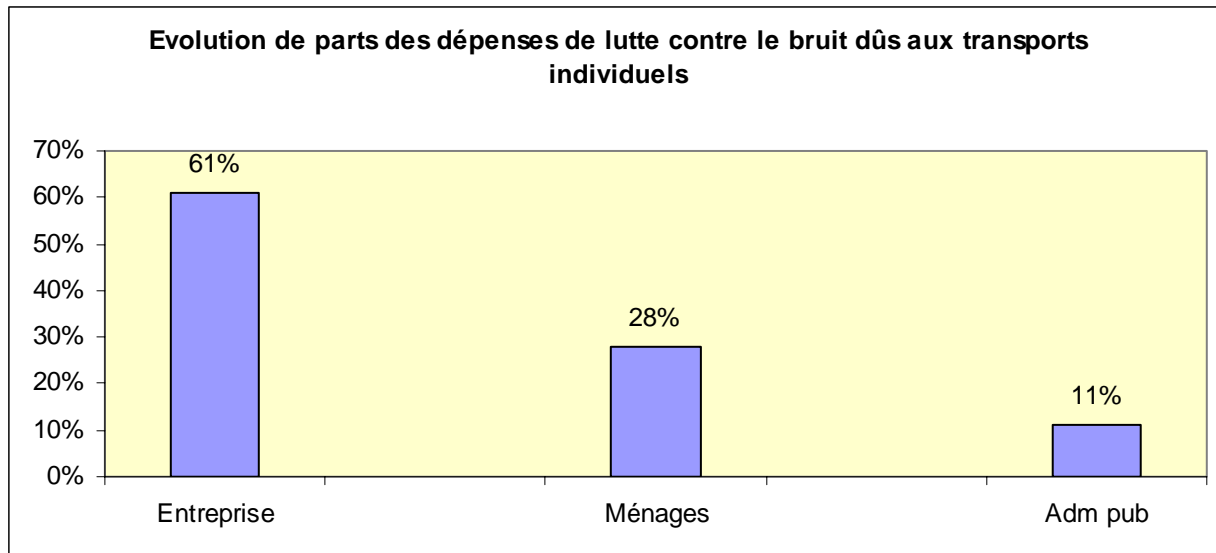
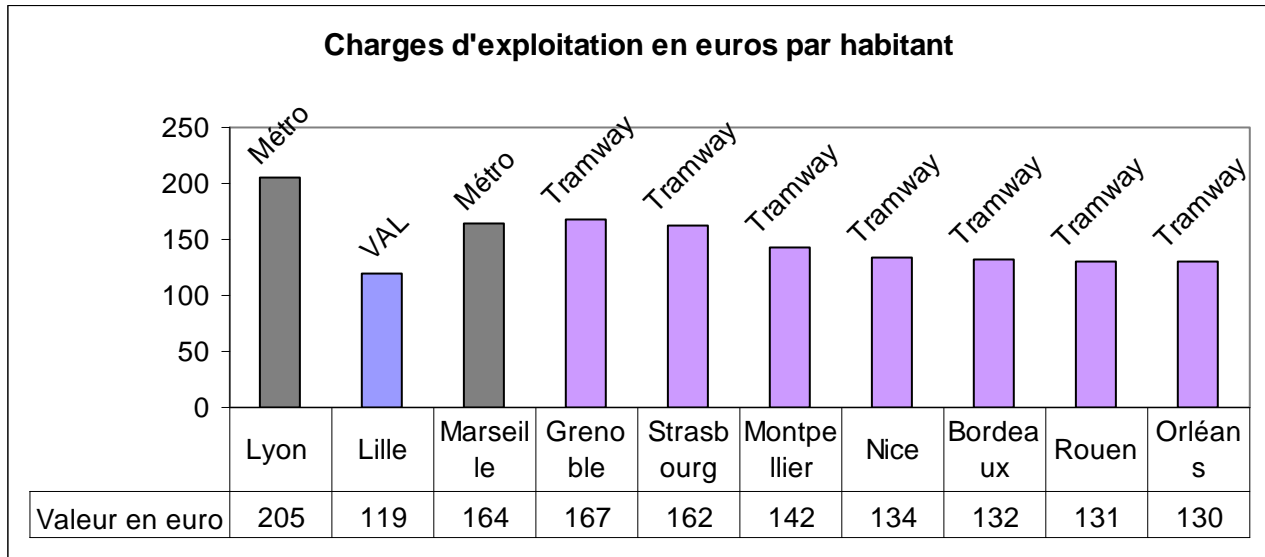


Figure 2-7 : Diagramme de variation des coûts d'exploitation pour un véhicule des transports en commun urbains par an et par kilomètre ([CER<sup>6</sup>], [STIF<sup>1</sup>], [CAB & al])

### 2.5.2.3 Charges d'exploitation par habitant en euros

Dans les principaux réseaux de transports en commun en site propre de France, le ratio des charges d'exploitation par habitant varie du simple au quasi triple. Lyon a le meilleur usage en terme de déplacements, mais aussi les charges d'exploitation les plus lourdes (205€/habitant pour le métro). Parmi les villes millionnaires, les charges par habitant sont très faibles à Lille (119 €/habitant pour le VAL) tandis que Marseille (164€/habitant pour le métro), ne s'éloigne pas trop de Lyon. Grenoble (167 €/habitant pour le tramway) et Strasbourg (162 €/habitant pour le tramway) se situent respectivement devant Lille et derrière Marseille. Montpellier (142 €/habitant pour le tramway), Nice (134 €/habitant pour le tramway), Bordeaux (132 €/habitant pour le tramway), Rouen (131 €/habitant pour le tramway), Orléans (130 €/habitant pour le tramway),

constituent un ensemble d'agglomérations moyennes à fortes charges d'exploitation par habitant [PAN].



**Figure 2-8 : Diagramme de Valeur des charges d'exploitation en euros par habitant en fonction du mode de transport [PAN].**

### 2.5.3 Les parts des TCSP dans les Pourcentage des Kilomètres Offerts des réseaux français

La part des transports en commun en site propre dans l'offre est directement liée au kilométrage mais aussi à la politique suivie par le reste du réseau. Elle progresse fortement. En 1998, seuls Lille et Marseille dépassaient 33 %. En 2001, Lille (Tramway : 10 %, VAL : 44 %), Marseille (Tramway : 1 %, Métro : 32 %), Nantes (Tramway : 36 %), Lyon (Tramway : 6 %, Métro : 33 %), Strasbourg (Tramway : 44 %) atteignaient des pourcentages forts. Cela s'explique par la constitution d'un véritable réseau de lignes fortes comme à Lyon avec 4 lignes de métro et 2 lignes de tramway, ou peut être interprété comme un poids trop faible donné au réseau autobus, qui assure la desserte fine mais aussi le rabattement sur le réseau des TCSP. On note toutefois que Grenoble avec 28 %, Saint Etienne 27 %, Montpellier 27 % pour une première ligne en 2000, puis Toulouse avec 20 % ne sont pas en reste [PAN].

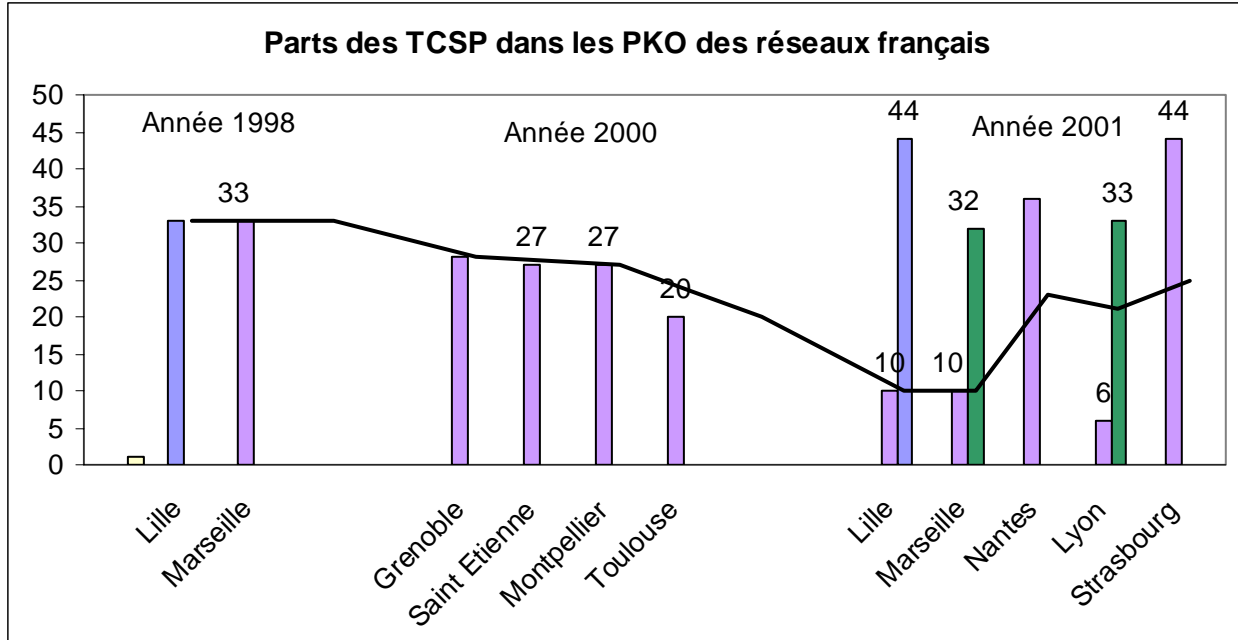


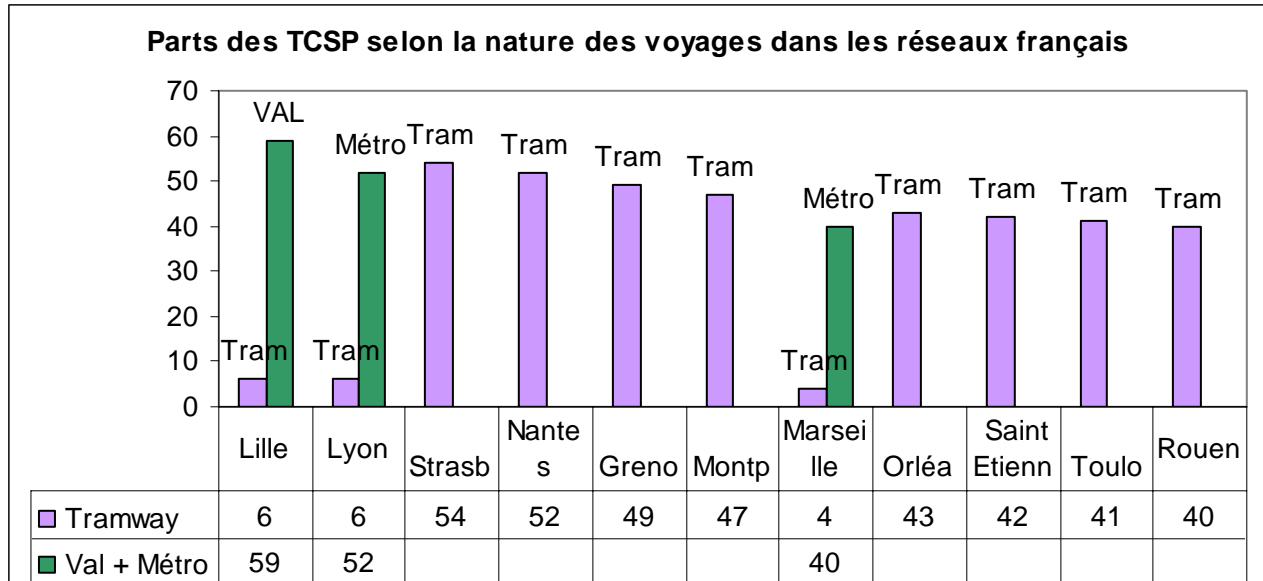
Figure 2-9 : Diagramme des parts des transports en commun en site propre dans les Pourcentage des Kilomètres Offerts (PKO) des réseaux français [PAN].

#### 2.5.4 Les parts des TCSP dans les natures de voyage des réseaux français

Dans toutes les agglomérations, les TCSP assurent 40 % des voyages du réseau. C'est un poids logique dans la mesure où ils sont construits là où la demande est la plus forte, à la place des lignes de bus les plus chargées de l'ancien réseau et où l'offre est restructurée pour optimiser leur utilisation.

Cette proportion est toutefois en très forte progression par rapport à 1998 où seul Lille dépassait 50 %.

Ainsi, dans les grandes et moyennes villes Lille (Tramway : 6 %, VAL : 59 %), Lyon (Tramway : 6 %, Métro : 52 %), Strasbourg (Tramway : 54 %), Nantes (Tramway : 52 %), Grenoble (Tramway : 49 %), Montpellier (Tramway : 47 %), Marseille (Tramway : 4 %, Métro : 40 %), Orléans (Tramway : 43 %), Saint Etienne (Tramway : 42 %), Toulouse (VAL : 41 %), Rouen (Tramway : 40 %), plus d'un déplacement sur deux se fait sur le TCSP. En particulier à Montpellier, un voyageur sur deux se déplace sur la seule nouvelle ligne de tramway [PAN].



**Figure 2-10 : Diagramme des parts des transports en commun en site propre dans la nature des voyages dans les réseaux français [PAN].**

### 2.5.5 La place des transports en commun dans le monde

Dans le monde, l'autobus est le mode de transport en commun le plus utilisé. En Amérique latine, les autobus sont les transports en commun en site propre les plus répandus, en couloirs réservés parfois, mais de façon générale ils circulent au milieu des autres véhicules. En France, trois quarts des transports en commun en site propre sont sur rail (tramway, métro, VAL, tram-train). Il s'agit presque toujours de tramway (2/3 des cas ; moins de 10 % pour le VAL). Le quart restant correspond aux voies réservées aux autobus. Pour les 300 réseaux de tramways en service dans le monde, les deux tiers sont en Europe et en ex-Union soviétique. Le VAL se développe rapidement dans les pays industrialisés. On le trouve aussi dans quelques villes riches de pays non industrialisés. Le métro lourd reste l'apanage des grandes métropoles (il existe dans plus de 70 grandes villes au monde).

Le métro assure plus de la moitié des déplacements urbains à Séoul et à Moscou. Les trolleybus électriques sont rares hors de l'Europe de l'Est et de l'ex-Union soviétique. Les lignes de trolleybus ont tendance à disparaître de nos jours en raison de leur coût d'entretien évalué au double de celui d'une ligne d'autobus. ([CER<sup>6</sup>], [IAURIF<sup>6</sup>], [GWI], [PHI], [TCU], [SCH], 50 - [SCH], [LAM], [GART], [HGT])

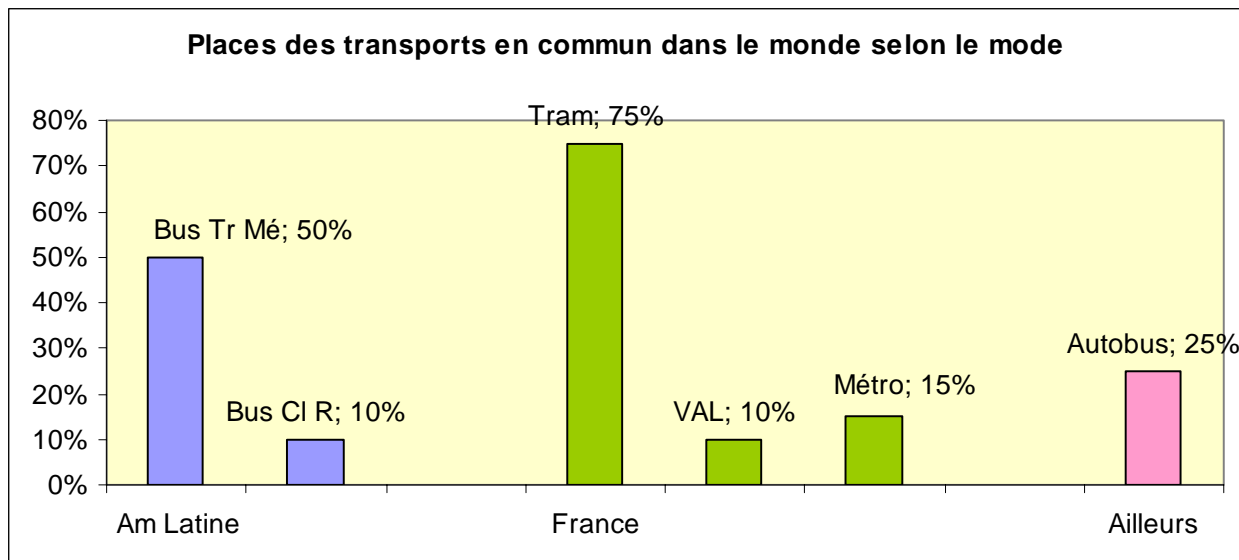


Figure 2-11 : Diagramme des parts des transports en commun en site propre dans la nature des voyages dans les réseaux français [PAN].

## 2.5.6 Le financement des transports urbains

Il concerne la provenance des moyens, les différents contributeurs, l'évolution des besoins, les modes de financements des transports en commun, les différents lois et décrets appliqués relatifs au financements des transports en commun. Dans ce qui suit, nous explicitons la provenance et ces différents acteurs.

### 2.5.6.1 Provenance des moyens

En France, le financement global des transports urbains (exploitation + investissements) représente 12,7 milliards d'euros en 2004 (7,2 milliards en Ile-de-France et 5,5 hors Ile-de-France).

Les sources de financement se répartissent entre les usagers (25 % en Ile-de-France, 18 % hors Ile-de-France), le versement transport payé par les employeurs (35 % en Ile-de-France, 39 % ailleurs), les collectivités locales (22 % en Ile-de-France, 24 % ailleurs), l'Etat (9 % en Ile-de-France, 1 % ailleurs), les emprunts et autres financements (7 % en Ile-de-France, 18 % ailleurs). En Ile-de-France, les employeurs remboursent à leurs salariés la moitié du coupon de Carte



orange. Ce remboursement représente à peu près le tiers du financement par les usagers, ce qui porte finalement la part des employeurs à 44 %.

Hors des rares agglomérations où les transports sont gratuits, les charges d'exploitation sont couvertes en moyenne à 34 % par la vente des titres de transport (le pourcentage va de 9 % à 72 % selon les agglomérations). La subvention annuelle des collectivités locales à l'exploitation du réseau s'élève en moyenne à 77 euros par personne habitant dans le périmètre desservi par les transports urbains. ([BOU], [TPU], [GART], [STIF<sup>1</sup>])

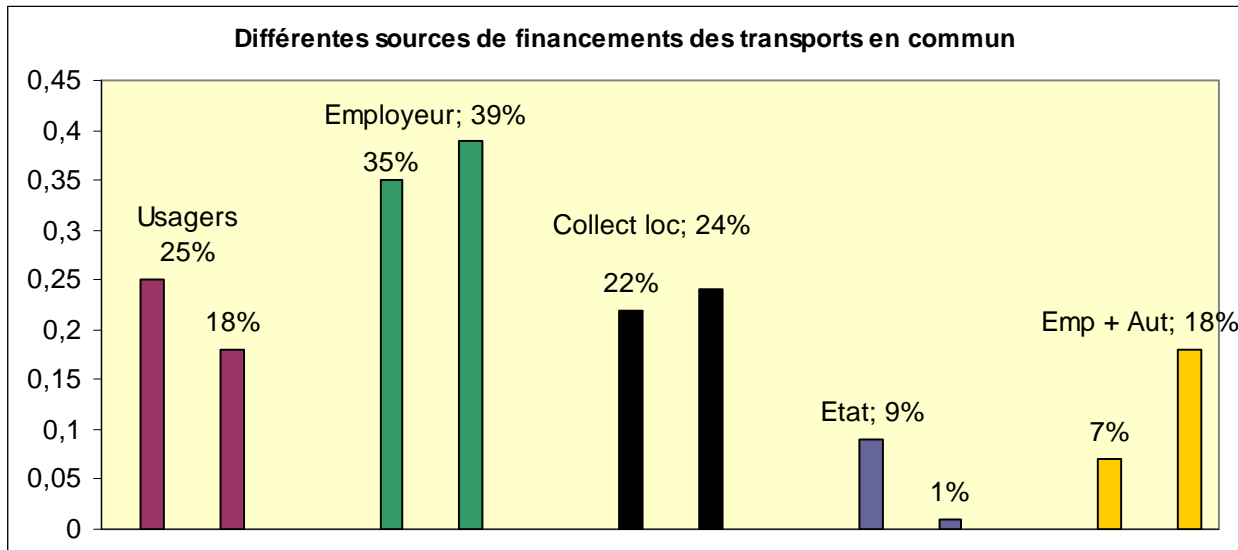


Figure 2-12 : Diagramme des parts des transports en commun en site propre dans la nature des voyages dans les réseaux français [PAN].

### 2.5.6.2 Contribution des employeurs

Depuis 1971, de nombreux employeurs sont soumis au versement transport. Sa création a été justifiée alors par le bénéfice indirect offert aux employeurs par un réseau de transports en commun leur donnant accès à un marché de l'emploi plus vaste. Depuis 1982, les employeurs d'Ile-de-France doivent en outre rembourser à leurs salariés la moitié de la Carte orange (ou titre assimilé) que ceux-ci ont payée.

Le versement transport est un impôt payé par tous les employeurs de dix personnes et plus dans un périmètre de transport urbain de plus de 10 000 habitants. Le périmètre de transport urbain est la zone qui est gérée par l'autorité organisatrice des transports urbains (en Ile-de-France, il couvre toute la région).

Le taux maximal du versement transport est fixé par la loi. Il est de 0,55 % de la masse salariale dans les agglomérations de moins de 100 000 habitants et de 1 % dans les autres. Il monte à 1,75 % dans les agglomérations de plus de 100 000 habitants qui ont décidé de réaliser une infrastructure de transport en commun en site propre. Le versement transport dépasse le taux maximal dans certaines agglomérations (par exemple 2,6 % à Paris et dans les Hauts-de-Seine).

Le taux est fixé par l'autorité organisatrice des transports urbains (généralement la communauté d'agglomération) dans les limites de ce qui est permis par la loi. En 2004, le versement transport était au taux maximal dans deux tiers des agglomérations. **([STP], [GER], [PHI], [TPU], [GART])**

### **2.5.6.3 Evolution des besoins de financement pour les transports en commun urbains**

Depuis plus de trente ans les dépenses de fonctionnement et d'investissement des transports en commun sont en augmentation constante en France. Rien ne laisse prévoir une inversion de cette tendance. Sur la base du budget consacré aux transports en commun urbains en 2001, les experts ont prévu que les besoins annuels de ce secteur seront compris entre 9,5 et 12,5 milliards d'euros selon l'importance des nouveaux investissements (principalement la création de transports en site propre).

La valeur de 9,5 milliards d'euros correspond à un statu quo, c'est-à-dire avec aucune nouvelle infrastructure de transport en commun urbain créée, les réseaux existants étant exploités avec le matériel existant. L'exploitation absorberait 8,8 milliards d'euros. Les opérations de maintenance et de réhabilitation minimales de l'infrastructure pour en assurer la sécurité consommeraient environ 700 millions d'euros.

La valeur de 12,5 milliards d'euros correspond à une politique volontariste de développement des transports publics urbains, pour laquelle 3,7 milliards d'euros seraient annuellement consacrés à l'investissement (soit environ le double de l'effort d'investissement actuel) et 8,8 milliards à l'exploitation.

En 2001 le budget consacré aux transports en commun s'est élevé à 10,6 milliards d'euros (exploitation : 8,8 milliards, investissement : 1,8 milliard) dont 7,1 milliards d'euros pour l'Ile-de-France et 3,5 milliards d'euros pour l'ensemble des autres agglomérations françaises **([PHI], [TPU])**.

#### 2.5.6.4 Comment financer l'évolution des besoins des transports en commun

L'augmentation de la contribution des employeurs (notamment le versement transport qui représente 39 % du financement global) a jusqu'ici permis de faire face à l'augmentation des coûts. Mais il semble admis qu'une augmentation du taux du versement transport n'est plus envisageable dans les grandes agglomérations. Une solution consisterait à étendre cet impôt aux employeurs des zones périurbaines. Une autre source de financement est l'augmentation de la part des amendes pour stationnement interdit reversée aux autorités organisatrices des transports (actuellement le reversement est de 20 % en Ile-de-France).

A côté de ces mesures qui nécessitent des modifications législatives, des choix sont possibles à l'échelle des collectivités locales :

- Augmenter la contribution des usagers à travers l'augmentation des tarifs ou de la fréquentation. Toutefois, l'expérience montre que l'augmentation de fréquentation consécutive à une baisse de tarifs ne compense généralement pas la perte de revenus.
- Accroître la contribution des automobilistes en augmentant les recettes liées au stationnement (taxe sur les parkings des bureaux, des supermarchés et centres commerciaux ; augmentation du prix du stationnement public). Dans l'idéal, le montant des taxes est tel qu'il maximise les recettes sans dissuader les automobilistes d'utiliser leur voiture.
- Améliorer la valorisation du foncier en tenant compte des plus-values générées par la présence de nouvelles gares lors de la fixation des taxes sur le foncier et l'immobilier. La mise en oeuvre d'une telle mesure est relativement simple dans le cas du développement d'une nouvelle zone urbaine combinée avec la création d'une ligne de transports en commun. En revanche, son application à des situations établies est plus délicate.

Par ailleurs, pour augmenter l'attractivité des transports en commun, tous les employeurs pourraient être obligés de rembourser à leurs employés la moitié de l'abonnement que ceux-ci ont payé, comme cela se pratique déjà en Ile-de-France ([IAURIF<sup>7</sup>], [TPU], [STIF<sup>1</sup>]).

### **2.5.6.5 Financement des transports en commun par contrat de partenariat public -privé**

Dans les faits l'utilisation du contrat de partenariat public -privé (PPP) reste exceptionnelle pour les transports urbains (fin 2005 : quelques cas au Royaume-Uni et au Danemark mais aucun en France).

Depuis 2004 l'introduction en France du PPP ouvre la perspective d'un nouveau type de relations contractuelles public -privé. Un tel contrat autorise une collectivité publique à confier à une entreprise la mission globale d'un service public tel qu'un réseau de transport urbain pris dans sa globalité (financement, conception, construction, maintenance et gestion).

Le PPP se distingue de la délégation de services publics par le mode de rémunération et par la répartition des responsabilités entre l'entreprise et les pouvoirs publics. Les risques sont partagés entre toutes les parties (pouvoirs publics, banques, opérateurs...) au cours de la négociation préalable à la signature du contrat. Ainsi, le secteur privé n'est plus le seul à les supporter.

Le PPP diffère des marchés publics dont la démarche est davantage centrée sur des choix techniques. L'expérience a montré que la procédure des marchés publics manque de flexibilité nécessaire aux projets très complexes car elle interdit aux pouvoirs publics de discuter avec chaque candidat de tous les aspects du marché.

Enfin, les pouvoirs publics voient souvent dans le PPP un moyen de ne pas s'endetter puisque le financement est apporté par le partenaire privé.

Cependant, l'élaboration d'un PPP est une opération longue et complexe et à ce jour en France, les pouvoirs publics continuent de déterminer la politique de transport (grandes orientations, tarification, investissement) et d'en déléguer l'exploitation à des entreprises ou de l'assurer en régie (**[PHI], [GCP], [DCE], [GART], [LJO], [PPP], [E.PPP]**).

### **2.5.6.6 Financement des transports en commun par la loi du marché**

De fait, les transports en commun restent subventionnés dans la plupart des grandes villes du monde. Les expériences de privatisation des transports ont montré que le marché ne répond aux attentes des usagers qu'à condition d'être très fortement encadré par les pouvoirs publics.

Dans le cas contraire, on constate que :

- Les services non rentables sont supprimés, même lorsqu'ils sont socialement importants.

- La procédure des appels d'offres conduit à retenir des services ne répondant pas aux attentes de la majorité des usagers.
- Les entreprises ne font rien pour faciliter la vie des usagers utilisant plusieurs modes de transport.
- En outre la lutte contre les nuisances (embouteillages, effets sur l'environnement, etc.) n'est pas financée, sauf lorsqu'elle fait par ailleurs l'objet d'une taxation directe et spécifique.

Le prix du billet est le résultat d'un compromis entre un prix assez bas pour inciter la population à utiliser les transports en commun et un prix assez élevé pour financer le service. Un prix suffisamment attractif pour augmenter sensiblement la part des transports en commun dans les déplacements urbains entraîne forcément un manque à gagner (qui doit être compensé par des subventions). Il est apparu jusqu'à présent impossible de trouver un équilibre permettant de financer le service par les seules recettes commerciales. **([LAR], [GWI])**

### **2.5.7 Le système de tarification**

La création d'un abonnement illimité donnant accès à l'ensemble des transports en commun d'une aire urbaine nécessite une profonde modification des politiques tarifaires. Il faut remplacer la tarification selon la distance parcourue par une tarification forfaitaire. Il faut ensuite aboutir à un partage équitable des recettes entre les différents prestataires. Mais la création d'un tel titre de transport entraîne une augmentation de la fréquentation des transports en commun. Ainsi, l'introduction de la Carte orange a augmenté de 33 % la fréquentation des transports en commun en Ile-de-France. En 2006, les autres régions françaises n'avaient pas l'équivalent de la Carte orange.

L'histoire de la Carte orange en Ile-de-France illustre la complexité des problèmes à résoudre pour créer un abonnement illimité. L'idée est apparue vers 1970 mais la Carte orange n'a été lancée qu'en 1975. Elle a été complétée en 1998 par la carte Imagine R destinée aux collégiens, lycéens et étudiants. Depuis juillet 2005, le coupon magnétique de la Carte orange est remplacé progressivement par un passe sans contact appelée Navigo.

Le calcul de la répartition des recettes entre les différentes entreprises de transport est encore plus complexe pour les tickets vendus hors abonnement. Depuis 2003, un même ticket peut être utilisé indifféremment pour tous les transports en commun dans Paris *intra muros* et pour

l'ensemble des réseaux d'autobus de l'Ile-de-France. Mais il ne s'agit pas encore d'un ticket permettant de prendre une correspondance sans repayer dès lors que l'on quitte l'emprise du métro ou du RER (en Ile-de-France 84 % des déplacements en transports en commun comportent au moins une correspondance). Le ticket horaire multimodal, qui permet de prendre une correspondance sans repayer, est fréquent en province lorsque le transport est assuré par une seule société **([CAR<sup>1</sup>], [STP], [TRAN], [BER & al], [AUT], [STIF<sup>3</sup>])**

### **2.9.8 Modulation des tarifs des transports en commun selon des critères sociaux**

Dès les années 1850, certaines compagnies de chemin de fer proposaient des cartes hebdomadaires à tarif réduit aux ouvriers. Les pouvoirs publics ont imposé l'extension de cette mesure à l'ensemble des réseaux en 1885. Il s'est avéré très rapidement qu'il était impossible de limiter la mesure aux seuls ouvriers, et les abonnements à tarif réduit furent rendus accessibles aux autres catégories sociales au début des années 1900.

La différence entre tarif réduit et plein tarif était importante (la réduction dépassait 80 %). En 1896 par exemple, 11,5 % des voyageurs de la ligne de Vincennes bénéficiaient d'un abonnement ouvrier ; ils n'apportaient que 4 % des recettes. Dans le même temps, les abonnés au tarif plein représentaient 1 % des voyageurs et apportaient 15 % des recettes **[CAR<sup>2</sup>]**.

### **2.5.8 Effets des transports en commun sur les impacts atmosphériques**

Les économistes ont étudié différents scénarios permettant d'atteindre les objectifs suivants d'ici 2030 :

- diminution de 80 % des émissions de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, méthane) par rapport à 1990.
- diminution de 90 % des polluants (oxydes d'azote, particules, benzène, etc.) par rapport à 1990.
- niveau de bruit égal ou inférieur à 55 dB de jour et à 45 dB de nuit à l'intérieur des habitations.
- réduction des espaces consacrés aux infrastructures de transport par rapport à 1990.

Avec des changements exclusivement technologiques, la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> suppose un parc automobile composé principalement de voitures électriques alimentées par pile

à combustible. La production de l'hydrogène pour la pile à combustible ne doit pas dégager de CO<sub>2</sub> (la technique opérationnelle actuellement est l'électricité nucléaire). Cette solution supprime en même temps les émissions de polluants et la majeure partie du bruit dans les zones urbaines. Elle n'a pas d'effet sur l'espace consacré aux infrastructures.

Sans évolution technologique importante, il faut réduire la demande de transport et modifier la répartition des trafics en faveur de modes non ou peu polluants (rail, voie d'eau, transport en commun, vélo, marche à pied). Malgré tout, il serait très difficile d'aboutir ainsi à une réduction suffisante des émissions de CO<sub>2</sub>. Il faut d'énormes changements des comportements, des mentalités et des priorités sociales, ce qui pose le problème de l'acceptabilité sociale et politique de cette solution.

Des solutions intermédiaires sont possibles avec des piles à combustible utilisant de l'hydrogène produit dans la voiture par décomposition du gaz naturel (reformage). Mais elles nécessitent toujours une importante évolution des mentalités et des transformations dans l'urbanisme.

Ces études ne disent rien du traitement des déchets nucléaires qui seront quasi-inévitablement générés par la production de quantités importantes d'hydrogène **([CAB & al], [PREDIT])**.

### **2.5.8.1 Production de gaz à effet de serre**

En France, le gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) compte pour 71 % dans l'accroissement de l'effet de serre (mesuré selon l'indicateur du Pouvoir de Réchauffement Global – PRG). Les transports routiers sont les premiers responsables des émissions de CO<sub>2</sub> (24 % des émissions de CO<sub>2</sub> en France en 2004 contre 2 % pour les autres modes de transport). Les déplacements urbains sont responsables de 41 % des émissions de CO<sub>2</sub> dues au transport routier et les déplacements périurbains de 26 %. Les véhicules particuliers sont responsables de 65 % des émissions de CO<sub>2</sub> dues aux déplacements urbains et périurbains, les véhicules utilitaires de 30 %, les transports en commun de 3 % et les deux-roues de 2 %.

La production de gaz carbonique par habitant imputable aux transports a été multipliée par 3,2 de 1960 à 2000. Cependant, si elle a doublé de 1960 à 1973 (+ 103 %), son augmentation s'est ralentie entre 1973 et 2000 (+ 56 %) malgré l'augmentation du trafic. Ce ralentissement est à mettre au crédit des progrès technologiques. Si la technique automobile n'avait pas évolué depuis 1973, les émissions de CO<sub>2</sub> dues aux transports urbains et périurbains seraient 1,7 fois plus élevées **([HER], [WID], [DSD<sup>2</sup>], [IAURIF<sup>8</sup>], [IAURIF<sup>8</sup>], [CAB & al], [CITEPA])**

### **2.5.8.2 Moyen de réduction des émissions de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>)**

L'utilisation de la biomasse (arbres, plantes, déchets organiques, etc.) comme source d'énergie n'augmente pas la quantité de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère car le CO<sub>2</sub> produit par sa combustion (ou sa décomposition naturelle par pourrissement) est totalement recyclé par les plantes et les océans. En revanche, la consommation massive d'énergie fossile (charbon, pétrole, gaz naturel) a libéré en quelques années du CO<sub>2</sub> accumulé durant plusieurs millénaires. Cette utilisation a ainsi introduit un excès de CO<sub>2</sub> qui n'a pas encore trouvé sa place dans le cycle de la matière organique et a contribué à l'augmentation de l'effet de serre.

En dehors du CO<sub>2</sub> fossile émis lors de leur production (culture, engrais, distillation, etc.), les biocarburants n'augmentent pas les émissions de CO<sub>2</sub>. L'émission de CO<sub>2</sub> est de 2 à 7 fois plus faible lorsqu'on remplace l'essence par l'alcool ou le gazole par le diester (biodiesel). L'efficacité dépend du mode de production, elle est maximale avec l'alcool de canne à sucre. La synthèse de gazole à partir de déchets de bois, devrait permettre de réduire de 12 fois les émissions de CO<sub>2</sub>. En 2006, la technique était évaluée dans des usines pilotes.

Le coût des biocarburants par rapport au pétrole est très compliqué à évaluer, ce qui explique les divergences selon les auteurs. En 2005, il était admis que le biodiesel deviendra compétitif en France lorsque le pétrole sera à 75 dollars le baril et l'alcool lorsque le pétrole dépassera 90 dollars le baril. En incluant les mesures incitatives (subventions, défiscalisation), économiser une tonne de CO<sub>2</sub> fossile coûtait alors 270 euros tandis que l'émission d'une tonne de CO<sub>2</sub> fossile s'échangeait à 20 ou 25 euros sur le marché des permis d'émission de CO<sub>2</sub> (elle valait officiellement 27 euros) ([BOI], [INS], [DSD<sup>2</sup>], [DSD<sup>3</sup>], [ADEM], [AGRICE], [CAB & al], [RAP], [PRE & al])

### **2.5.8.3 Pollution par la circulation automobile en ville et sur la route**

Elle est importante parce que les distances parcourues à chaque déplacement sont faibles et que le moteur n'a pas le temps d'atteindre la température de fonctionnement optimale. A froid, l'huile est visqueuse et les pots catalytiques inefficaces. Démarrer avec un moteur froid



augmente la consommation de 50 % au cours du premier kilomètre et les émissions de polluants sont de dix à quinze fois plus élevées qu'à chaud.

En outre, la climatisation fonctionne à fond au démarrage pour amener l'habitacle à la bonne température et génère une surconsommation pouvant atteindre 30 %. Celle-ci n'est que de 10 % sur autoroute où l'énergie est utilisée seulement pour maintenir la température.

La consommation d'énergie, donc la pollution de l'air, dépend aussi de facteurs plus généraux : l'entretien du véhicule, le type de conduite **[IAURIF<sup>5</sup>]**.

#### **2.5.8.4 Evolution de la pollution de l'air en ville**

En dépit d'un accroissement important du trafic routier et grâce au progrès technique, l'air en ville est de moins en moins pollué (avec une exception : les micro-particules). Les autres polluants (oxydes d'azote, monoxyde de carbone (CO), benzène, ozone, etc.) ont baissé dans des proportions variables. En 2003, les émissions d'oxydes d'azote étaient 1,5 fois moins importantes qu'en 1994 et celles de monoxyde de carbone et de benzène 3 fois moindres. Mais la réglementation européenne a anticipé ces progrès, de sorte que les seuils en vigueur continuent à être dépassés, surtout à proximité des axes routiers.

Les progrès sont moins nets pour l'ozone. En effet la concentration de ce polluant ne dépend pas que du trafic routier, mais aussi des conditions météorologiques. L'ozone est produit par l'action du soleil sur l'oxygène de l'air en présence d'oxydes d'azote et de benzène. En outre, l'ozone est transporté par le vent et peut s'accumuler loin de son lieu de production.

La concentration de micro-particules s'est élevée depuis 2000 en raison de l'augmentation du parc de véhicules diesel, avec des conséquences importantes en termes de santé publique. Les experts estiment en effet que la pollution par les micro-particules raccourcit la vie des citoyens de deux mois à un an (**[SAU], [ECC], [IAURIF<sup>5</sup>], [AFSSE], [IAURIF<sup>8</sup>], [CAB & al], [CITEPA<sup>2</sup>], [DEM]**)

#### **2.5.8.5 Valorisation du Gaz Naturel**

Elle consiste à présenter les avantages du Gaz Naturel par rapport à d'autres carburants provenant des énergies fossiles. En effet, le Bus au Gaz Naturel semble de nos jours être l'un des moyens des transports en commun urbains le plus utilisé en raison du fait qu'il est moins

polluant et surtout de son coût d'achat faible et donc reste accessible même aux pays en voie de développement. Dans ce qui suit, nous donnons une présentation un peu détaillée du Gaz Naturel.

#### **2.5.8.5.1                      Présentation et avantages du GNV**

Le gaz naturel est à ce jour le carburant alternatif au diesel qui est le plus répandu pour la propulsion des autobus. La combustion du gaz naturel ne produit ni oxyde de soufre, ni plomb, ni poussières et peu d'oxydes d'azote. De tous les hydrocarbures, le gaz naturel est celui qui dégage à la combustion le moins de monoxyde de carbone. Il n'émet ni fumées noires, ni odeurs. La combustion du carburant gaz naturel est plus lente que celle des autres hydrocarbures. Elle permet une réduction significative des vibrations et par conséquent du volume sonore des moteurs. Le niveau de bruit est abaissé d'environ 4 décibels, c'est-à-dire divisé par deux par rapport à un moteur diesel.

#### **2.5.8.5.2                      Bref historique du GNV**

Renault Véhicules Industriels RVI travaille sur la propulsion des bus au carburant gaz depuis 1985. Les villes de Lille, Lyon et Marseille expérimentent depuis mars 1994 des autobus écologiques (des PR 100 au GNV). L'autobus Agora Gaz Naturel est l'aboutissement de deux ans de tests grandeur nature.

#### **2.5.8.5.3                      Les autobus GNV**

Aujourd'hui en France, plusieurs constructeurs proposent des autobus au gaz naturel : Irisbus, Heuliez Bus, Volvo et Mercedes, ainsi que récemment le constructeur Vanhool..



**Photo 2-11 : image d'un Bus Heuliez au Gaz Naturel [SWC.II 11]**

#### **2.5.8.5.4 Sécurité**

Le bus au gaz naturel a subi de nombreux tests qui permettent de garantir une sécurité à toute épreuve : les réservoirs du bus sont implantés en toiture dans un compartiment séparé de l'habitacle des voyageurs. Le gaz est maintenu dans les réservoirs à une pression de 200 bars. Cette pression est réduite à 10 bars avant l'injection.

#### **2.5.8.5.5 Les coûts**

A l'achat, un bus GNV coûte en moyenne 38 000 € (250 000 F) de plus que son équivalent diesel (soit 15 % de plus).

Toutefois, à partir d'un parc d'une vingtaine de bus, l'économie est de 40 à 50 centimes de Francs du km, le prix du gaz étant dégressif en fonction de la quantité demandée.

#### **2.5.8.5.6 Les équipements nécessaires**

L'arrivée de bus GNV dans un réseau nécessite bien évidemment quelques aménagements pour l'alimentation et la maintenance de ces bus. Les zones couvertes où les bus GNV sont amenés à se rendre doivent être munies d'une ventilation performante et de détecteurs de gaz

situés en partie haute. Pour assurer le remplissage en carburant, la construction d'une station de compression s'impose.



**Photo 2-12 : Installations GNV à Poitiers comprenant les 2 modules de compression et les 22 emplacements de remisage extérieur. [SWC.II 12]**

#### **2.5.8.5.7 Mélange GNV et hydrogène**

Des expérimentations sont actuellement menées à Dunkerque (bus Agora GNV) et Toulouse (trois bus GX 327 GNV) avec l'utilisation d'un mélange GNV et hydrogène, baptisé Hythane. L'objectif est de proposer une transition souple à l'hydrogène utilisant des technologies et des infrastructures disponibles. Ce mélange permet d'obtenir de meilleures performances techniques (rendement moteur) et environnementales (moins de CO<sub>2</sub> et de polluants locaux).

#### **2.5.8.5.8 L'accessibilité des transports en commun**

En plus des véhicules à plancher surbaissés, près de la moitié des nouveaux bus mis en service sont équipés d'une palette rétractable pour permettre l'accès des personnes à mobilité réduite dans le bus.

Ce dossier fait le point sur les équipements pouvant faciliter la mobilité de ces personnes.  
Plancher bas.



**Photo 2-13 : Accessibilité du Bus Renault Agora (Chambéry), équipement à plancher bas + Usager en Fauteuil Roulant (UFR). [SWC.II 13]**

L'ACCESS'BUS GX 317 par exemple est le premier autobus français disposant d'un plancher bas, c'est-à-dire, accessible sans marches. La dernière innovation dans le domaine de l'autobus surbaissé est le plancher bas intégral. Le bus a un plancher entièrement plat et accessible sans marches aux 3 portes. Le développement du moteur -roue permet au CiViS de proposer également un plancher bas et plat intégral.

#### **2.5.8.5.9**

#### **Palette et emplacement(s) UFR**



**Photo 2-14 : Structure d'un bus dotée d'une rampe d'accès rétractable faisant le lien entre le trottoir et le plancher du bus. [SWC.II 14]**



**Photo 2-15 : Palette sortie actionnée par le conducteur progressivement. [SWC.II 15]**



**Photo 2-16 : Emplacement spécifique réservé au fauteuil roulant. Un bouton spécifique "arrêt demandé" est disposé à portée de main de l'utilisateur. [SWC.II 16]**

Deux emplacements pour UFR sont disponibles à l'intérieur de certains bus des réseaux de Gap et Grenoble. On note que si le trottoir est trop bas, le bus peut s'agenouiller du côté droit, permettant de descendre la hauteur d'accès de 80 mm, soit 240 mm contre 320, sans abaissement.

#### **2.5.8.5.10 Aménagement intérieur des autobus**

L'aménagement intérieur doit permettre aux voyageurs de circuler facilement dans le véhicule et de voyager assis ou debout. Un autobus standard possède entre 20 et 40 places assises selon

la configuration retenue. L'aménagement doit tenir compte des contraintes techniques : passages de roues, emplacements des portes.



**Photo 2-17 : Aménagement intérieur des autobus. [SWC.II 17] [**

#### **2.5.8.6 Présentation d'une étude économique et financière**

Pour donner une idée des coûts de Génie Civil, d'investissement ou encore d'exploitation, nous comparons dans cette partie les dépenses effectuées pour la construction et l'exploitation d'un Tramway, puis la construction et l'exploitation d'un Métro automatique. En effet, la qualité et l'attractivité du transport public urbain ont bénéficié de plusieurs innovations technologiques ces vingt dernières années. Les conditions d'exploitation se sont transformées, avec une sécurité et une souplesse améliorées; l'adaptation aux besoins des passagers et des exploitants sont assurées grâce aux possibilités offertes par l'automatisation des systèmes légers comme le VAL. Néanmoins, le Tramway gagne du terrain en France. Les systèmes de métro automatique présentent des caractéristiques intermédiaires entre celles des autobus circulant sur voie banalisée et celles des métros conventionnels en site propre intégral, mais du point de vue des coûts d'investissement, le Tramway peut aussi offrir un service et des coûts d'exploitation similaires.

Dans cette partie sont présentés à titre de comparaison, les deux types de systèmes exploités en France depuis plus de 50 ans pour le Tramway et plus de 15 ans pour le métro automatique.

### 2.5.8.6.1 Cas du Tramway

Le tramway utilise un espace au sol réduit pour le stationnement et rentabilise au mieux la capacité d'écoulement des voies de circulation : il a un impact faible sur la consommation d'espace et sur l'environnement. La qualité de service et la capacité du Tramway dépendent du type et de la taille des véhicules, des moyens utilisés pour réaliser la séparation des sites et du niveau de séparation dans le centre des villes. Quand il n'y a pas d'espace au sol dans le centre de la ville, il devient nécessaire de mettre en oeuvre des travaux importants pour construire les voies en souterrain, ce qui a pour conséquence la perte de quelques avantages du point de vue des investissements. Enfin, le choix du site de construction du Tramway a aussi une influence sur la capacité que peut offrir la ligne à l'heure de pointe. Le diagramme ci-dessous rappelle quelques fourchettes de coût du génie civil (au kilomètre de voie double sans les rails et les équipements pour l'énergie) selon que le tronçon se situe en surface, en souterrain ou sur viaduc.

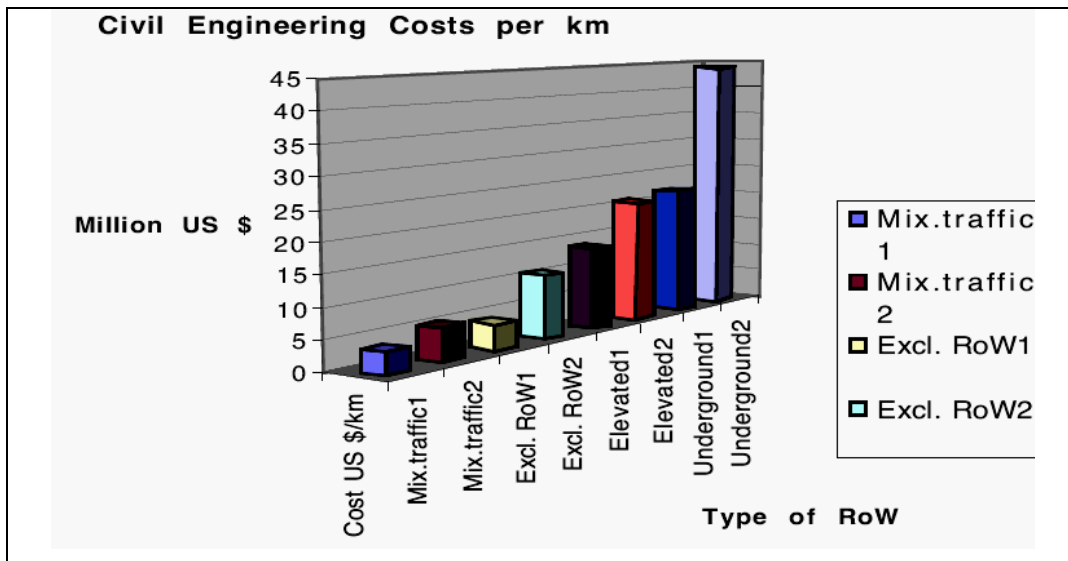


Figure 2-13 : Diagramme des coûts de Génie Civil d'un Tramway en million de dollars par kilomètre de ligne selon le type de site [KUH<sup>1</sup>], [KUH<sup>2</sup> & al], [KUH<sup>3</sup> & al], [PIER].



### 2.5.8.6.2

### Cas du Métro automatique

Le Métro automatique incarne la réussite de l'application de l'automatisme intégral de conduite aux nouveaux systèmes de transport qui a pour conséquence des performances techniques intéressantes (vitesses élevées, réduction des intervalles entre rames, accroissement de la sécurité) que la conduite humaine ne permettait pas d'obtenir. Aux heures de pointe c'est-à-dire à celles où la conduite doit être la plus performante et où l'attention des conducteurs risquerait d'être sollicitée au-delà de ce qui est humainement possible, sur le réseau de métro urbain de Paris et d'autres réseaux à travers le monde, la plupart des lignes fonctionnent depuis plus de vingt ans déjà en automatique. Dans tous les cas, ce sont des systèmes qui circulent sur site propre intégral, en automatique, avec des véhicules aux caractéristiques tout à fait variées. Ces systèmes sont exploités avec une haute fréquence qui peut être aussi obtenue aux heures creuses grâce à un fractionnement des rames entre heures de pointe et heures creuses. Cela leur permet d'avoir des capacités assez souvent supérieures ou équivalentes à celles des Tramways. En effet, un métro automatique (type VAL) circulant en rame d'un véhicule avec un intervalle de 72 secondes offre une capacité de 8000 passagers par heure [KUH<sup>3</sup>], [GAR & al] et par sens et nécessite une longueur de quai de 26 mètres. De plus une haute fréquence de passage dans les stations évite d'emmagasiner un nombre élevé de voyageurs et permet de réduire les dimensions des stations.

A Grenoble, le Tramway offre 175 places en charge normale et 240 en charge exceptionnelle (soit 6 passagers debout au m<sup>2</sup>) ; ce qui correspond à un débit horaire d'environ 4000 passagers en adoptant une fréquence de passage de 4 minutes [MST].

Mais, les objectifs de réduction de coûts d'un moyen de transport, adaptable à une demande dont l'importance et la structure justifient normalement le passage à un moyen de transport plus performant tout en apportant au public une très haute qualité de service, ont permis de définir pour Lille le petit gabarit du système Val, sa haute fréquence de passage à l'heure de pointe et la nécessité technico-économique de concevoir son automatisation intégrale.

Ce type d'automatisation sans aucun conducteur à bord, a bien entendu posé des problèmes spécifiques et donné lieu à des solutions techniques spécifiques qui n'auraient pas été les mêmes pour les métros classiques disposant d'un conducteur : ainsi les portes palières fermant les quais des stations, les nombreuses redondances d'équipements permettant de garantir une très haute disponibilité sans besoin d'intervention humaine immédiate, la nécessité de développer fortement les moyens de surveillance et de communication. Pour ce genre de

systèmes, les coûts de génie civil (hors armement de la voie) se situent dans une fourchette de prix tels que présentés dans le diagramme ci-après :

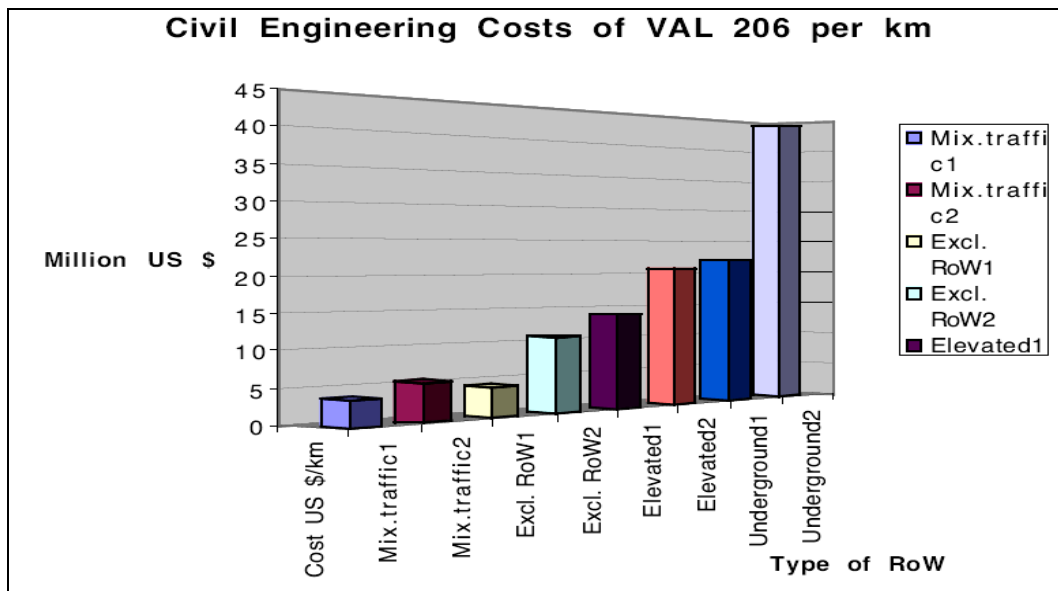


Figure 2-14 : Diagramme des coûts de Génie Civil du Val 206 en million de dollars par kilomètre de ligne selon le type de site [KUH<sup>1</sup>], [KUH<sup>2</sup> & al], [KUH<sup>3</sup> & al], [PIER].

### 2.5.8.6.3 Comparaison des 2 systèmes : le tramway et le métro automatique

#### 2.5.8.6.3.1 Les coûts d'investissement

Les coûts d'investissement que nous présentons ici sont basés sur plusieurs projets de tramway en France. Nous essayons d'évaluer les coûts d'investissement de chaque système. Ces coûts se situent dans une fourchette telle que présentée dans l'histogramme 3 ci-après.

La fourchette des coûts dans le poste "Génie civil et dépenses annexes" s'explique en partie par les variations constatées sur les ouvrages d'art et sur le dépôt-atelier, qui est soit dimensionné pour la ligne, soit le futur réseau ou est simplement agrandi. La variation des dépenses annexes s'explique en partie par les variations du coût des opérations d'accompagnement.

La fourchette des coûts dans le poste "Système Tramway" s'explique en partie par la variation de l'offre nécessaire, c'est à dire le nombre de rames et la puissance dont on doit disposer.

En ce qui concerne le système VAL, l'ensemble des lignes actuellement en service nous permettent de dresser le constat suivant, en distinguant 2 postes, le coût du génie civil et le coût

des équipements liés au système avec le matériel roulant. Ces coûts sont dans une fourchette de prix présentée dans l'histogramme 4. On rappelle qu'en charge normale un véhicule Val 206 offre 160 places (4 passagers debout au m<sup>2</sup>) et 218 places (6 passagers debout au m<sup>2</sup>) en charge exceptionnelle.

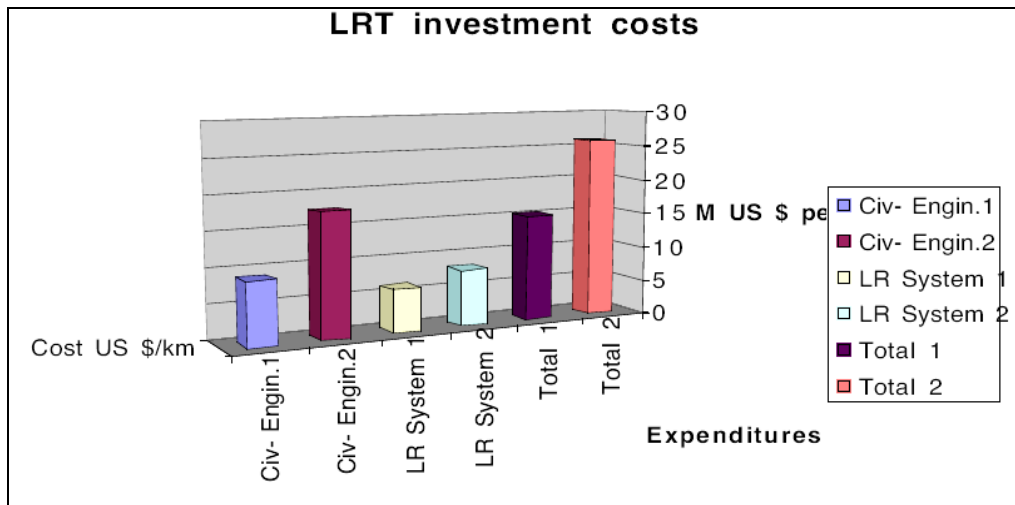


Figure 2-15 : Diagramme des coûts d'investissement d'un Système Léger de Transport en dollars par kilomètre de ligne selon le type de site [KUH<sup>1</sup>], [KUH<sup>2</sup> & al], [KUH<sup>3</sup> & al], [PIER], [GAR & al]..

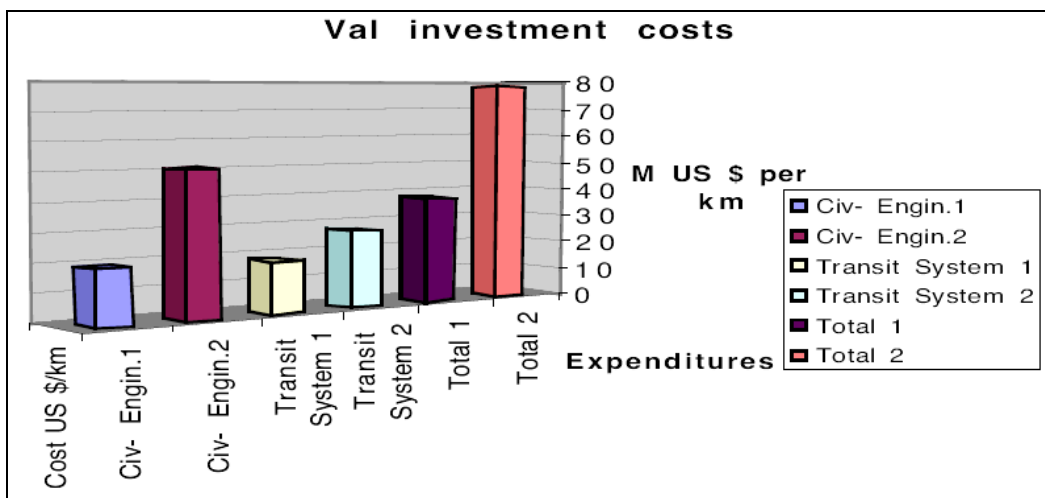


Figure 2-16 : Diagramme des coûts d'investissement du VAL en dollars par kilomètre de ligne selon le type de site [KUH<sup>1</sup>], [KUH<sup>2</sup> & al], [KUH<sup>3</sup> & al], [PIER], [GAR & al]..

La fourchette des coûts dans le poste "Génie civil" s'explique en partie par le pourcentage de travaux en souterrain : ainsi, 3 lignes avec 80 % de leur linéaire en tunnel, une ligne avec 90 %, enfin une ligne avec 40 %.

La fourchette des coûts dans le poste "Système et matériel roulant" s'explique en partie par le nombre de rames/km exploité pour chacune des lignes : ainsi 2 lignes exploitent 3,17 rames/km, 1 ligne 2,98 rames/km, 1 ligne 1,7 rames/km, enfin 1 ligne 1,11 rame/km.

Dans cet exemple, les lignes de Tramway sont dimensionnées pour offrir des débits de l'ordre de 2500 passagers par heure et par sens avec des rames de 1 véhicule, les lignes de Val sont dimensionnées pour offrir un débits de 9600 passagers par heure et par direction avec des rames de 2 voitures. La vitesse commerciale du Tramway est de l'ordre de 18 à 22 km/h en France, tandis que celle du VAL se situe entre 32 et 34 km/h, cette différence étant principalement due au site propre intégral nécessaire pour exploiter un métro automatique.

En définitive, les coûts ci-dessus font apparaître qu'en moyenne :

- Les équipements liés au système et le matériel roulant du métro automatique ont un coût égal en moyenne au double voire au triple de celui des équipements liés au système de Tramway et son matériel roulant, mais pour le 1er système l'offre est de 9600 passagers par heure et par direction et pour le second l'offre est de 2500 passagers par heure et par direction.

- le génie civil et les dépenses annexes ont un coût pour le système VAL égal en moyenne au double voire au triple de ceux du Tramway, le site propre intégral étant obtenu en général en réalisant un tunnel sur 40 à 90% d'une ligne, le Tramway se satisfait d'un site propre en surface avec une partie en tunnel (de l'ordre de seulement 10%).

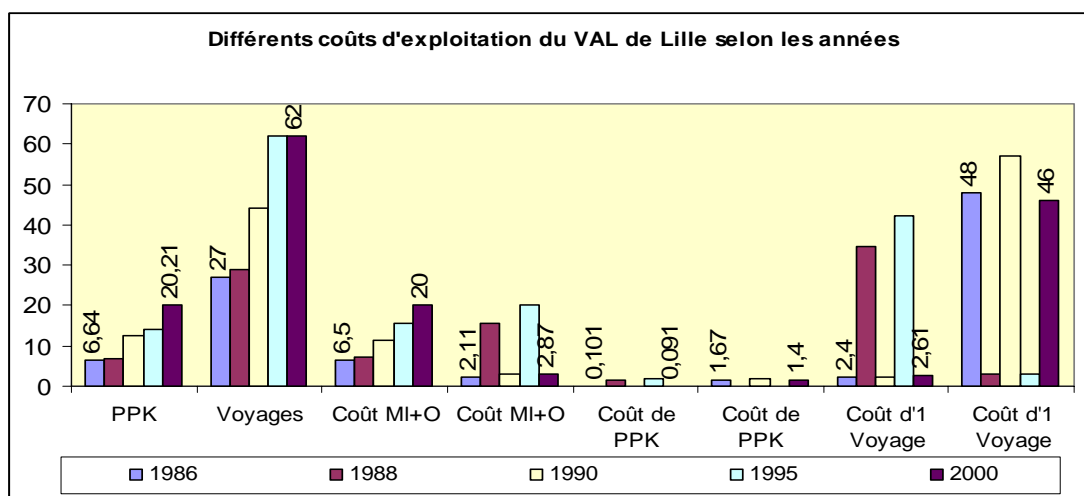
#### **2.5.8.6.3.2 Les coûts d'exploitation**

Ils sont étudiés à partir d'une analyse comparative des coûts d'exploitation des métros de Lille, de Lyon et de Marseille effectuée par la Direction des Transports Terrestres et des données de la Communauté Urbaine de Lille (CUDL). Pour celle-ci, les charges d'exploitation du métro de Lille pour l'année 1986 (après 2 années complètes d'exploitation de la 1ère ligne de 13,3 km

avec 38 rames), pour l'année 1988 (61 rames), pour l'année 1990 (2 lignes soit 25,3 km en exploitation avec 83 rames), pour l'année 1995 (2 lignes sur 28,6 km en exploitation avec 83 rames) et pour l'année 2000 (2 lignes sur 45 km en exploitation avec 143 rames), le nombre de places par km offertes, le nombre de voyages effectués par année avec les coûts correspondants apparaissent dans le tableau 1 ci-après en Francs et Dollars de l'année considérée (hors taxes, amortissements et frais de structures) :

VAL DE LILLE	1986	1988	1990	1995	2000
P.P.K. x 10 <sup>6</sup>	643	681	1260	1396	2021
Voyages x 10 <sup>6</sup>	27	29	44	62	62
COUTS DES MATERIELS ET OUTILS	65	73	115	155	200
	21.1	155	29.2	200	28.7
COUTS DE P.P.K	0.101	1.4	0.107	1.79	0.091
	1.67	0.111	2	0.098	1.4
COUTS D'UN VOYAGE	2.40	34.7	2.51	42.2	2.61
	48	3.04	57	3,22	46

**Tableau 2-9 : Coûts d'exploitation du VAL [KUH<sup>1</sup>], [ETC], [BIJ], [CUD]. Nota: P.P.K : Passenger Place-km. with 6 passengers/m<sup>2</sup>- Average value of US\$ : 1 \$ 86= 6.93 Francs; 1\$ 88= 5.96 Francs; 1\$ 90 = 5.45 Francs; 1\$ 95= 5.30Francs ; 1\$ 2001 = 7,80 Francs.**



**Figure 2-17 : Diagramme de l'évolution des coûts d'exploitation du VAL de Lille depuis sa mise en service [KUH<sup>1</sup>], [ETC], [BIJ], [CUD].**

Les charges d'exploitations du Tramway de Nantes sont regroupées pour l'année 1987 (1 ligne de 10,6 km avec 20 rames), pour l'année 1990 (une ligne de 12,6 km avec 28 rames), et pour 1994 (2 lignes de 26,8 km avec 46 rames) . Le nombre de places. km offertes, le nombre de voyages effectués par année avec les coûts correspondants (sans frais d'amortissement) apparaissent dans le tableau 2 ci-après en Francs hors taxes :

Tramway nantais	1987	1990	1994	1998
P.P.K. x 10 <sup>6</sup>	207	250	511	620
Trips x 10 <sup>6</sup>	13.07	13.26	32,9	35,8
Coût de operating	19.79 MF/3.29M	21.2 MF/3.88 M \$	67,2 MF/12,21 M \$	86,1 MF/14,66 M \$
Coût du PPK	0.0956 F/1.59 Cents	0.0848 F/1.55 Cents	0.131 F/2,3 Cents	0,139 F / 2,36 Cents
Coût du voyage	1.51 F/24.8 Cents	1.59 F/29.3 Cents	2,04 F/37,1 Cents	2,40 F / 40,9 Cents

Tableau 2-10: Coûts d'exploitation du tramway [KUH<sup>1</sup>], [ETC], [BIJ], [CUD], [KHU<sup>4</sup>] Average value of US\$ : 1 \$87 = 6.01 Francs ; 1 \$90 = 5.45 Francs; 1 \$94 = 5.50 Francs. 1\$ 98 = 5,87 Francs.

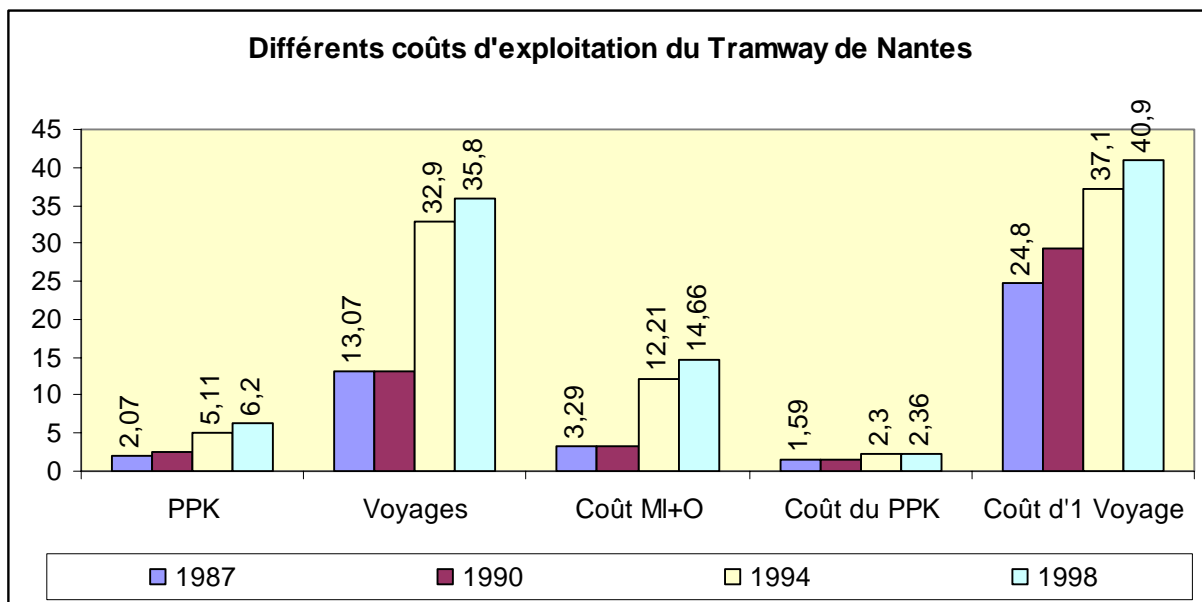
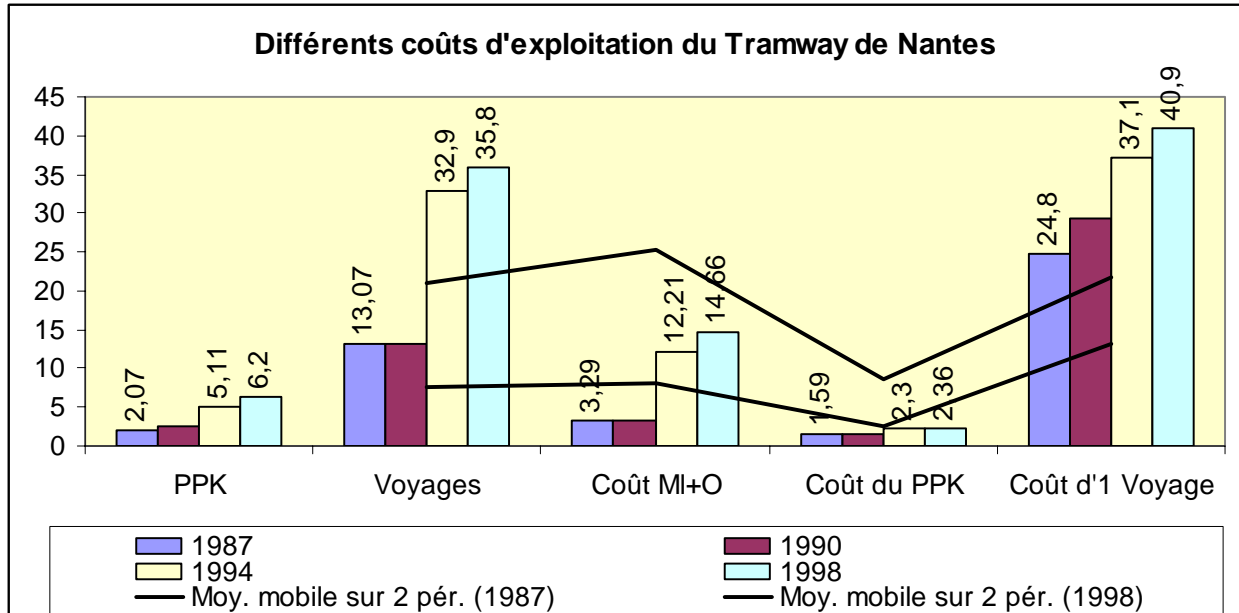


Figure 2-18 : Diagramme de l'évolution des coûts d'exploitation du Tramway de Nantes depuis sa mise en service, [KUH<sup>1</sup>], [ETC], [BIJ], [CUD], [KHU<sup>4</sup>]



**Figure 2-19 : Diagramme de la courbe de tendance moyenne mobile de l'évolution des coûts d'exploitation du Tramway de Nantes depuis sa mise en service, [KUH<sup>1</sup>], [ETC], [BIJ], [CUD], [KHU<sup>4</sup>]**

Si nous comparons le niveau du coût de la place x km offerte PKO, le coût de la PKO du VAL est de 13 à 68 % moins élevé que celui de la PKO du Tramway ; quand au coût du voyage sur le VAL, il est entre 64 et 12 % plus élevé que celui sur le Tramway.

Sur le réseau de Lille, la productivité par employé était de 15542 rames x km en 1986, elle est passée à 25306 rames x km en 1995 c'est-à-dire une augmentation de 63 %.

Sur le réseau de Nantes, la productivité par employé a été de 10417 rames x km en 1987 et est passée à 11149 rames x km en 1994, c'est-à-dire une augmentation de 7 %.

Pour chacun des deux réseaux de transport urbain (autobus, tram et métro), les dépenses et la recette d'exploitation ont évolué. Les ratios Recettes / Dépenses R/D, correspondant aux données des réseaux de transport urbain tous modes sont plus bas que les ratios R/D des réseaux de Tramway ou VAL seuls. **L'effet du Transport en Commun en Site Propre (TCSP) se traduit par une certaine productivité de l'exploitation ainsi qu'une augmentation de la fréquentation.** Ainsi, à Nantes le ratio R/D du tramway en 1987 est de 115 % alors que le ratio R/D de l'ensemble du réseau n'est que de 55 %. De la même façon à Lille, le ratio R/D pour la première ligne est de 111 % en 1986, alors que pour l'ensemble du réseau tous modes le R/D est de 53 %. En 1994, le ratio R/D pour le VAL seul était de 100,5 %, en 2000 ce ratio devenait 135 %.

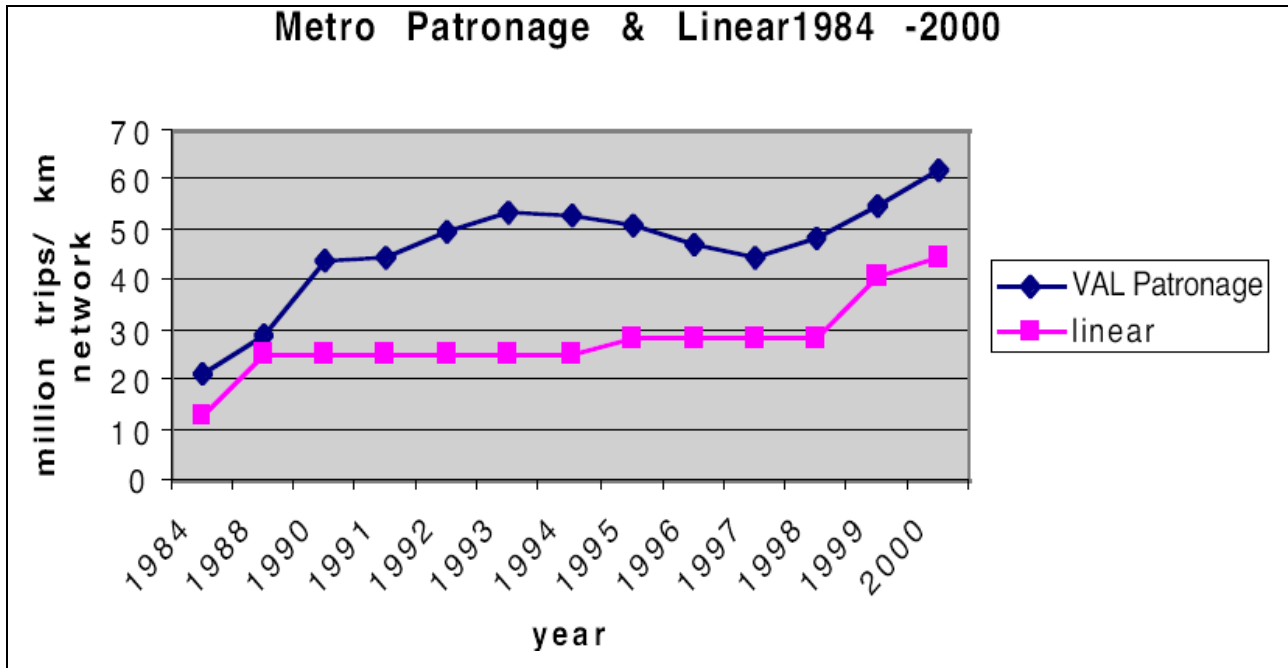


Figure 2-20 : Diagramme de la courbe de fréquentation du réseau VAL de 1984 à 2000, [KUH<sup>1</sup>], [KUH<sup>3</sup>], [ETC], [BIJ], [CUD], [KHU<sup>4</sup>], [YAN]

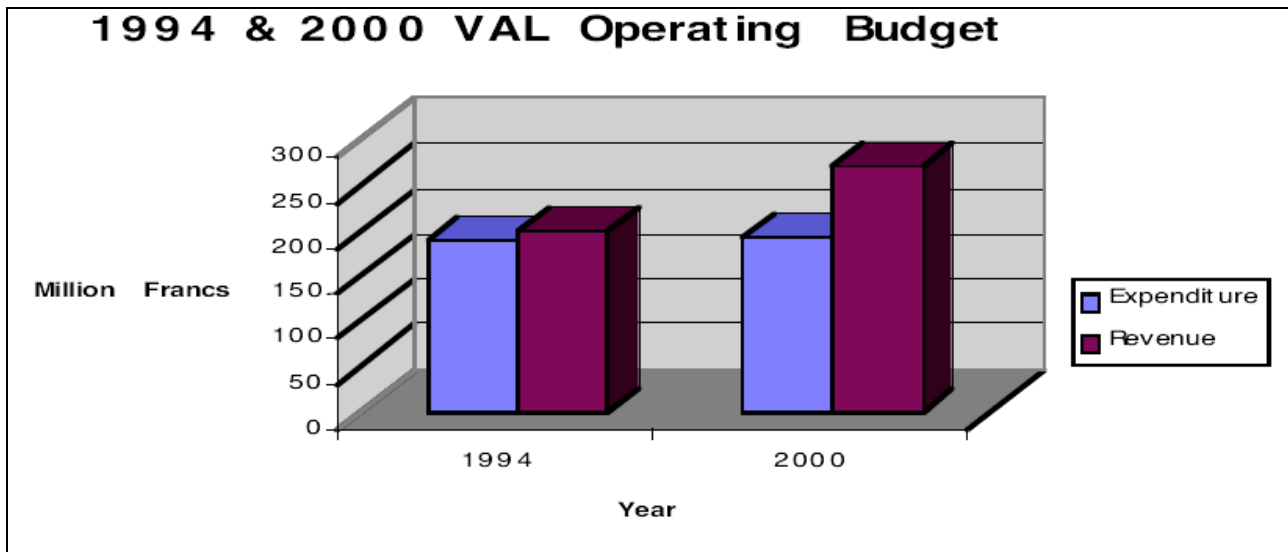


Figure 2-21 : Diagramme du budget d'exploitation du réseau VAL de Lille de 1994 à 2000 [KUH<sup>3</sup>], [ETC], [BIJ], [CUD], [KHU<sup>4</sup>], [YAN]



## Conclusion du chapitre 2

- l'effet métro à Lille avec la mise en service de 2 lignes totalisant 45 km a stimulé la fréquentation qui était faible, de 51 millions de voyageurs pour une zone desservie par les transports de 1 100 000 habitants. La fréquentation du réseau de métro qui était de 21,1 millions en 1984 est passée à 29,4 millions en 1988 avec la mise en service de la ligne 1 bis, elle a augmenté à 48 millions en 1992, puis après avoir baissé à 45 millions en 1997 la fréquentation a augmenté de nouveau à 48 millions en 1998 puis 55 millions en 1999 avec l'ouverture de 16 nouvelles stations et 62 millions de voyageurs en 2000. L'ensemble du réseau (Val+Tram+Bus) transportait en 2000 106,5 millions de voyageurs. Le nombre de voyage par habitants et par an est de 97 en 2000 pour 135 dans la classe des villes de plus de 300 000 habitants.

- à Nantes l'effet Tramway avec la mise en service de 2 lignes totalisant 22,8 km, a stimulé la fréquentation du réseau qui était déjà élevée avant la mise en service du métro soit 51 millions pour une zone desservie de 464 857 habitants. La fréquentation du réseau de tramway qui était de 7 millions de voyageurs en 1984 est passée à 16,6 millions en 1992, à 26 millions en 1993 (21 km), à 35,8 millions (27 km) en 1998. Cette fréquentation est de 83,7 millions de voyageurs pour l'ensemble du réseau (Bus + tram) en 1998. Le nombre de voyages par habitant et par an est de 167 en 1998 pour 135 dans la classe des villes de plus de 300 000 habitants.

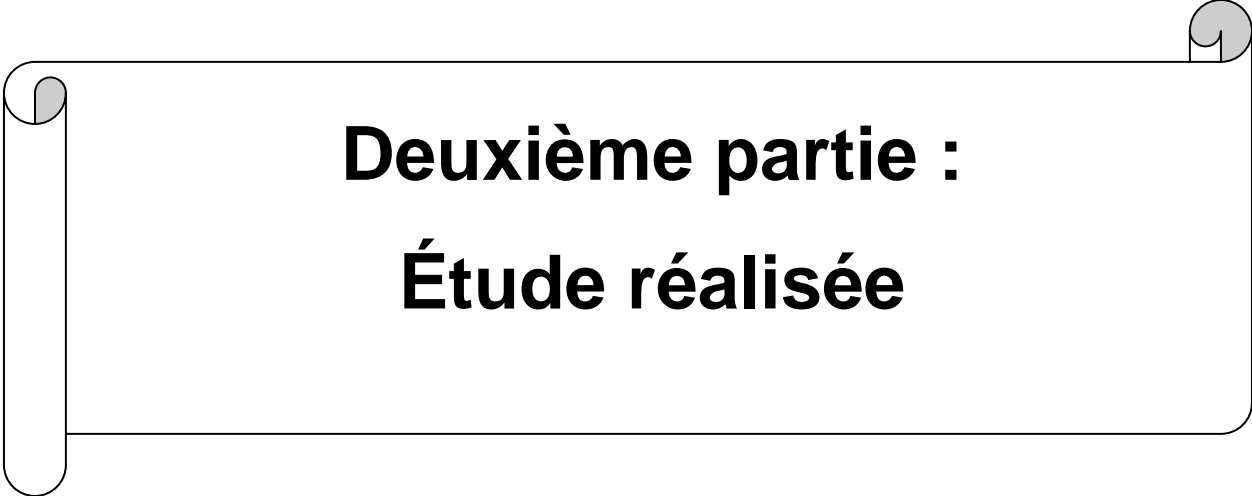
De manière plus étendue donc, les transports en commun dont le rôle essentiel est d'accompagner l'activité de la ville constituent l'une des composantes essentielles du fonctionnement d'une ville doivent impérativement s'inscrire au pas de course des sociétés modernes toujours en perpétuelles mutations.

Après les avoir définis et précisé leur rôle, nous avons vu que leur impact situationnel pour les zones desservies varie non seulement en fonction du site, mais également en fonction des objectifs fixés et que pour l'essentiel, le tout se rapporte à la morphologie de la ville dans un contexte de maillage donné.

Nous avons également vu que l'accomplissement des activités commerciales, industrielles, sociales, de loisirs et touristiques et plus largement de mobilité se réalise grâce à des infrastructures fixes et des matériels roulants qui assurent l'ensemble des échanges dont la traduction au sens des déplacements dans une ville, permet de choisir un mode de transport en commun urbain que l'on classe à partir de la technique de guidage, et de sa fonction

Pour l'ensemble des modes mis en œuvre pour assurer les déplacements des populations, les équipements, la sécurité à bord et la facilité d'accès traduisent la qualité de service puis la rapidité et la fiabilité du matériel traduisent les performances techniques.

Pour conclure, nous disons que nous avons présenté des transports en commun qui s'inscrivent dans une logique davantage, exigeante, contraignante, située au cœur des sociétés urbaines actuelles en perpétuelles mutations.

A decorative graphic of a scroll with a black outline and a grey shadow, containing the text. The scroll is oriented horizontally and has a small circular detail at the top right corner.

**Deuxième partie :**  
**Étude réalisée**

## Glossaire de la deuxième partie.....165

TERME	DEFINITION	UNITE
$Q_{théo}$	Débit théorique horaire	Nombre de passagers par heure par sens
$C, C_{min}$ ou $C_{max}$	Capacité	Nombre de places par mètre carré
$V_{com}$	Vitesse commerciale	Kilomètres par heure
$f$	Fréquence	Nombre de véhicules par heure
$I$ ou $I_p$	Intervalle de passage	Minutes (heure)
$L_v$	Longueur du véhicule	Mètres
$n_v$	Nombre de véhicules	Unité
$i_v$	Intervalle entre véhicules	Mètres
$t_o$	Taux d'ouverture des portes	Poucentage
$n_s$	Nombre de stations	Unité
$T$	Temps	Heures (minutes)
$T_s$	Temps d'arrêt en station	Heures (minutes)
$T_{is}$	Temps inter station	Heures (minutes)
$d$	Distance	kilomètres (mètres)
$d_{is}$	Distance inter station	kilomètres (mètres)
$d_{isa}$	Distance inter station en accélération	Kilomètres (mètres)
$d_{isn}$	Distance inter station en parcours normal	Kilomètres (mètres)
$d_{isd}$	Distance inter station en décélération	Kilomètres (mètres)
$t$	Temps local	Heures (minutes)
$t_a$	Temps d'accélération du véhicule	Heures (minutes)
$t_n$	Temps de circulation du véhicule en régime normal	Heures (minutes)
$t_d$	Temps de décélération du véhicule	Heures (minutes)

--	--	--

## **Introduction.....**

La description d'un phénomène physique à l'aide des outils mathématiques est une démarche qui permet de comprendre le fonctionnement de plusieurs paramètres en interaction dans un

ensemble donné. Appliquée à notre étude, elle permet de traduire l'efficacité des transports en commun grâce à un modèle d'optimisation du débit horaire.

Les paramètres physiques du problème étudié sont difficilement pris en compte en raison de leur complexité. Néanmoins, les hypothèses faites, permettent de prendre en compte l'ensemble des données du problème.

La formalisation du problème étudié est une sorte de recherche d'équilibre mettant en compétition plusieurs acteurs aux intérêts différents et débouche sur une analyse par étapes

Dans cette deuxième partie, au troisième chapitre, on décrit le phénomène étudié puis, on élabore le modèle mathématique par la présentation des données physiques de la ligne, les données géométriques des puits, les données mécaniques liées à l'exploitation

Le dernier chapitre est consacré à la présentation des différents réseaux Tramway des principales villes de France, à l'application du modèle, à la présentation des résultats des mesures sur terrain, puis à la comparaison des résultats du modèle selon différents cas de sites.

Enfin, les perspectives pour des développements futurs, sont présentées à la fin de la conclusion.

**CHAPITRE 3 :**  
**CONCEPTION ET CALCUL D'UNE LIGNE DE**  
**TRANSPORT EN COMMUN EN SITE PROPRE**

**Table de matières du chapitre 3**

**3.1 Introduction.....170**

<b>3.2</b>	<b>Définition d'une ligne de transport en commun en site propre.....</b>	<b>171</b>
<b>3.3</b>	<b>Définition des paramètres à prendre en compte.....</b>	<b>171</b>
3.3.1	Aspect urbanistique.....	171
3.3.1.1	Zone géographique d'influence.....	171
3.3.1.2	Nature du site.....	173
3.3.2	Aspect technique.....	174
3.3.2.1	Paramètres à prendre en compte pour optimiser le rendement d'une ligne de Transports en Commun en Site Propre.....	174
3.3.2.1.1	La fréquentation d'une ligne de transport en commun....	174
3.3.2.1.2	Le Débit théorique.....	175
<b>3.3.2.1.3</b>	<b>Paramètres liés au véhicule.....</b>	<b>176</b>
3.3.2.1.3.1	La capacité.....	176
3.3.2.1.3.2	La géométrie du véhicule.....	177
3.3.2.1.3.3	Le taux d'ouverture.....	177
3.3.2.1.3.4	La vitesse du véhicule ou vitesse maximale.....	177
3.3.2.1.3.5	La vitesse normale.....	178
3.3.2.1.3.6	L'accélération du véhicule.....	179
<b>3.3.2.1.4</b>	<b>Paramètres liés à la ligne.....</b>	<b>180</b>
3.3.2.1.4.1	La longueur de la ligne.....	180
3.3.2.1.4.2	La vitesse inter stations.....	181
3.3.2.1.4.3	La distance inter stations .....	182
3.3.2.1.4.4	La durée moyenne inter stations.....	182
3.3.2.1.4.5	Le temps d'arrêt en stations.....	183
3.3.2.1.4.6	Le nombre de stations.....	183
3.3.2.1.4.7	Intervalle entre véhicules .....	183
<b>3.3.2.1.5</b>	<b>Paramètres liés à l'exploitation.....</b>	<b>184</b>
3.3.2.1.5.1	La fréquence.....	184
3.3.2.1.5.2	La vitesse commerciale.....	184
3.3.2.1.5.3	La nature de la station.....	187
<b>3.4</b>	<b>Etablissement de l'équation de débit théorique horaire <math>Q_{théo}</math> .....</b>	<b>187</b>
3.4.1	Analyse théorique par étapes.....	188
3.4.1.1	Première étape : choix du débit.....	188



3.4.1.2	Deuxième étape : choix de la vitesse commerciale.....	199
3.4.1.3	Troisième étape : choix du nombre de stations.....	190
3.4.1.3.1	Estimation théorique de la distance inter station moyenne optimale.....	191
3.4.1.4	Quatrième étape : choix du temps inter station.....	191
3.4.2	Vérification de différentes conditions.....	192
3.4.2.1	Condition de sécurité du projet.....	192
3.4.2.2	Condition d'insertion dans le trafic.....	193
3.4.3	Différents scénarios d'optimisation.....	193
3.4.3.1	Scénario N°1.....	194
3.4.3.2	Scénario N°2.....	194
3.4.3.2.1	Ajustement .....	195
3.4.3.3	Scénario N°3.....	196
3.4.3.4	Scénario N°4.....	196
3.4.3.4.1	Ajustement .....	197
3.4.3.5	Scénario N°5.....	198
3.4.3.6	Scénario N°6.....	198
3.4.3.6.1	Ajustement.....	198
3.4.3.7	Scénario N°7.....	199
3.4.3.8	Scénario N°8.....	199
3.4.3.8.1	Ajustement.....	199
3.4.4	Analyse par nature de site.....	199
3.4.4.1	Cas d'un site normal.....	200
3.4.4.2	Cas d'un site avec feux.....	203
3.4.4.3	Cas d'un site avec feux aux carrefours.....	205
<b>3.5</b>	<b>Conclusion partielle.....</b>	<b>206</b>
<b>3.6</b>	<b>Illustration par un exemple.....</b>	<b>208</b>
3.6.1	Schéma de compréhension.....	208
3.6.2	Données liées à la zone géographique.....	208
3.6.3	Données liées au véhicule.....	209
3.6.4	Données liées à l'offre d'exploitation et à la fréquentation.....	209
3.6.5	Application pour le premier niveau d'analyse.....	209

3.6.5.1	Première étape : choix du débit.....	209
3.6.5.1.1	Estimation des coûts.....	211
3.6.5.1.1.1	Le coût d'investissement.....	211
3.6.5.1.1.2	Le coût d'exploitation.....	211
3.6.5.2	Deuxième étape : choix de la vitesse commerciale.....	211
3.6.5.3	Troisième étape : choix du nombre de stations.....	214
3.6.6	Estimation théorique de la distance inter station moyenne optimale.....	216
3.6.6.1	Application pour le deuxième niveau d'analyse .....	217
3.6.6.1.1	Cas d'un site normal.....	217
<b>3.7</b>	<b>Conclusion du chapitre 3 .....</b>	<b>231</b>

## Figures du chapitre 3

Figure 3-1	: Surfaces des Périmètres de Transports Urbains [PAN].....	172
Figure 3-2	: Densité de la population des Périmètres de Transports Urbains [PAN].....	173
Figure 3-3	: Capacités des rames des TC suivant une norme de 4 places/m <sup>2</sup> [PAN].....	176
Figure 3-4	: Décomposition des différentes vitesses entre deux stations.....	178
Figure 3-5	: Longueur des lignes des TC en kilomètres [PAN].....	180
Figure 3-6	: Pente moyenne de vitesse commerciale entre deux stations.....	181
Figure 3-7	: Distances inter station des Transports en commun urbains en mètres.....	182
Figure 3-8	: Représentation de la vitesse commerciale sur une ligne de transport en commun.....	185
Figure 3-9	: Diagramme en bâton des vitesses commerciales des transports en commun en site propre intégral en km/h [PAN].....	186
Figure 3-10	: Diagramme en bâton des vitesses commerciales des transports en commun en site partiellement propre en km/h [PAN].....	187
Figure 3-11	: Courbe de la variation du débit avec la fréquence pour une capacité fixe.....	194
Figure 3-12	: Courbe de la variation du débit avec la capacité pour une fréquence donnée.....	195
Figure 3-13	: Courbe de la variation du débit avec la capacité pour un nombre de véhicules donné et une vitesse fixe.....	196
Figure 3-14	: Courbe de la variation du débit avec la vitesse pour un nombre de véhicules donné et une capacité fixe.....	197
Figure 3-15	: Courbe de la variation du débit avec la vitesse pour un nombre de véhicules donné et une capacité fixe.....	198

Figure 3-16 : Répartition des distances en fonction des temps, analyse entre deux stations.....	201
Figure 3-17 : Répartition des distances en fonction des temps, analyse entre deux stations.....	202
Figure 3-18 : Représentation de la vitesse commerciale entre deux stations.....	204
Figure 3-19 : Schéma illustratif du problème étudié.....	207
Figure 3-20 : Représentation des valeurs des distances inter station, des vitesses inter station, des temps inter station.....	216
Figure 3-21 : Valeurs des temps et distances inter station d'accélération selon la vitesse.....	220
Figure 3-22 : Valeurs des temps et distances de décélération en freinage de service selon la vitesse...	222
Figure 3-23 : Valeurs des temps et distances de décélération en freinage de sécurité selon la vitesse...	223
Figure 3-24 : Valeurs des temps, accélération et décélération en fonction des différentes vitesses.....	225
Figure 3-25 : Valeurs des temps et distances inter station en parcours normal en fonction des différentes vitesses.....	226
Figure 3-26 : Répartition idéale des distances et des temps inter station.....	228

<b>Tableaux du chapitre 3</b>
-------------------------------

Tableau 3-1 : Performances techniques d'un Tramway standard.....	179
Tableau 3-2 : Performances mécaniques d'un Tramway standard.....	217

### 3.1 Introduction

La construction d'une ligne de transport en commun offre généralement l'occasion d'une requalification urbaine permettant la recombinaison des usages de l'espace public et la prise en compte des différents modes de déplacements. Le principe de conception d'une ligne de transport en commun se fonde sur quatre acteurs essentiels que sont le **politique, les aménageurs, l'exploitant et les riverains**, dont les objectifs sont souvent contradictoires.

Le politique intervient par l'affirmation de la volonté de développement des transports en commun et de requalification urbaine ; l'aménageur offre l'occasion de retraiter globalement l'ensemble d'un espace urbain; pour l'exploitant, c'est généralement l'occasion d'une redistribution et d'une optimisation de l'offre de transport ; le riverain s'attend au changement de son environnement, ce qui peut se traduire en inquiétude sur l'avenir.

D'une manière générale, le résultat de l'action sera d'autant mieux perçu que les aménageurs tiendront compte des contraintes des différents acteurs, sachant qu'en réalité aucun d'eux ne pourra se sentir exonéré des conséquences d'éventuelles erreurs. L'intégration d'une ligne de transport en commun dans un environnement urbain doit ainsi prendre en compte différents facteurs influents comme : les contraintes géométriques des voies qui doivent être en symbiose avec le matériel roulant ; les contraintes d'environnement urbain notamment les risques de bruit et de vibrations ; les usages envisagés de la plate-forme de la voie selon qu'elle est en - site propre, - site partagé, - site banalisé. Enfin, il faut prendre en compte la sécurité des utilisateurs de l'espace public.

La combinaison de ces différents facteurs détermine les types de transports en commun envisageables, entraînant ensuite la présélection des familles de matériels roulants. Dans ce chapitre, nous présentons une démarche qui conduit à l'élaboration d'un modèle mathématique qui optimise l'exploitation d'une ligne de transport en commun illustrée sur un exemple d'une ligne de 10 kilomètres de long. Mais définissons d'abord les paramètres à prendre en compte.

### **3.2 Définition d'une ligne de transport en commun en site propre**

Se dit d'une voie routière ou ferrée dont l'itinéraire est choisi en fonction de plusieurs paramètres. Son tracé passe par le choix d'une zone géographique d'influence et la traduction d'un besoin en débit théorique permettant d'estimer le nombre de passagers susceptibles d'utiliser le moyen de transport en commun pour se déplacer quotidiennement. Elle est munie

d'aménagements divers et de stations qui sont des points d'arrêt pour les véhicules qui circulent, permettant ainsi la montée et la descente des passagers.

### **3.3 Définition des paramètres à prendre en compte**

Les paramètres à prendre en compte lors de la conception d'une ligne de transport en commun en site propre s'intègrent dans une problématique de choix d'un moyen de transport en commun. Ce choix s'articule autour de trois facteurs principaux : le facteur urbanistique, le facteur technique et le facteur économique. L'importance de chacun de ces facteurs se réalise par la prise en compte d'un certain nombre de paramètres susceptibles d'influencer la réalisation d'un tel projet. Dans notre travail de thèse, cette prise en compte se présente sous la forme d'une étude paramétrique permettant d'évaluer le degré d'affinité d'un paramètre par rapport à l'autre pour chaque facteur. Dans cette partie, nous abordons les aspects urbanistiques et techniques.

#### **3.3.1 Aspect urbanistique**

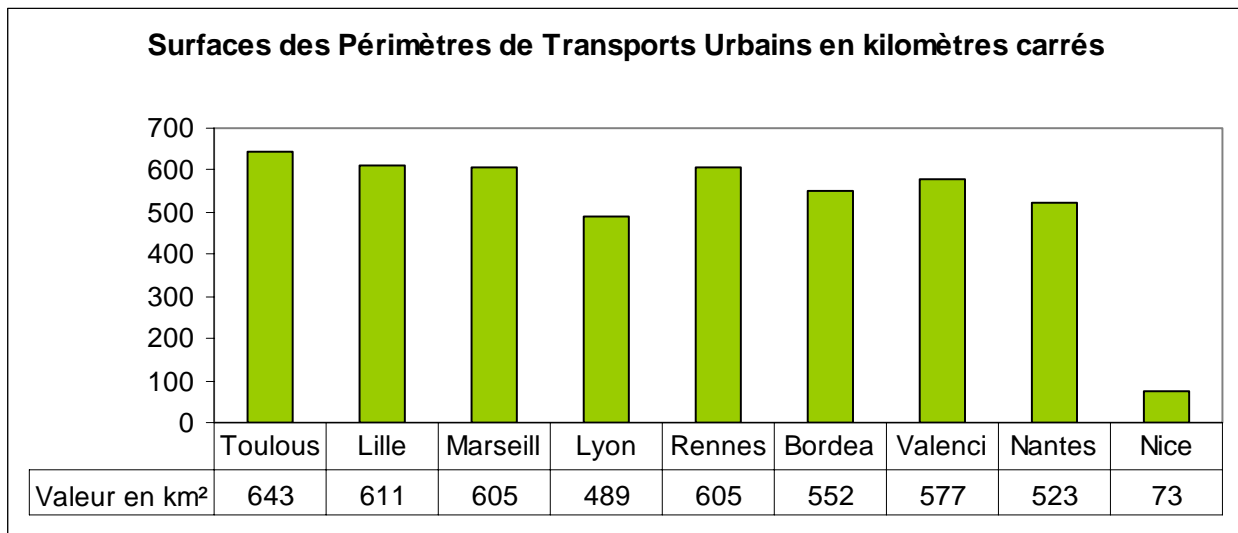
##### **3.3.1.1 Zone géographique d'influence**

Ou zone de rayonnement, c'est un territoire à travers lequel il est techniquement et économiquement raisonnable d'installer une ligne de transport en commun. A priori, elle devrait se caractériser d'abord par une forte densité de population, puis idéalement par une topographie limitant très nettement les dépenses lors de la construction. La zone géographique d'influence est déterminée à l'aide des enquêtes transports dont la méthode consiste à recueillir par sondage, les intentions des déplacements et les modes utilisés par tranche d'âge et pour diverses activités. La zone géographique d'influence est nommée dans notre thèse  $Z_g$  et s'exprime en kilomètres carrés. Elle peut être un des éléments de choix à priori d'un moyen de transport en commun. Deux éléments permettent de rendre compte de l'importance de la zone géographique : le Périmètre de Transport Urbain (PTU) et la densité de la population.

D'après la base de données sur les transports en commun en site propre, quatre PTU font plus de 600 km<sup>2</sup>. Ce sont les PTU à métro de Toulouse (643 km<sup>2</sup>), Lille (611 km<sup>2</sup>), et Marseille (605

km<sup>2</sup>). Parmi les PTU à métro, seul Lyon a un PTU moins étendu, inférieur à 500 km<sup>2</sup> soit 489 km<sup>2</sup>. D'une manière générale, plus la surface du PTU est grande, plus il inclut des secteurs périurbains moins favorables aux transports collectifs. C'est le cas de Toulouse, Lille, Rennes (605 km<sup>2</sup>), Marseille, Bordeaux (552 km<sup>2</sup>), Valenciennes (577 km<sup>2</sup>) et Nantes (523 km<sup>2</sup>).

A l'opposé, plus la surface est petite plus on peut penser que le périmètre des transports urbains n'est pas cohérent avec l'aire concernée par les déplacements quotidiens. C'est particulièrement le cas de Nice dont le PTU est limité à une seule commune malgré ses 73 km<sup>2</sup> **[PAN]**.



**Figure 3-1 : Diagramme des Surfaces des Périmètres de Transports Urbains [PAN]**

Par ailleurs, la densité du PTU de Nice est très forte (4738 habitants/km<sup>2</sup>), car il est limité à une seule commune. Tandis que Lille, malgré un PTU regroupant 86 communes, a une densité assez élevée (1811 habitants/km<sup>2</sup>), comparable à d'autres villes Toulon (1990 habitants/km<sup>2</sup>), Nancy (1860 habitants/km<sup>2</sup>), Grenoble (1791 habitants/km<sup>2</sup>), Montpellier (1673 habitants/km<sup>2</sup>). Parmi les agglomérations millionnaires, Lyon a une densité plus forte (2436 habitants/km<sup>2</sup>) que Lille et Marseille qui ont des densités plus comparables (1640 habitants/km<sup>2</sup>). Valenciennes (65 communes pour 597 habitants/km<sup>2</sup>) et Rennes (33 communes pour 621 habitants/km<sup>2</sup>) sont des agglomérations de plus de 300 000 habitants qui ont une très faible densité. Enfin, Bordeaux (1217 habitants/km<sup>2</sup>), Toulouse (1113 habitants/km<sup>2</sup>) et Nantes (1086 habitants/km<sup>2</sup>) ont des densités assez proches, mais plutôt faibles par rapport aux autres agglomérations. Nous signalons au passage qu'on observe guère de corrélations entre taille du PTU (donnée institutionnelle), ou densité moyenne, et choix de la technologie : c'est la population qui explique le mieux ces choix **[PAN]**.

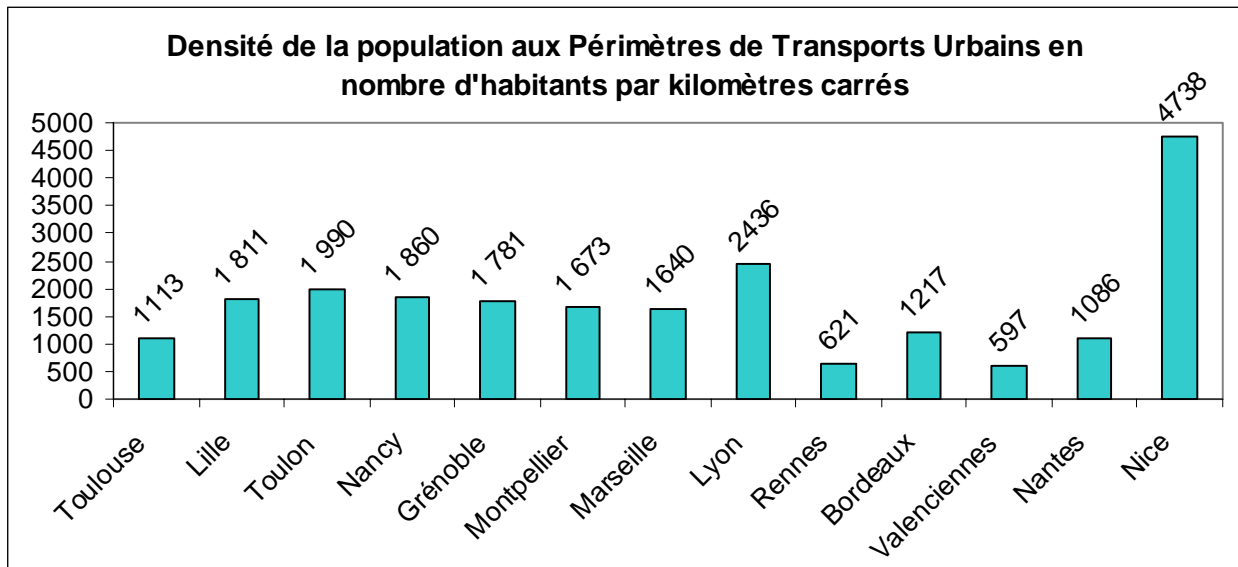


Figure 3-2 : Diagramme de densité de la population des Périmètres de Transports Urbains [PAN]

### 3.3.1.2 Nature du site

La nature du site se classe parmi les paramètres fondamentaux qui influent directement sur le choix de la nature d'une ligne de transport en commun. Généralement, la création d'une ligne de transport en site propre est complétée par une priorité aux carrefours avec les autres voies de circulation. L'objectif d'un tel dispositif est d'améliorer nettement la fréquence et la ponctualité du transport en commun même aux heures de pointe. Un moyen de transport en site propre intégral maximise son rendement par simple augmentation de sa vitesse d'exploitation. Dans la plupart des projets, la nature du site est évoquée à chaque fois que les conditions d'accessibilité du terrain sont défavorables. Dans notre travail de thèse, la nature du site est référencée par la lettre *S*.

### 3.3.2 Aspect technique

Techniquement l'évaluation du degré d'affinité d'un paramètre par rapport à un autre est mesurée par l'influence que tous les paramètres considérés exercent sur le débit de la ligne de transport en commun.

### **3.3.2.1 Paramètres à prendre en compte pour optimiser le rendement d'une ligne de Transports en Commun en Site Propre**

La conception d'une ligne de transport en commun s'articule essentiellement autour de trois aspects : l'urbain par la nature du site et la zone géographique, la technique par le mode de transport, et l'économique à travers la capacité de financement. La principale caractéristique est le **débit horaire** qui intègre la capacité des véhicules, la fréquence de la ligne et la vitesse commerciale. Dans cette section, nous essayons de définir les paramètres les plus influents sur le débit d'une ligne de transport en commun en site propre.

#### **3.3.2.1.1 La fréquentation d'une ligne de transport en commun**

Elle traduit le lien entre le mode de transport et le niveau de fréquentation. Les lignes de métro qui offrent les plus fortes capacités ont les fréquentations les plus élevées. Les lignes A et D du métro de Lyon transportent chacune plus de 220 000 personnes par jour. Les VAL de Toulouse et de Lille sont aux environs de 130 000 voyageurs par jour. La fréquentation du métro de Marseille est relativement faible par rapport au métro lyonnais et finalement assez proche des plus fortes lignes de tramway de Nantes et de Strasbourg qui arrivent aux limites de la capacité du système tramway. Pour les tramways, un bon niveau de fréquentation se situe entre 50 000 et 90 000 voyageurs par jour.

Par ailleurs, on notera la faible fréquentation du tramway d'Orléans (Tramway ligne 1 : 30 000 voyageurs par jour) et au contraire la belle performance du tramway de Montpellier (Tramway ligne 1 : 82 000 voyageurs par jour), sachant que pour toutes les deux les premières lignes ont été mises en service en 2000. La faible fréquentation de la ligne 3 de Nantes (Tramway ligne 3 : 23 000 voyageurs par jour) et du tramway de Marseille (Tramway : 19 100 voyageurs par jour) s'explique par des lignes très courtes (6,4 kilomètres pour Nantes, 3 kilomètres pour Marseille). La performance des lignes de tramway de Lyon était moyenne en 2001 après une année de fonctionnement. Leur fréquentation depuis 2002 se situe entre 55 000 et 60 000 voyageurs par jour. C'est une fréquentation conforme aux autres lignes de tramway françaises. Enfin, il est à noter que le bus en site propre du Trans Val de Marne en région parisienne atteint 45 000



voyageurs par jour, ce qui est remarquable pour une ligne de bus articulé, voire en limite supérieure de capacité du mode.

Lorsqu'elle est rapportée à l'heure, la fréquentation devient le débit horaire **[PAN]**.

### 3.3.2.1.2 Le Débit théorique

Il traduit le nombre théorique de personnes susceptibles d'utiliser une ligne de transport en commun. Ce débit permet de préfigurer l'importance de la ligne à mettre en place. Le débit est le premier paramètre qui par définition permet de choisir le moyen de transport. Il s'obtient par calcul et procède d'un agrégat de paramètres secondaires ou tertiaires liés aux véhicules (**capacité, géométrie, vitesse du véhicule...**); à la ligne (**longueur, distance entre stations, vitesse inter station, fréquence, nombre de stations, densité de stations...**); à l'exploitation (**vitesse commerciale, durée moyenne inter station,, temps d'arrêt en stations...**). L'expression mathématique du débit est donnée par le produit de la capacité d'un véhicule par sa fréquence de passage. Le débit sera toujours considéré par sens, précision qui ne sera pas rappelée par la suite.

$$Q = C.f \quad [\text{en nombre de passagers / heure}]$$

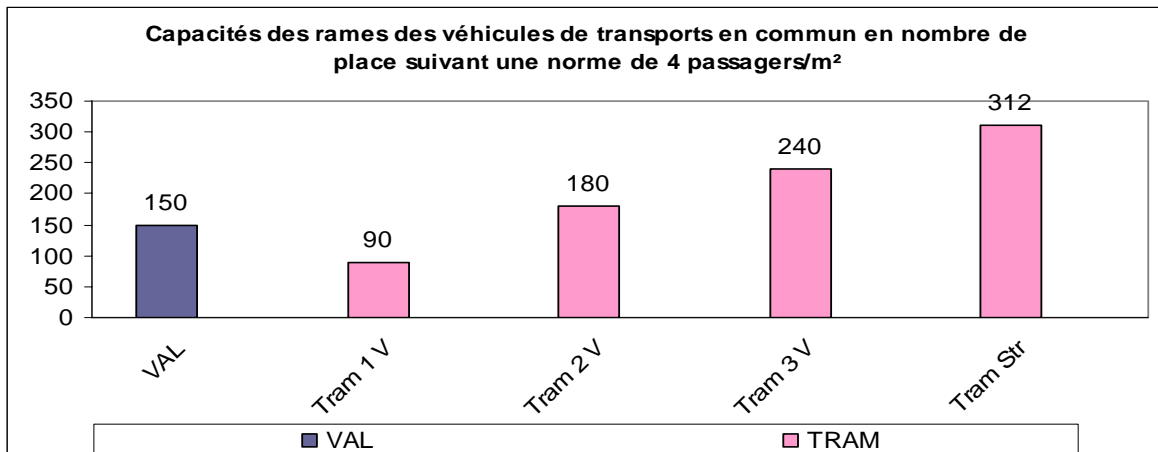
Cette quantité évalue le nombre de passagers transportés par heure et par sens. Dans cette expression  $C$  est la capacité moyenne du véhicule tandis que  $f$  est sa fréquence moyenne d'apparition à un arrêt donné soit le nombre de fois que des véhicules passent par heure. Il est important de raisonner par heure pour intégrer le fait que la demande de débit est variable dans la journée.

### 3.3.2.1.3 Paramètres liés au véhicule

#### 3.3.2.1.3.1 La capacité

La capacité est le nombre de places d'un véhicule indiqué par le constructeur. Elle est souvent ramenée au nombre de places par mètre carré. Dans ce travail, nous distinguons trois valeurs

de capacités : la capacité minimale désignée par le terme  $C_{\min}$  pouvant être utilisée en cas de recherche d'un seuil de rentabilité ; la capacité normale ou moyenne désignée par le terme  $C_n$  ou plus simplement  $C$  dont le standard en France est de 4 places au mètre carré, est une valeur correspondant à des conditions normales d'exploitation c'est-à-dire aux heures de moyenne affluence ; puis la capacité maximale dont la valeur est de 6 passagers/m<sup>2</sup> selon les pays et les standards de développement, est atteinte dans des conditions maximales d'exploitation, aux heures de pointe. Elle correspond à une utilisation extrême du véhicule. La capacité maximale est désignée dans notre travail de thèse par le terme  $C_{\max}$ . En raison de leur gabarit, les rames des VAL de Toulouse et de Lille ont une assez faible capacité, de l'ordre de 150 personnes, pour une norme de 4 personnes au m<sup>2</sup>. La capacité des rames de tramways est d'environ 180 personnes lorsqu'elles sont constituées de 3 voitures, d'environ 240 personnes lorsqu'elles comptent 5 voitures. La capacité affichée par le tramway de Strasbourg (312 places) est probablement un peu forte et calculée avec une norme de confort moins bonne que 4 personnes au m<sup>2</sup>. Les différences dans les capacités des rames à Marseille et Lyon s'expliquent par des choix faits dans leur composition : rames de 5 voitures à Lyon selon la norme Alstom, et rames de 4 voitures à Marseille selon la norme Bombardier.



**Figure 3-3 : Diagramme des capacités des rames de transports en commun en nombre de places suivant une norme de 4 passagers/m<sup>2</sup> [PAN]**

### 3.3.2.1.3.2 La géométrie du véhicule

La géométrie des véhicules est très variable selon la longueur, grâce à la modularité qui a tendance à se généraliser. La largeur est en général plus standardisée pour des raisons de

gabarit. La géométrie du véhicule est définie par sa surface notée  $S_v$ , exprimée en mètre carré qui est le produit de la longueur  $L_v$  par la largeur  $\ell_v$ .

#### 3.3.2.1.3.3 Le taux d'ouverture

Le taux d'ouverture est une donnée essentielle pour l'accessibilité des voyageurs. Lorsque les portes des véhicules sont larges, la montée et/ou la descente des voyageurs peuvent se faire simultanément ce qui a pour conséquence la réduction du temps d'arrêt en stations. C'est en pratique la largeur totale des portes rapportée à la longueur du véhicule. Dans notre travail de thèse, nous le désignons par le terme  $t_o$ , c'est un nombre sans dimension donné par la relation :

$$t_o = \frac{n_p \cdot \ell_p}{L_v}$$

Dans cette relation,  $n_p$  est le nombre de portes,  $\ell_p$  la largeur de porte, et  $L_v$  la longueur du véhicule.

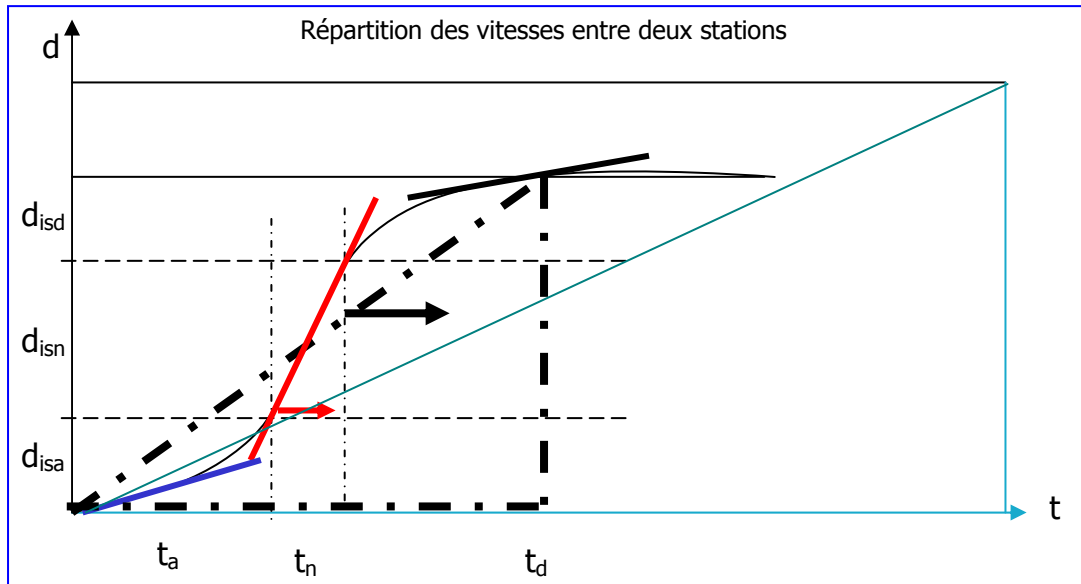
#### 3.3.2.1.3.4 La vitesse du véhicule ou vitesse maximale

La vitesse du véhicule est une caractéristique mécanique du véhicule. Elle est indiquée par le constructeur et dépend du mode de transport concerné. Sa valeur n'est atteinte que dans des conditions idéales d'utilisation du véhicule. Elle s'exprime en km/h et nous la désignons par le terme  $V_v$  ou  $V_{\max}$ .

#### 3.3.2.1.3.5 La vitesse normale

Elle est en quelque sorte la vitesse maximale permise lors de l'exploitation. La vitesse normale est variable et est en soi un facteur de risque qui fait de la sécurité des transports un enjeu important. Selon le mode de transport en commun utilisé, la liaison entre véhicule et

infrastructure viaire est plus ou moins étroite. Elle dépend en partie de la distance inter station, de la nature du site et de la nature de la conduite et de la priorité aux feux. Elle s'exprime en km/h et nous la désignons par le terme  $V_n$ . Cette vitesse peut être décomposée entre deux stations comme indiqué à la figure 3-4.



**Figure 3-4 : Décomposition des différentes vitesses entre deux stations.**

Dans cette figure, le triangle en noir (pointillé) représente la vitesse inter station, tandis que le triangle en bleu foncé représente la vitesse commerciale. Dans cette figure  $d$  est la distance en mètres,  $d_{isa}$  distance inter station sur laquelle le véhicule accélère,  $d_{isn}$  distance inter station sur laquelle le véhicule roule en régime normal,  $d_{isd}$  distance inter station sur laquelle le véhicule décélère,  $t$  le temps en secondes,  $t_a$  temps d'accélération du véhicule,  $t_n$  temps de circulation en régime normal,  $t_d$  temps de décélération du véhicule.

Tous ces paramètres conduisent à une expression de la vitesse qui sera développée plus loin.

### 3.3.2.1.3.6 L'accélération du véhicule

Elle traduit la capacité pour un véhicule d'atteindre une vitesse donnée sur une distance donnée. Elle est fonction du poids total du véhicule. Nous la désignons par le terme  $a_i$ , elle

s'exprime en mètre par seconde au carré. Le tableau ci-dessous donne des valeurs sur les performances techniques d'un Tramway standard

<b>Performances techniques d'un Tramway standard</b>	
<b>Traction</b>	
Vitesse maximale	60 km/h
Puissance maximale à la jante en traction	880 kW
Accélération moyenne de 0 à 40 km/h en charge normale et en palier	1.15 m/s <sup>2</sup>
Accélération moyenne de 0 à 60 km/h en charge normale et en palier	0.95 m/s <sup>2</sup>
Accélération résiduelle à 60 km/h en charge normale et en palier	0.40 m/s <sup>2</sup>
<b>Freinage</b>	
Décélération moyenne en freinage maximal de service en charge normale et en palier	1.50 m/s <sup>2</sup>
Décélération moyenne en freinage d'urgence en charge normale et en palier	2.85 m/s <sup>2</sup>
Décélération moyenne en freinage de sécurité en charge normale et en palier	1.80 m/s <sup>2</sup>
<b>Performances générales</b>	
Kilométrage annuel moyen d'un véhicule	60 000 km

**Tableau 3-1 : Performances techniques d'un Tramway standard**

### **3.3.2.1.4 Paramètres liés à la ligne**

#### **3.3.2.1.4.1 La longueur de la ligne**

Ce facteur influe sur le nombre de véhicules à mettre en service et le nombre de stations car, plus la ligne est longue et plus les stations peuvent être espacées. La longueur de la ligne est

une donnée essentielle du calcul du débit. Dans notre travail de thèse, nous l'appelons  $L_l$ . Elle s'exprime en kilomètres (km). D'après la base de données sur les transports en commun en site propre, de nombreuses lignes ont été mises en service depuis 2000, soit des premières lignes comme à Montpellier (tramway : 15 km) et Rouen (tramway : 18 km), soit des deuxièmes ou troisièmes voire plus sur d'autres agglomérations. Un rapport établi en 2001 par le centre de recherche sur les transports urbains en France, indique un kilométrage des transports en commun en site propre sur l'ensemble des réseaux français : Lille (VAL : 44 km, Tramway : 22 km), Lyon (Métro : 29 km, Tramway : 18 km), Nantes (Tramway : 36 km), Strasbourg (Tramway : 25 km), Marseille (Métro : 19 km, Tramway : 3 km), Grenoble (Tramway : 20 km), Orléans (Tramway : 18 km), Toulouse (VAL : 9 km), Saint Etienne (Tramway : 9 km) [PAN].

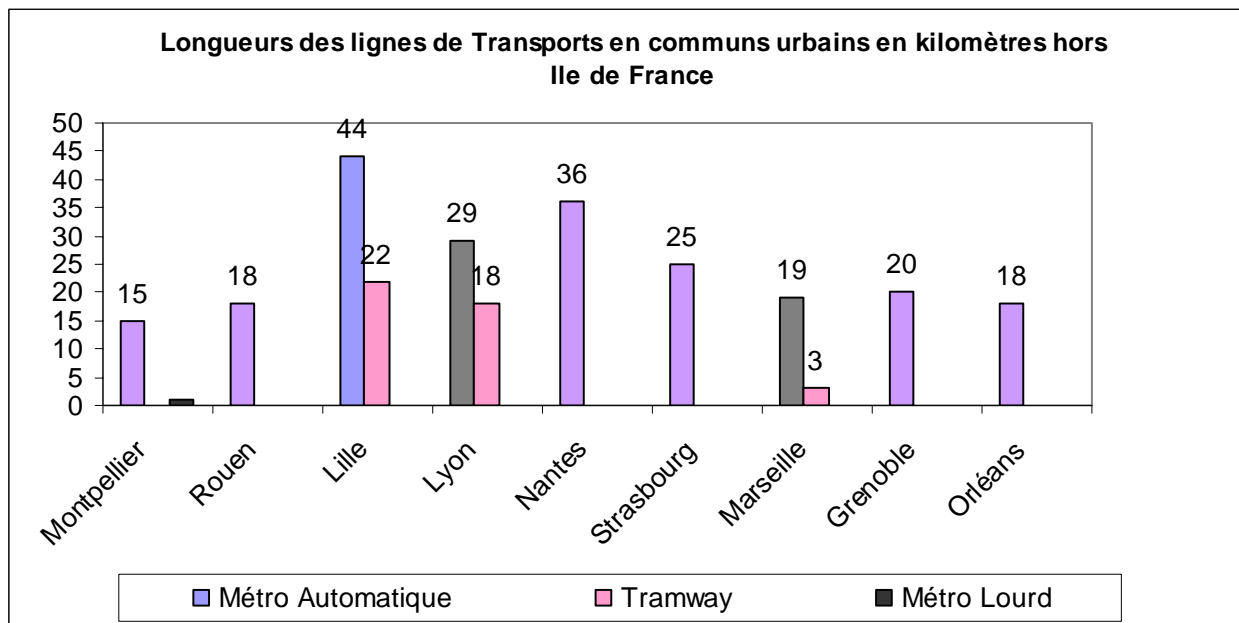


Figure 3-5 : Longueur des lignes des transports en commun urbains en kilomètres [PAN]

#### 3.3.2.1.4.2 La vitesse inter station

C'est une donnée liée à plusieurs paramètres comme la distance entre stations  $d_{is}$ , la longueur du véhicule  $L_l$  et ses caractéristiques. Elle sert généralement à calculer le temps de parcours théorique inter stations et est supérieure à la vitesse commerciale moyenne qui intègre les

temps d'arrêt en stations. Dans notre travail de thèse, cette vitesse est désignée par le terme  $V_{is}$  et s'exprime en kilomètre par heure. La vitesse 3-6 montre la pente d'une vitesse inter station.

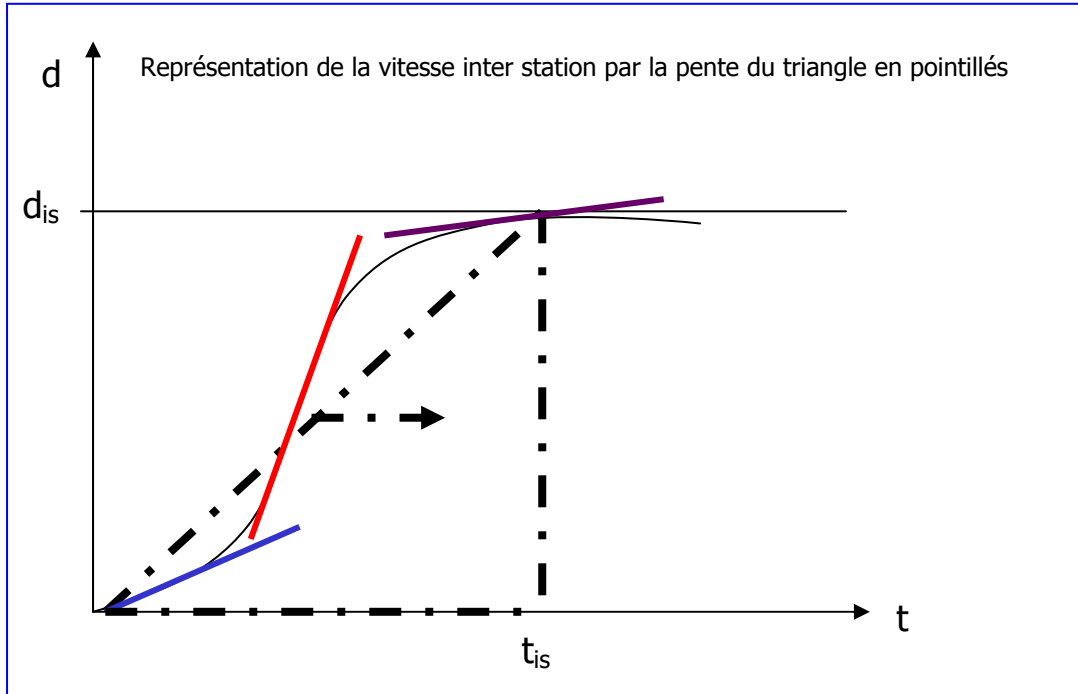
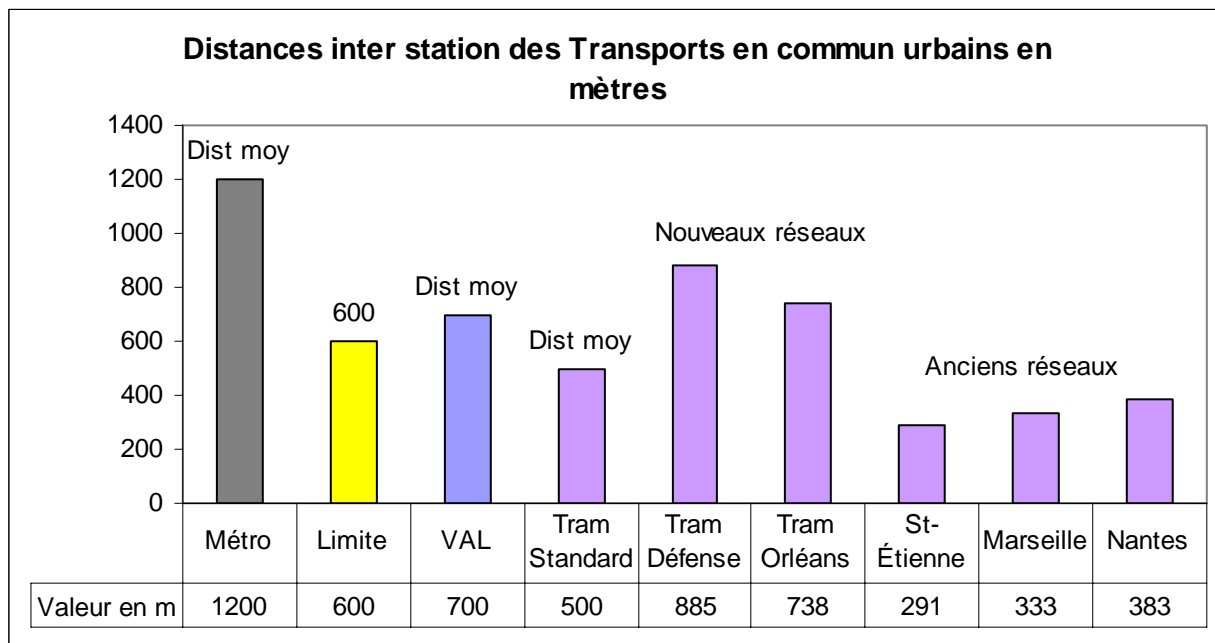


Figure 3-6 : Pente moyenne de vitesse commerciale entre deux stations Dans cette figure,  $d_{is}$  est la distance inter station,  $t_{is}$  le temps inter station, le triangle en noir (pointillé) représente la vitesse commerciale moyenne inter station, tandis que la ligne curviligne représente les différentes phases des temps d'accélération, de circulation normale et de décélération du véhicule entre deux stations.

### 3.3.2.1.4.3 La distance inter stations

Les distances entre stations peuvent être très variables. Dans notre travail de thèse nous considérons une valeur moyenne  $d_{is}$  qui s'exprime en kilomètres. Ces distances inter station sont logiquement plus importantes sur les métros, au-delà de 600 mètres, exceptée la ligne C

du métro de Lyon. Les tramways se situent en général en dessous de 600 mètres, excepté les tramways de la Défense en région parisienne (885 m) et d'Orléans (738 m). Elles sont plus faibles sur les premières lignes des anciens réseaux : Saint-Étienne (291 m), Marseille (333 m), Nantes (383 m). La figure 3-7 donne les distances inter station des quelques réseaux de France selon les modes de transport.



**Figure 3-7 : Diagramme des distances inter station des Transports en commun urbains en mètres [PAN]**

#### 3.3.2.1.4.4 La durée moyenne inter stations

C'est la durée moyenne que met un véhicule pour passer d'une station à l'autre. Dans notre travail de thèse, nous désignons le temps de parcours inter stations par  $T_{is}$ . Il s'exprime en heures. Il est lié aux paramètres précédents par la relation :

$$T_{is} = \frac{d_{is}}{V_{is}} \quad [h]$$

#### 3.3.2.1.4.5 Le temps d'arrêt en stations



C'est le temps nécessaire à la descente et la montée des voyageurs. Nous considérons une valeur moyenne que nous désignons dans notre travail de thèse par le terme  $T_s$ . Il s'exprime en heures.

#### **3.3.2.1.4.6 Le nombre de stations**

C'est une donnée directement liée à la longueur de la ligne, à la zone géographique d'influence et au débit recherché. Il correspond au rapport de la longueur de la ligne  $L_l$  par la distance moyenne inter stations  $d_{is}$ . Pour une même longueur, deux lignes peuvent avoir un nombre de stations différent en raison des densités différentes de population pour un périmètre donné ou selon les possibilités topographiques ou urbaines. Ce nombre peut être diminué pour des raisons économiques (prix des stations), mécaniques (augmentation de la vitesse commerciale), mais au détriment de la qualité de service. Il est désigné par  $n_s$ , c'est un nombre sans dimensions. Parfois on parle de densité de station qui s'obtient par estimation du nombre de stations rapporté à un kilomètre de ligne. Dans notre travail de thèse, nous la désignons par le terme  $d_s$ , qui s'exprime en nombre par kilomètres.

#### **3.3.2.1.4.7 Intervalle entre véhicules**

C'est une donnée variable selon le mode de transport en commun et la longueur du matériel utilisé. En heure de pointe, lorsque la fréquence d'exploitation doit augmenter, l'intervalle entre véhicules diminue et cela peut présenter des risques d'accidents. Le phénomène s'inverse aux heures creuses ou pendant les heures de nuit. L'intervalle entre véhicule traduit en fait une distance de sécurité entre deux véhicules. Nous l'appelons  $i_v$ . Il s'exprime en kilomètres. L'intervalle entre véhicules porte une condition dite de sécurité que nous allons expliciterons plus loin.

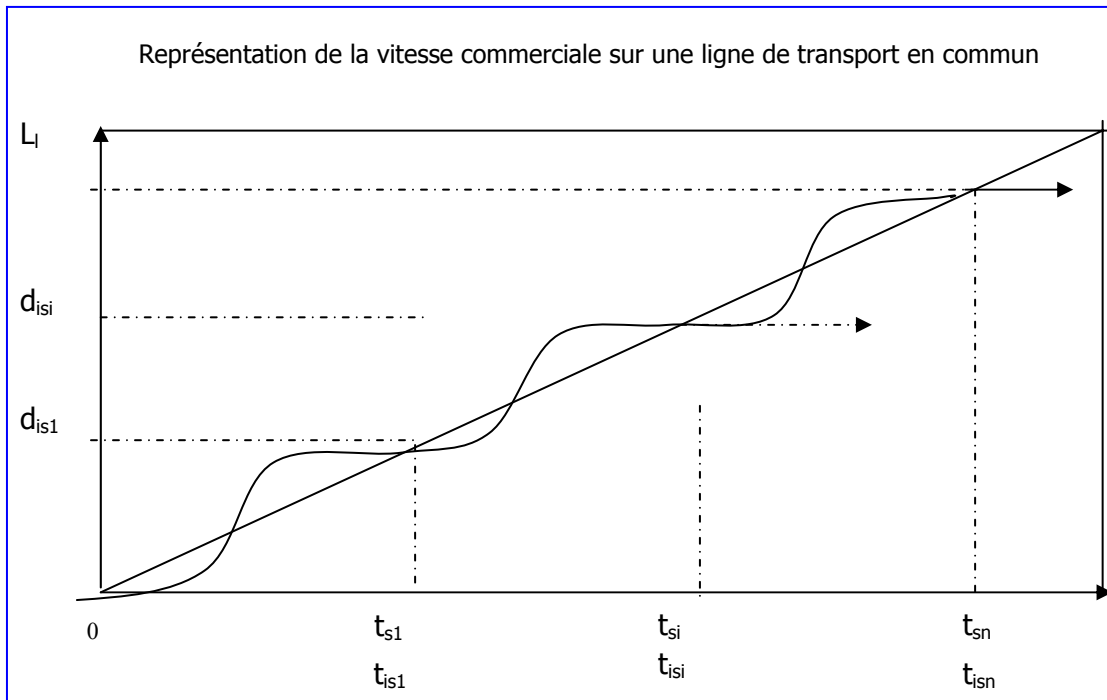
#### **3.3.2.1.5 Paramètres liés à l'exploitation**

### 3.3.2.1.5.1 La fréquence

La fréquence est une donnée essentielle pour caractériser le débit. Car son inverse est l'intervalle de passage qui traduit la cadence de passage entre deux véhicules. C'est une fonction complexe qui dépend de plusieurs paramètres (distance entre stations  $d_{is}$ , intervalle entre véhicules  $i_v$ , vitesse entre stations  $v_{is}$ , nombre de stations  $n_s$ , temps d'arrêt en station  $T_s$ , nature de la station, intervalle de passage théorique et vitesse commerciale... Sa valeur théorique est directement déduite de l'équation fondamentale du débit pour une capacité donnée, mais ne correspond pas toujours à la réalité comme le verrons plus loin.

### 3.3.2.1.5.2 La vitesse commerciale

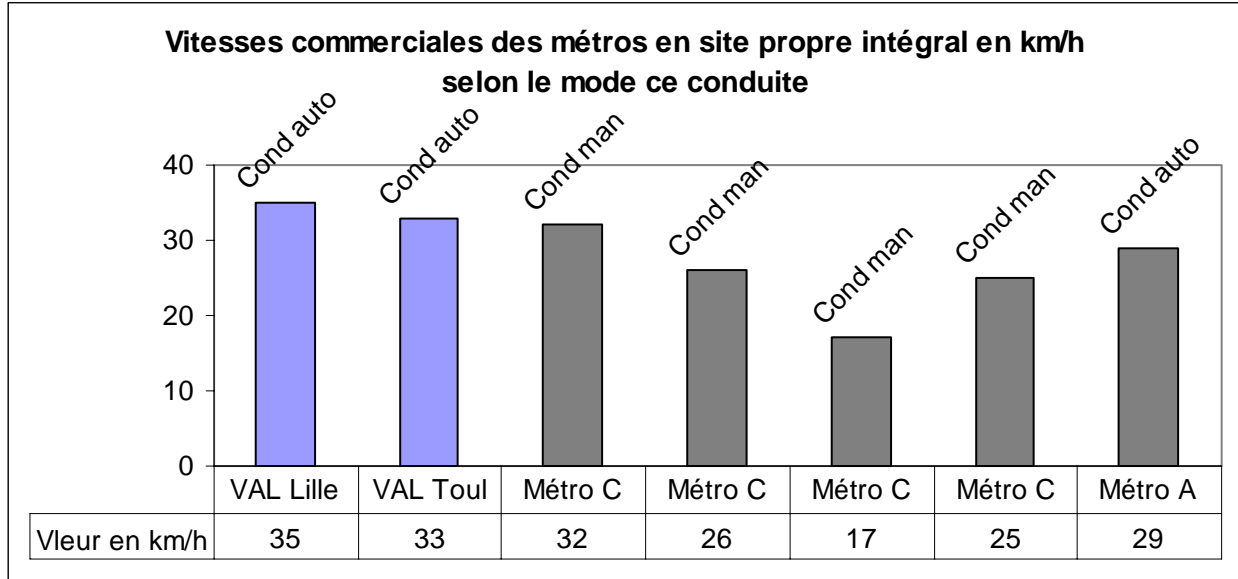
Ou vitesse d'exploitation d'un moyen de transport en commun. Elle correspond à la vitesse moyenne utile à l'utilisateur. Elle tient compte des vitesses précisées ci-dessus, du temps d'arrêt aux stations et, si le mode de transport en commun n'est pas en site propre, des contraintes du trafic. Habituellement, elle permet de classer les transports en commun par ordre croissant : autobus insérés dans la circulation générale, autobus bénéficiant de mesures ponctuelles (couloirs réservés, priorité à certains carrefours), tramway en site propre, métros. La vitesse commerciale d'une ligne de transport est fonction de sa **longueur**, des **distances entre stations**, du temps entre stations, des **intervalles entre véhicules**, du **nombre de stations**, de la **fréquence** et de la **nature du site**. De ce fait, elle a une influence directe sur les coûts d'exploitation et sur la fréquentation des transports en commun. Dans notre travail de thèse, nous la désignons  $V_{com}$ . Elle s'exprime en km/h. La figure 3-8 donne une représentation graphique de la vitesse commerciale sur une ligne de transport en commun.



**Figure 3-8 : Représentation de la vitesse commerciale sur une ligne de transport en commun**

Dans cette figure,  $L_l$  est la longueur de la ligne,  $d_{is1}$  première distance inter station,  $d_{isi}$  distance entre deux stations quelconques,  $t_{s1}$  premier temps d'arrêt en station,  $t_{is1}$  premier temps de parcours inter station,  $t_{si}$  temps d'arrêt dans une station quelconque,  $t_{isi}$  temps de parcours entre deux stations consécutives quelconques,  $t_{sn}$  dernier temps d'arrêt en station,  $t_{isn}$  dernier temps de parcours inter station.

Selon la base de données sur les transports en commun en site propre, les métros automatiques à petit gabarit de type VAL (Lille : 35 km/h, Toulouse : 33 km/h) sont les plus rapides avec plus de 30 km/h, grâce à la légèreté du matériel et à l'automatisme intégral. Le métro classique (avec conducteur) de Marseille affiche une très bonne vitesse de 32 km/h, celui de Lyon est un peu en deçà avec 26 km/h, mais cette vitesse cache des disparités importantes du matériel. La ligne C de Lyon est à crémaillère et a une vitesse de 17 km/h, les lignes A et B classiques ont une vitesse de l'ordre de 25 km/h et la ligne D automatique à grand gabarit affiche une vitesse de 29 km/h **[PAN]**. La figure 3-9 rappelle les vitesses commerciales de quelques métros selon le mode de conduite.



**Figure 3-9 : Diagramme en bâton des vitesses commerciales des transports en commun en site propre intégral en km/h [PAN].**

Contrairement aux métros, les tramways ne bénéficient pas de sites propres intégraux. Les tramways de Marseille et de Saint Etienne sont très dépendants de la circulation générale et la vitesse commerciale se situe à un niveau bas respectivement 15 km/h pour Marseille et 16 km/h pour Saint Etienne.

Le tramway de Lyon avec 15 km/h a affiché une mauvaise performance en 2001 pour sa première année d'exploitation. La vitesse s'est aujourd'hui améliorée sur la ligne 2 avec 18 km/h, mais elle reste faible sur la ligne 1 avec 14 km/h.

On notera que les tramways de Nantes, Grenoble et Strasbourg perdent 1 à 2 km/h par rapport aux données de 1998. Par contre les nouveaux tramways de Montpellier et Orléans ont de très bonnes vitesses avec 21 km/h. Plus loin on verra que la vitesse a une influence directe sur les coûts d'exploitation et sur la fréquentation. La figure 3-10 rappelle les vitesses commerciales de quelques réseaux de Tramway dans les principales villes de France.

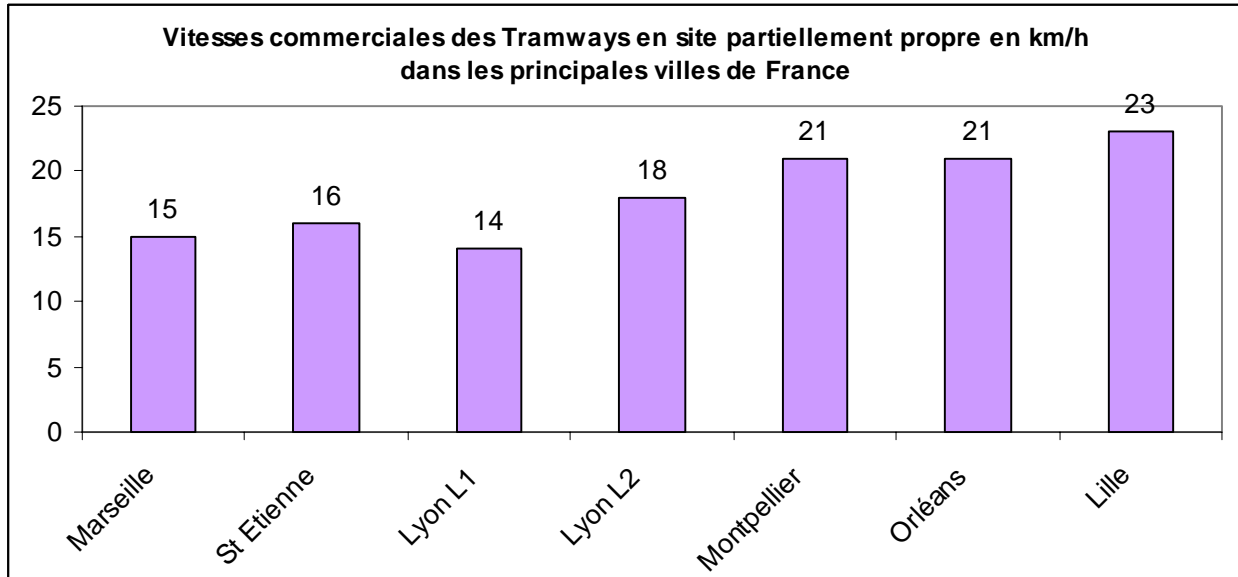


Figure 3-10 : Diagramme en bâton des vitesses commerciales des transports en commun en site partiellement propre en km/h [PAN].

### 3.3.2.1.5.3 La nature de la station

Elle influe sur le temps d'arrêt selon qu'elle est une gare multimodale ou de correspondance, une gare intermédiaire ou un terminus. La particularité d'une gare multimodale est le changement de modes de transports, les correspondances pouvant entraîner un flux important de voyageurs. Une station terminus à l'opposé ne présente pas d'enjeu si elle n'est pas multimodale.

## 3.4 Etablissement de l'équation de débit théorique horaire $Q_{théo}$

L'équation qui permet d'évaluer le débit théorique horaire  $Q_{théo}$  de la ligne est donnée par la relation suivante :

$$Q_{théo} = C.f \quad Eq : 3.1$$

Ce débit est issu d'une enquête transport et une ligne peut se voir alimentée par d'autres lignes en rabattement comme nous le verrons au chapitre 4. Les paramètres associés à  $Q_{théo}$  sont donc la capacité moyenne  $C$  des véhicules et la fréquence moyenne d'exploitation de la ligne. Cela a pour conséquence de supposer implicitement que  $C$  et  $f$  soient connues pour connaître  $Q_{théo}$ .

### 3.4.1 Analyse théorique par étapes

Elle consiste à mener un raisonnement analytique à partir des paramètres qui pourraient influencer ou modifier l'expression fondamentale du débit théorique horaire précédemment établie

#### 3.4.1.1 Première étape : choix du débit

*Hyp 3.1*

Si par hypothèse, les premières **données** sont le débit de la ligne  $Q_{théo}$  et la capacité du véhicule (un bus, un bus articulé, 1 ou 2 rames de tramway, 1 ou 2 ou 4 voitures de métro...) selon le mode de transport choisi, alors de l'équation *Eq:3.1* on déduit la fréquence  $f$  telle que :

$$f = \frac{Q_{théo}}{C} \quad \text{Eq:3.1.1} \quad [1/h]$$

Cette fréquence représente le nombre des véhicules par heure. D'après l'équation *Eq:3.1*, et en tenant compte de l'hypothèse *Hyp 3.1*, pour modifier le débit  $Q_{théo}$  il faut nécessairement modifier la fréquence  $f$ . Mais en pratique, on ne peut pas accéder directement à la fréquence puisqu'elle est une fonction complexe qui dépend de plusieurs paramètres notamment le nombre de véhicules  $n_v$ , la vitesse commerciale  $V_{com}$  et la longueur de la ligne  $L_l$ . D'après ce qui précède, et en tenant compte d'un nombre de véhicules donné en raison des conditions d'exploitation et de maintenance, on peut écrire en première approximation que la fréquence est donnée par la relation

$$f = n_v \frac{V_{com}}{L_l} \quad Eq : 3.1.2 \quad [1/h]$$

Dans cette relation  $n_v$  est le nombre théorique de véhicules en service par heure dans un sens,  $V_{com}$  est en kilomètres par heure et  $L_l$  en kilomètres. Par conséquent, en reportant  $Eq : 3.1.2$  dans  $Eq : 3.1$ , l'expression du débit se met sous la forme :

$$Q_{théo} = C \cdot n_v \cdot \frac{V_{com}}{L_l} \quad Eq : 3.2$$

#### 3.4.1.2 Deuxième étape : choix de la vitesse commerciale

*Hyp 3.2*

Suite à cette première analyse, on voit apparaître dans l'équation  $Eq : 3.1.2$ , une deuxième **donnée** : la vitesse commerciale  $V_{com}$ , qui est fonction du type de véhicule, du mode de transport utilisé et du site. En supposant fixe, la capacité  $C$  et la longueur de la ligne  $L_l$ , on en déduit que l'équation  $Eq : 3.2$  dépend du nombre de véhicules  $n_v$  ; ce qui permet d'établir un premier critère économique. Dans le chapitre 4, nous préciserons à l'aide des calculs, les vitesses commerciales pratiques pouvant être atteintes par les différents modes de transports en commun et permettant d'établir le lien entre la vitesse commerciale et le critère économique..

Cependant, pour que l'objectif de vitesse commerciale  $V_{com}$  soit atteint, il faut considérer les différents temps constituant le temps total nécessaire à un véhicule pour parcourir la ligne. Dans ces conditions, la vitesse commerciale tient compte de l'ensemble des temps et se décompose en temps inter station  $T_{is}$  et en temps d'arrêt en stations  $T_s$ . En faisant l'hypothèse d'équirépartition des stations sur toute la ligne (sans laquelle il n'est pas possible d'avoir la même distance inter station sur toute la ligne et sur laquelle nous reviendront) et en supposant que  $T_{is}$  et  $T_s$  sont des valeurs moyennes, on peut écrire que la somme des temps est donnée par la relation :

$$\sum T = (n_s - 1)T_{is} + n_s T_s \quad Eq : 3.2.1$$

Dans cette relation, on voit apparaître le nombre de stations  $n_s$  sur lequel on reviendra en détail en chapitre 4. En revenant à la définition initiale de la vitesse, et en tenant compte de la relation *Eq : 3.2.1*, on établit l'expression de la vitesse commerciale sous la forme :

$$V_{com} = \frac{L_l}{(n_s - 1)T_{is} + n_s T_s} \quad Eq : 3.2.2$$

Puis en reportant l'équation *Eq : 3.2.2* dans *Eq : 3.2*, l'expression du débit devient :

$$Q_{théo} = C.n_v \cdot \frac{1}{(n_s - 1)T_{is} + n_s T_s} \quad Eq : 3.3$$

On remarque d'après cette équation que la modification du débit dépend de  $n_s$ , de  $T_{is}$  et de  $T_s$ .

### 3.4.1.3 Troisième étape : choix du nombre de stations

#### *Hyp 3.3*

Si pour des raisons urbanistiques, le nombre de stations  $n_s$ , (ce point sera approfondi plus loin), est la troisième **donnée**, alors la modification de *Eq : 3.3* passe soit par celle du temps en stations  $T_s$ , soit par celle du temps inter stations  $T_{is}$ . Si de plus on fixe  $T_{is}$ , alors l'équation *Eq : 3.3* dépendra uniquement de  $T_s$ . En pratique  $T_s$  dépend à son tour de plusieurs paramètres : la longueur du véhicule  $L_v$ , le nombre de portes par véhicule qui se traduit par le taux d'ouverture  $t_o$ , la modernité des stations qui se mesure par le système d'affichage d'informations, le nombre de distributeurs de billets, l'ergonomie... ce qui en fait le deuxième facteur économique. Car, le coût de réalisation d'une station dépend là aussi du site, du mode de transport, du nombre et surtout de la nature des stations.



### 3.4.1.3.1 Estimation théorique de la distance inter station moyenne optimale

Le nombre de stations est lié à la longueur de la ligne comme dit précédemment, ainsi qu'à la densité de la population habitant à proximité de la ligne. La formule prenant en compte le nombre de stations  $n_s$  peut être simplifiée grâce à l'hypothèse d'équirépartition lorsque la vitesse commerciale est considérée sans prise en compte claire des temps d'attente en début de ligne ainsi que du temps nécessaire à la descente des passagers en fin de parcours. Compte tenu de ce fait, on peut réécrire l'expression Eq : 3.2.1 sous la forme :

$$\sum T = n_s (T_{is} + T_s) \quad Eq : 3.3.1$$

Puis, celle de la vitesse commerciale s'établit sous la forme

$$V_{com} = \frac{L_t}{n_s (T_{is} + T_s)} \quad Eq : 3.3.2$$

### 3.4.1.4 Quatrième étape : choix du temps inter stations

*Hyp 3.4*

Si on suppose  $Q_{théo}$ ,  $C$  et  $T_s$  donnés, on peut déduire  $T_{is}$  à condition de vérifier sa compatibilité avec le site urbain.

La modification du débit  $Q_{théo}$  compte tenu de  $T_{is}$  renseigne nécessairement sur la nature du site selon qu'il est propre, partagé, ou prioritaire aux feux de signalisation et sur le type de véhicules et le mode de transport.

Toute analyse faite, d'après les hypothèses *Hyp 3.3* et *Hyp 3.4*, et en considérant que  $Q_{théo}$ ,  $V_{com}$  et  $n_s$  sont des données progressives prises dans cet ordre, notre étude peut se résumer à deux variables temporelles : le temps en stations  $T_s$  qui engendre par le biais des stations un investissement pour leur aménagement, le coût d'équipements (**deuxième facteur économique**) et le temps inter stations  $T_{is}$  qui engendre l'investissement sur les infrastructures de Génie Civil et les équipements de régulation (**troisième facteur économique**), puis à une variable physique  $n_v$ , le nombre de véhicules, engendrant un investissement pour l'acquisition des matériels et le coût de personnel (**premier facteur économique**). Dans ce qui suit, nous explicitons et vérifions les différentes conditions d'étude, puis élaborons les scénarios d'optimisation.

### 3.4.2 Vérification des différentes conditions

#### 3.4.2.1 Condition de sécurité du projet

Elle a pour objectif de vérifier la compatibilité entre le temps mis par le véhicule entre deux stations  $T_{is}$ , et le site urbain. En effet, l'intervalle entre véhicules  $i_v$  doit respecter une distance de sécurité. La compatibilité entre capacité du véhicule et le débit recherché quelle soit la nature du site doit respecter cette distance. Cette condition se traduit mathématiquement en termes moyennés par la relation suivante :

$$i_v \geq \frac{V_{com}}{f} \quad Eq : 3.3.2 \quad : [km],$$

En reportant *Eq : 3.3.2*, dans l'équation *Eq : 3.1*, on obtient la relation suivante :

$$Q_{théo} \leq C \cdot \frac{V_{com}}{i_v} \quad Eq : 3.4$$

Cette condition est toujours respectée dans la mesure où le débit théorique est inversement proportionnel à la distance inter station qui à son tour est largement supérieure à l'intervalle entre véhicule.

### 3.4.2.2 Condition d'insertion dans le trafic

Elle a pour but d'assurer la compatibilité entre la fréquence de rotation des véhicules et leur insertion dans le trafic. La fréquence peut se voir être imposée par les règles de priorité aux feux, soit  $f > f_p$ . La traduction mathématique de cette condition est donnée par la relation.

$$f > f_p \quad Eq:3.4.1 \quad [1/h]$$

$f$  est une fréquence théorique presque toujours jamais atteinte, tandis que  $f_p$  procède de l'intervalle de passage qui est une valeur qui prend en compte la réalité du trafic.

En reportant Eq:3.4.1, dans l'équation Eq:3.1, on obtient la relation suivante :

$$Q_{théo} \leq C.f_p \quad Eq:3.5$$

### 3.4.3 Différents scénarios d'optimisation

Ils permettent d'évaluer quantitativement les effets des différents paramètres les uns par rapport aux autres dans le but de mesurer leur importance pour le projet. L'application des différentes formules ci-dessus permet de justifier le raisonnement présenté au chapitre 4 par rapport aux combinaisons choisies.

#### Formule

$$Q_{théo} = C.f \quad Eq:3.1$$

### 3.4.3.1 Scénario N°1

On suppose une capacité  $C$  faible et on augmente la fréquence  $f$ . Dans ce scénario, l'augmentation de la fréquence doit être compatible avec les conditions d'insertion dans le trafic. Ce cas se présente par exemple pour une exploitation en site totalement réservé et totalement automatique (VAL de Lille).

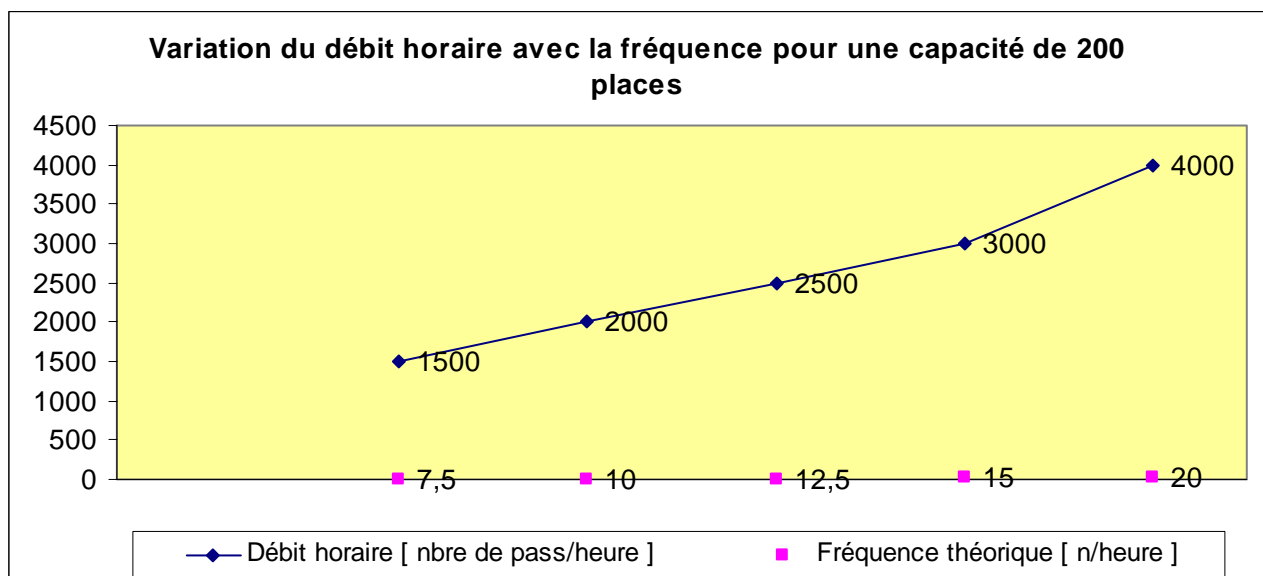


Figure 3-11 : Courbe de la variation du débit avec la fréquence pour une capacité fixe

### 3.4.3.2 Scénario N°2

On augmente la capacité  $C$  et on suppose une fréquence  $f$  plus faible. La diminution de la fréquence a pour corollaire, la diminution de la fluidité. Quand la capacité des véhicules augmente, les temps d'arrêt en station augmentent également.

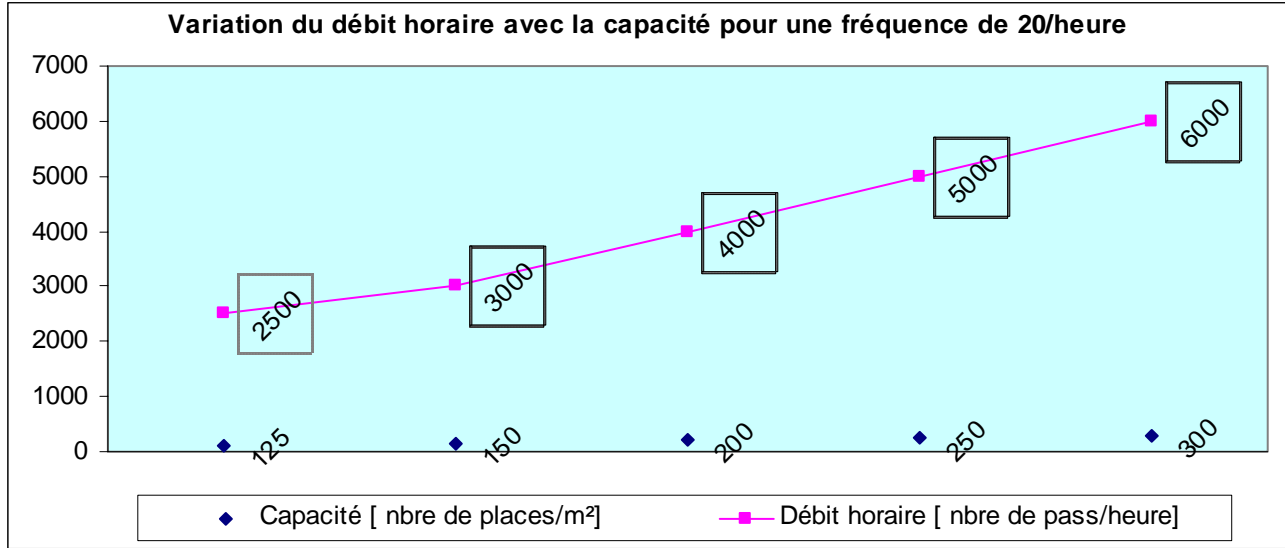


Figure 3-12 : Courbe de la variation du débit avec la capacité pour une fréquence donnée

### 3.4.3.2.1 Ajustement

Dans ce cas, l'ajustement a pour objectif de trouver un compromis en établissant l'équilibre entre ces deux scénarios. D'après les courbes ci-dessus, un ajustement astucieux nous conduirait en considérant les conditions de sécurité et d'insertion dans le trafic général à prendre une fréquence de 15 véhicules par heure avec une capacité de 300 places ; ce qui ferait un débit horaire de 4500 passagers par heure et par sens.

En s'appuyant sur l'équation Eq : 3.2

$$Q_{théo} = C \cdot n_v \cdot \frac{V_{com}}{L_l} \quad Eq : 3.2$$

on peut distinguer d'autres scénarios.

### 3.4.3.3 Scénario N°3

On augmente le nombre de véhicules  $n_v$  avec une vitesse commerciale  $V_{com}$  plus faible. L'augmentation du nombre de véhicules a non seulement des conséquences économiques (coût d'investissement plus élevé), mais également pose des problèmes d'encombrement et donc de congestion ; sans oublier que l'intervalle de sécurité entre les véhicules se trouve réduit.

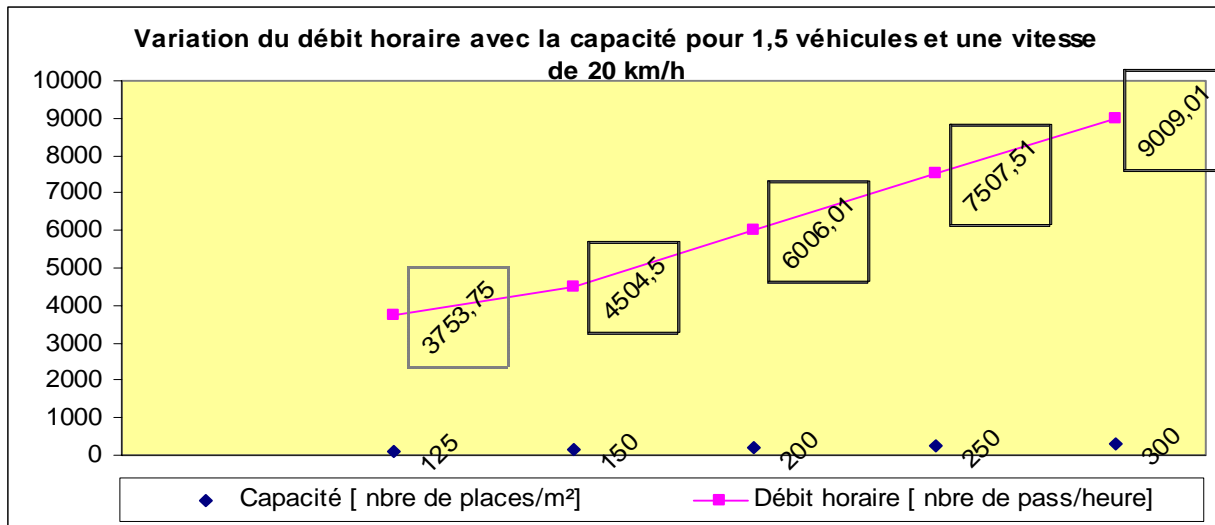


Figure 3-13 : Courbe de la variation du débit avec la capacité pour un nombre de véhicules donné et une vitesse fixe

### 3.4.3.4 Scénario N°4

On diminue le nombre de véhicules  $n_v$  et on augmente la vitesse commerciale  $V_{com}$ . L'augmentation de la vitesse a pour conséquence immédiate d'augmenter les risques d'accidents si le mode de transport n'est pas en site exclusivement réservé, même avec une forte priorité aux feux. Cela impose donc d'augmenter les distances inter stations pour exploiter convenablement les véhicules, ce qui a pour conséquence d'augmenter les temps de marche entre stations pour les piétons, et donc de diminuer la qualité de service.

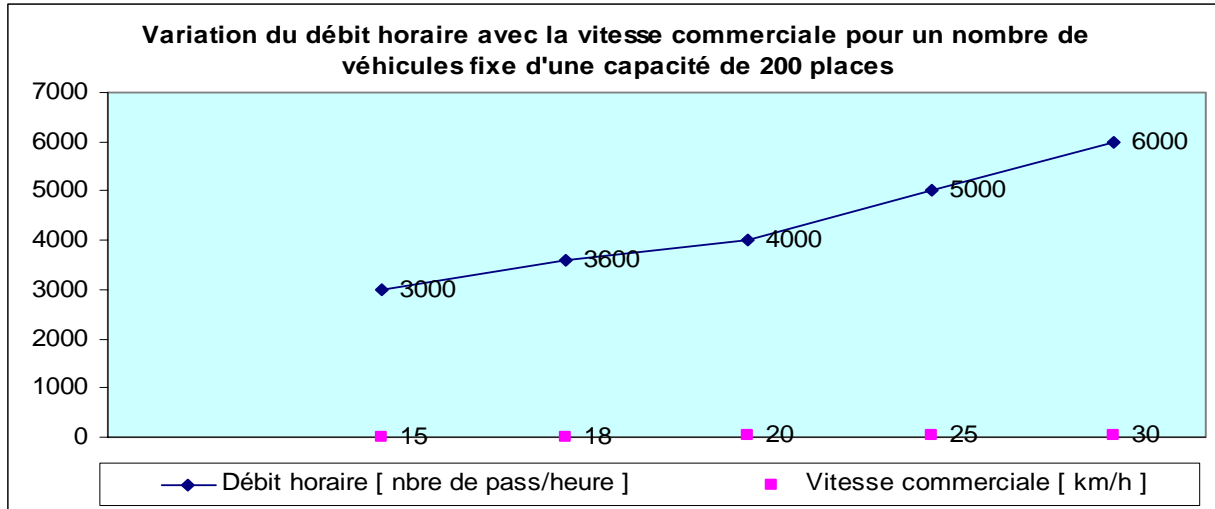


Figure 3-14 : Courbe de la variation du débit avec la vitesse pour un nombre de véhicules donné et une capacité fixe

#### 3.4.3.4.1 Ajustement

Afin de trouver un équilibre, il faut veiller à assurer convenablement la compatibilité entre la vitesse commerciale  $V_{com}$  et le nombre de véhicules  $n_v$ , dans un contexte urbain donné. D'après ce qui précède, un ajustement possible serait par exemple d'avoir 3 véhicules d'une capacité de 250 places exploités avec une vitesse commerciale de 20 km/h, ce qui permettrait d'avoir un débit horaire de 15 000 passagers par heure par sens sur une ligne de 1km de long.

En s'appuyant sur l'équation Eq:3.3

$$Q_{théo} = C.n_v \cdot \frac{1}{n_s (T_{is} + T_s)} \quad Eq:3.3$$

on peut distinguer d'autres scénarios qui tiennent compte à la fois du nombre de stations et des différents temps.

### 3.4.3.5 Scénario N°5

On augmente le nombre de stations  $n_s$ , en supposant le temps inter stations  $T_{is}$  et le temps en station  $T_s$  fixes. L'augmentation du nombre de stations  $n_s$  engendre des coûts plus importants et doit être compensée par plus des véhicules avec une capacité plus importante. Ce cas est envisageable sur une ligne courte à vocation structurante sur laquelle se rabattent plusieurs lignes secondaires.

### 3.4.3.6 Scénario N°6

On diminue le nombre de stations  $n_s$ , en supposant toujours les temps  $T_{is}$  et  $T_s$  fixes. Ce scénario est typique de lignes longues qui nécessitent des grandes vitesses d'exploitation.

#### 3.4.3.6.1 Ajustement

La justification du nombre de stations  $n_s$  nécessaires pour une longueur de ligne donnée et compatible aux temps en stations  $T_s$  sera donnée par calcul au chapitre 4.

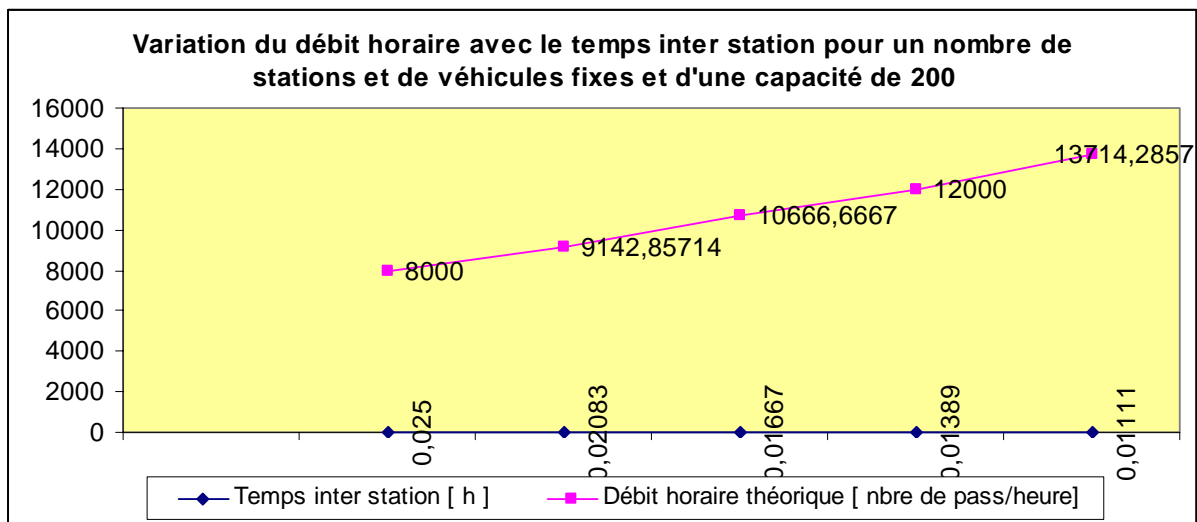


Figure 3-15 : Courbe de la variation du débit avec la vitesse pour un nombre de véhicules donné et une capacité fixe



### 3.4.3.7 Scénario N°7

On augmente le temps inter stations  $T_{is}$ , on suppose le nombre de stations  $n_s$  et  $T_s$  fixes. L'augmentation du temps inter stations  $T_{is}$  doit être compensée par la fréquence de la ligne. Ce scénario est typique des transports en commun en site partagé ou mixte dans lesquels la vitesse commerciale baisse en raison du trafic. De ce fait, ce scénario est en porte en faux avec l'objectif d'augmentation de la vitesse commerciale.

### 3.4.3.8 Scénario N°8

On diminue le temps inter stations  $T_{is}$ , on suppose le nombre de stations  $n_s$  et  $T_s$  fixes. La diminution du temps inter stations  $T_{is}$ , entraîne l'augmentation de la vitesse commerciale. Pour l'assurer, il faut séparer le transport en commun du trafic général et opter pour le transport en commun en site propre. Il est important pour ce scénario de prendre une valeur acceptable de  $T_s$ .

#### 3.4.3.8.1 Ajustement

La justification des propos tenus sur la possibilité d'envisager ces deux scénarios est donnée en chapitre 4 à l'aide de valeurs numériques. En somme, tous ces ajustements dépendent du contexte du site, selon qu'on est en site normal ou en site plus complexe.

### 3.4.4 Analyse par nature de site.

L'étude analytique réalisée jusqu'ici ne tient compte que des valeurs moyennes obtenues sur l'ensemble de la ligne. Or le rabattement des lignes secondaires sur une ligne principale dont la mission est de concentrer au maximum le débit a pour conséquence immédiate d'augmenter la fréquentation et donc de rendre plus difficile la circulation en alourdissant le trafic. De ce fait, et en raison de la nature parfois très complexe de certains sites, nous réduisons l'échelle d'analyse

en la ramenant à un niveau local c'est-à-dire sur une distance inter station qu'il est possible bien entendu d'étendre à l'ensemble de la ligne afin de déterminer les profils exactes des vitesses.

#### 3.4.4.1 Cas d'un site normal

Sur un site normal, en dépit des ajustements faits ci-dessus, le temps inter station  $T_{is}$  est une fonction complexe qui influe sur la vitesse normale  $V_n$ . Dans l'expression

$$V_{is} = \frac{d_{is}}{T_{is}} \quad Eq:3.3.1,$$

le temps inter station  $T_{is}$  contient le temps d'accélération  $t_a$ , le temps de parcours à vitesse normale  $t_n$ , et le temps de décélération  $t_d$ . En posant :

$$T_{is} = t_a + t_n + t_d \quad Eq:3.3.1.1,$$

L'expression de la vitesse inter station devient

$$V_{is} = \frac{d_{is}}{t_a + t_n + t_d} \quad Eq:3.3.2$$

La figure 3-11 permet de donner une répartition graphique de la distance inter station en fonction des différents temps qui composent le temps inter station.

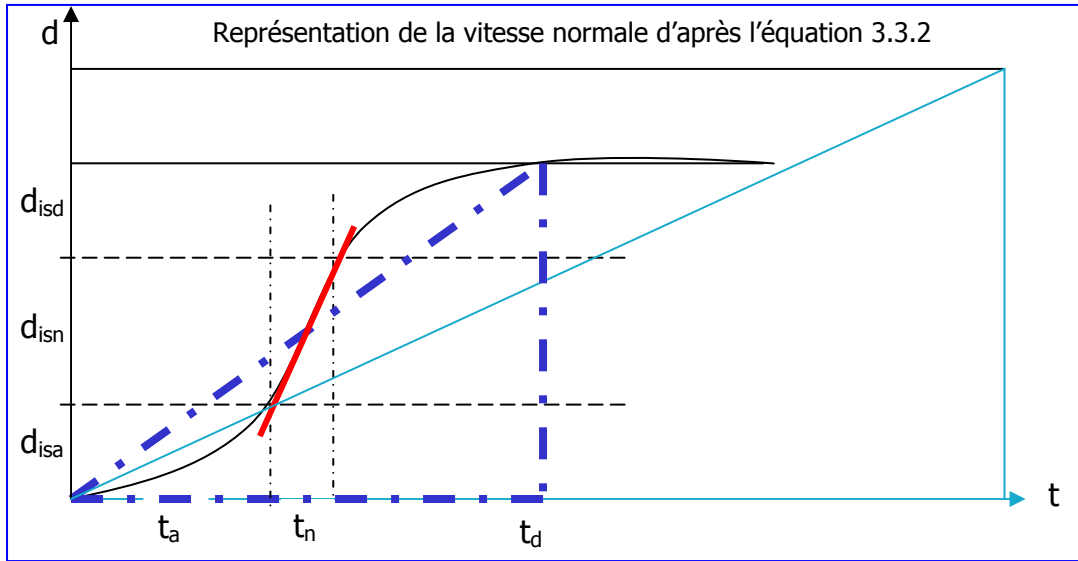


Figure 3-16 : Répartition des distances en fonction des temps, analyse entre deux stations. Dans cette figure, le triangle en bleu (pointillé) représente la vitesse moyenne inter station. Dans cette figure  $d$  est la distance en mètres,  $d_{isa}$  distance inter station sur laquelle le véhicule accélère,  $d_{isn}$  distance inter station sur laquelle le véhicule roule en régime normal,  $d_{isd}$  distance inter station sur laquelle le véhicule décélère,  $t$  le temps en secondes,  $t_a$  temps d'accélération du véhicule,  $t_n$  temps de circulation en régime normal,  $t_d$  temps de décélération du véhicule.

De l'équation Eq : 3.7 , on peut extraire le temps normal

$$t_n = T_{is} - (t_a + t_d) \quad Eq:3.3.2.1$$

Puis déduire l'expression de la vitesse normale

$$V_n = \frac{d_{isn}}{t_n} \quad Eq:3.3.3$$

Dans ces conditions, la vitesse normale se représente sur une portion de la distance inter station avec une pente plus forte. La figure 3-12 donne une représentation graphique de la vitesse normale.

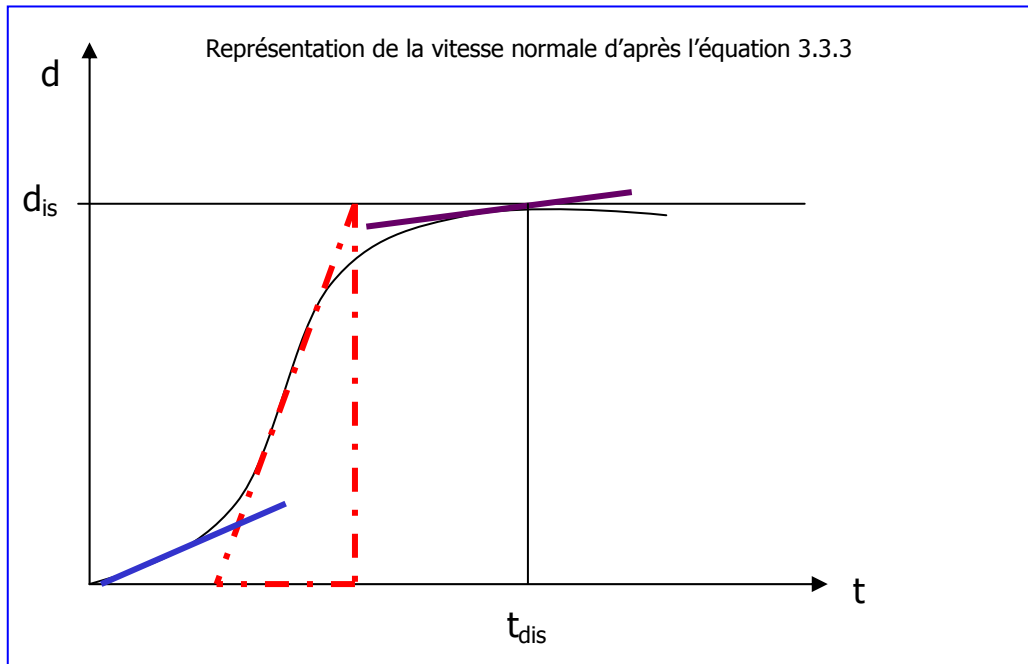


Figure 3-17 : Répartition des distances en fonction des temps, analyse entre deux stations. Dans cette figure, le triangle en rouge (pointillé) représente la vitesse inter station d'un véhicule en accélération normale. Dans cette figure  $d$  est la distance en mètres,  $d_{is}$  distance inter station,  $t$  le temps en secondes,  $t_{is}$  temps inter station.

Mais,  $t_n$  n'étant pas le seul temps pour parcourir la distance inter station  $T_{is}$ , compte tenu de l'équation Eq : 3.3.2.1, l'expression de la vitesse normale  $V_n$  devient

$$V_n = \frac{d_{isn}}{T_{is} - (t_a + t_d)} \quad Eq : 3.3.4$$

En raison du fait que l'accélération est liée à la puissance du véhicule et au confort des passagers, que la décélération est liée au freinage, qui induit un ralentissement agissant sur le confort des passagers, enfin que la vitesse normale est liée à la puissance du véhicule, au code de la route et au respect des règles de sécurité, pour augmenter la vitesse inter station  $V_{is}$ , il faut

nécessairement diminuer le temps d'accélération  $t_a$  et le temps de décélération  $t_d$ . A l'issue de cette analyse donc, on peut noter que dans le cas d'une étude approfondie ou lorsque les distances inter station deviennent faibles, il est indispensable de tenir compte du temps d'accélération  $t_a$  et du temps de décélération  $t_d$  selon le type de véhicule.

### 3.4.4.2 Cas d'un site avec feux

Sur un site complexe, par exemple avec des carrefours munis de feux de signalisation pilotés, on peut distinguer deux cas possibles : le cas sans feux et le cas avec feux. Le premier est identique à celui d'un site normal et l'expression de la vitesse inter station est également identique.

$$V_{is} = \frac{d_{is}}{t_a + t_n + t_d} \quad Eq : 3.3.5$$

En revenant à l'équation 3.2, puis en considérant la nouvelle expression de la vitesse inter station, l'équation du débit horaire se met sous la forme :

$$Q_{théo} = C \cdot \frac{1}{t_a + t_n + t_d} \quad Eq : 3.4$$

Cette expression dépend fortement de  $t_n$ . Car, pour une capacité fixe, les  $t_a$  et  $t_d$  se déduisent assez facilement par le calcul pour une vitesse donnée. En tenant compte des feux, l'expression de la vitesse inter station devient

$$V_{is} = \frac{d_{is}}{t_a + t_n + \Delta t_n + t_d} \quad Eq : 3.4.1$$

Dans cette relation, le terme  $\Delta t_n$  désigne un temps d'arrêt supplémentaire pendant lequel le véhicule est sensé ralentir à cause du feu. La figure 3-13 donne une représentation graphique de la pente de la vitesse inter station.

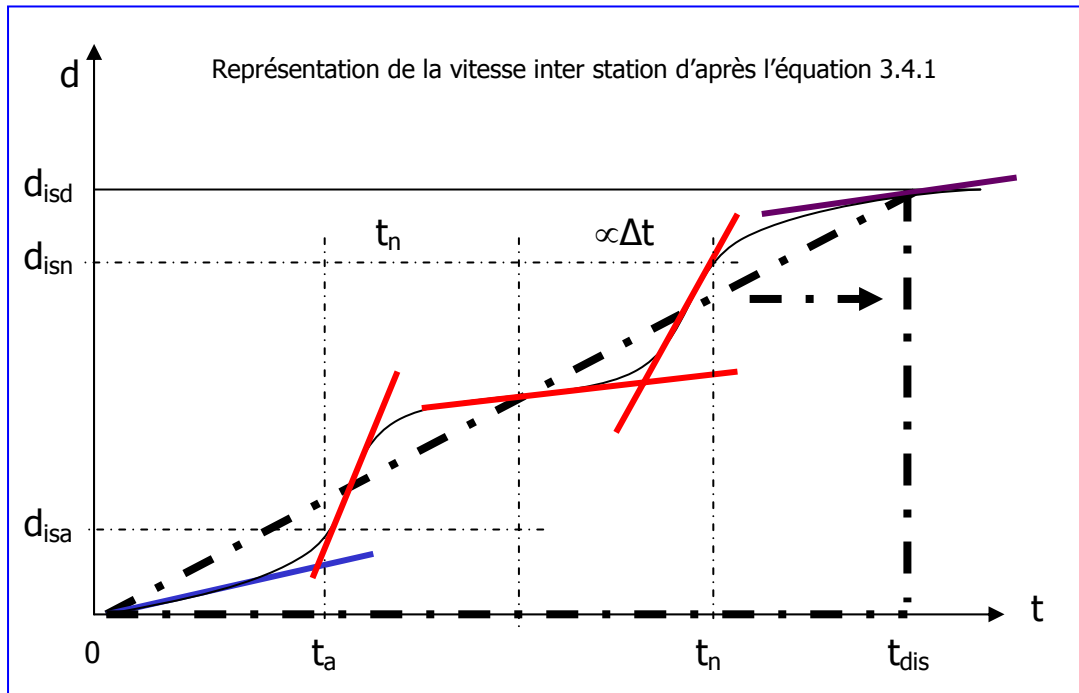


Figure 3-18 : Représentation de la vitesse commerciale entre deux stations. Dans cette figure, le triangle en noir (pointillé) représente la vitesse commerciale moyenne inter station.  $d$  est la distance en mètres,  $d_{isa}$  distance inter station sur laquelle le véhicule accélère,  $d_{isn}$  distance inter station sur laquelle le véhicule roule en régime normal,  $d_{isd}$  distance inter station sur laquelle le véhicule décélère,  $t$  le temps en secondes,  $t_a$  temps d'accélération du véhicule,  $t_n$  temps de circulation en régime normal,  $t_d$  temps de décélération du véhicule,  $\Delta t_n$  le temps d'arrêt ou de ralentissement du véhicule dans aux carrefours.

D'après cette expression, pour augmenter la vitesse commerciale, il faut augmenter la vitesse inter station. Ce qui se traduit par l'exigence d'avoir un site au maximum réservé avec un bon pilotage des feux, une accélération et une décélération élevées, puis une vitesse normale  $V_n$  proche du maximum autorisé par le code de la route et qui respecte les règles de sécurité.

En revenant une fois de plus à l'équation 3.2, puis en considérant également, l'expression de la vitesse inter station, l'équation du débit horaire devient :

$$Q_{théo} = C \cdot \frac{1}{t_a + t_n + \Delta t_n + t_d} \quad Eq : 3.5$$

### 3.4.4.3 Cas d'un site avec feux au carrefour

Sur un site ayant des feux aux carrefours, la gestion des flux est plus difficile. En raison du nombre de carrefours et des distances très aléatoires les séparant. Elle peut être régulée par une gestion centralisée des feux représentée par un diagramme simplifié à droites en pente représentant la vitesse commerciale comme le montre la figure ci-dessous.

$$Q_{théo} = C \cdot \frac{1}{t_a + t_n + \alpha \Delta t_n + t_d} \quad Eq : 3.6$$

Pour cette formule, le temps de passage doit être un multiple des temps prioritaires aux feux dans les carrefours. Puis, il faut veiller à ce que les véhicules se croisent au niveau des carrefours dans la configuration standard suivante :

Cela impose d'abord de faire une étude détaillée de la géographie de la ligne, portant sur l'implantation des carrefours et l'analyse du trafic automobile, en définissant plus ou moins exactement le rythme des feux.

Puis, il faut rechercher la fréquence optimale incluant les marges de sécurité nécessaires, comme par exemple un temps d'arrêt en station  $T_s$  trop long pour éviter la propagation des perturbations sur toute la ligne.

### **3.5 Conclusion partielle**

En France, il y avait traditionnellement une coexistence de deux modes de transports en commun dans les grandes villes : le système de métro et les bus plus ou moins améliorés.

Depuis les années 80, il y a l'apparition d'autres modes concurrentiels comme le VAL, dont le premier a été mis en service en 1983 à Lille, puis le tramway moderne en 1985 à Nantes, qui connaît un essor particulier depuis 2000.

Le renouveau des bus et des trolleybus date d'après 2000. La tendance actuelle est à l'inflation avec l'accompagnement systématique de la création d'une nouvelle ligne par une restructuration urbaine lourde qui engendre des dépenses considérables. Depuis les années 2000, le Bus à Haut Niveau de Service montre le souci de modérer les dépenses. La future ligne T3 du tramway de Valenciennes par ailleurs vise l'économie par la création d'une ligne à unique et dédoublement au droit des stations.

L'exemple du tramway de Lyon sur une ancienne voie ferrée et bientôt la cohabitation avec le Tramway Express reliant l'Aéroport à Saint Exupéry, l'exemple du T2 de Paris également sur une ancienne ligne emprise ferroviaire, sont autant d'exemples qui montrent la nécessité de modérer les dépenses dans les transports en commun par une bonne exploitation des sites.



### 3.6 Illustration par un exemple

#### 3.6.1 Schéma de compréhension

Ce schéma montre un véhicule en mouvement représenté par une roue en circulation sur une ligne de transport en commun. Cette ligne a une longueur de 10 km, une distance moyenne inter station de 0,500km. La figure 3-19 montre le schéma de compréhension du problème étudié.

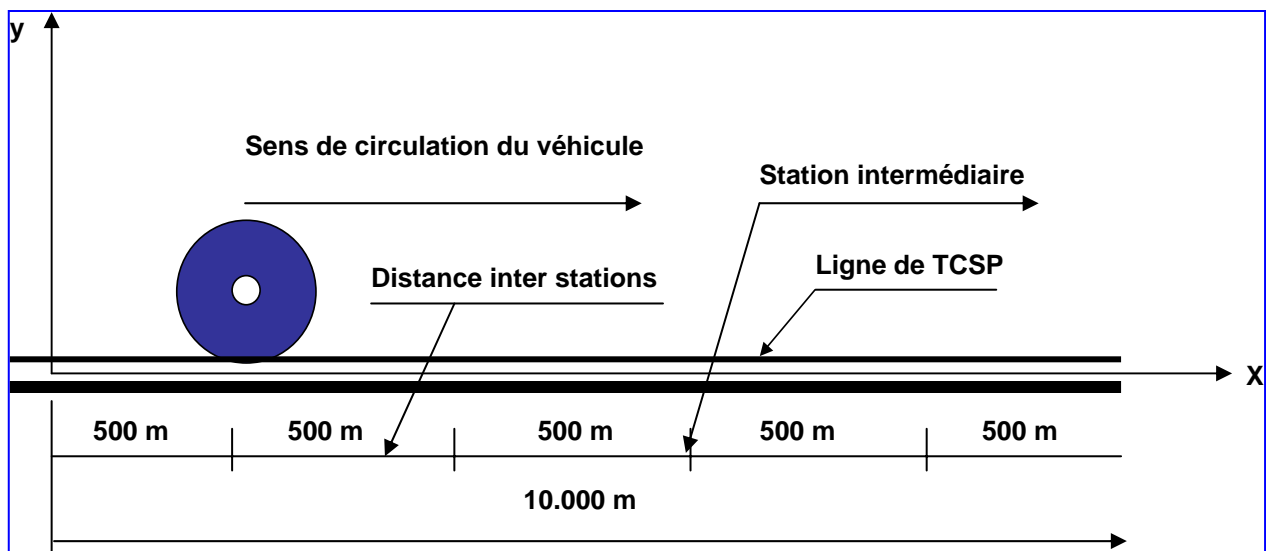


Figure 3-19 : Schéma illustratif du problème étudié

#### 3.6.2 Données liées à la zone géographique

D'après les enquêtes ménages menées auprès d'un échantillon de population d'une ville, 9000 personnes sont susceptibles d'utiliser le tramway pour leur déplacement à une heure de pointe. En tenant compte d'un taux de désistement avec une marge d'erreur de 5%, on peut estimer le débit horaire à 4275 personnes/heure par sens.

### 3.6.3 Données liées au véhicule

Le mode de transport de transport en commun choisi pour l'exploitation de cette ligne est le tramway. Le véhicule utilisé a 35 m de long, 2,35 m de large, une vitesse maximale de 75 km/h et une capacité moyenne de 200 personnes.

### 3.6.4 Données liées à l'offre d'exploitation et à la fréquentation

L'insertion du projet dans le tissu urbain pose plusieurs contraintes. Le trafic existant limite l'exploitation de la ligne à une vitesse commerciale de 20 km/h et un intervalle de passage de 4 minutes.

### 3.6.5 Application pour le premier niveau d'analyse

Elle concerne l'illustration du premier niveau en faisant une analyse par étapes sur l'ensemble de la ligne de transport en commun.

#### 3.6.5.1 Première étape : choix du débit

En supposant le débit horaire choisi  $Q_{théo} = 4275 \text{ pass} / h$ , alors d'après l'équation

$$Q_{théo} = C.f \quad Eq : 3.1,$$

On déduit la fréquence telle que :

$$Q_{théo} = C.f \rightarrow f = \frac{Q_{théo}}{C}$$

$$AN: f = \frac{4275}{200} = 21,375 \approx \frac{21}{h}$$

Or, d'après le trafic, et en tenant compte à la fois de la longueur de la ligne et de la vitesse commerciale, il est quasiment impossible de faire 21 rotations par heure soit un intervalle de passage de moins de trois minutes qui n'est possible que sur les grandes distances inter station

avec une vitesse commerciale élevée. Mais, connaissant l'intervalle pratique de passage (4 minutes), la vitesse commerciale et la longueur de la ligne, on peut calculer le nombre de véhicule, puis déduire la capacité nécessaire. D'abord, on calcule :

- la fréquence

$$f_p = \frac{1}{i_p} = \frac{1}{4h/60}$$

$$AN : f_p = 15/h$$

Puis à l'aide de l'équation Eq:3.1.2, on déduit le nombre de véhicules  $n_v$  :

$$f = n_v \frac{V_{com}}{L_l} \quad Eq:3.1.2 \quad [1/h] \rightarrow n_v = \frac{f \cdot L_l}{V_{com}}$$

$$n_v = f \cdot \frac{L_l}{V_{com}} = 15/h \cdot \frac{10km}{20km/h}$$

$$AN : n_v = 7,5$$

Le nombre de véhicules étant connu grâce à la fréquence pratique et la vitesse commerciale étant fixée à 20 km/h d'après les données du problème, le premier cas se résume à :

$$1er \text{ CAS} : \begin{cases} n_v : \text{fixé} = 7,5 \\ V_{com} : \text{fixée} = 20km/h \\ C \text{ nécessaire} = ? \end{cases}$$

L'objectif de cette première étape étant de déterminer la capacité nécessaire compatible avec un intervalle de passage de 4 minutes et une vitesse commerciale de 20 km/h, à l'aide de l'équation Eq:3.1 et en tenant compte de la relation Eq:3.1.2, on déduit l'expression de la capacité telle que :

$$C = \frac{Q_{théo} \cdot L_l}{n_v \cdot V_{com}} = \frac{4275 \text{ pass/h} \cdot 10km}{7,5 \cdot 20km/h}$$

$$AN : C = 285 \text{ pass}$$

Au passage, en raison des conditions d'entretien et de maintenance, on peut majorer de 50% le nombre de véhicules soit 11 véhicules au total.

### **3.6.5.1.1 Estimation des coûts**

#### **3.6.5.1.1.1 Le coût d'investissement**

Selon les coûts présentés à la section 2.8.1 du chapitre 2 concernant l'investissement, le coût moyen d'investissement pour un kilomètre de voie double étant environ de 20 millions d'euros pour un tramway, notre ligne d'illustration coûterait en investissement, un montant de 200 millions d'euros. Nous rappelons que l'investissement comprend l'ensemble du projet c'est-à-dire l'infrastructure, les matériels roulants, les installations fixes, les équipements et les stations.

#### **3.6.5.1.1.2 Le coût d'exploitation**

Le coût d'exploitation pour un véhicule par an et par kilomètre étant de 4 à 4,9 euros pour une rame de tramway, le réseau, avec un nombre de 12 véhicules coûterait en terme d'exploitation annuelle entre 480 € et 588 € par an. Ces coûts d'exploitation comprennent l'achat d'énergie, les charges de personnel, la sous-traitance, les frais généraux et les impôts et taxes.

### **3.6.5.2 Deuxième étape : choix de la vitesse commerciale**

En tenant de l'expression  $Eq:3.2$ , la vitesse commerciale apparaît clairement. Mais elle se trouve éclipsée dans la relation  $Eq:3.3$  grâce à laquelle l'hypothèse d'équpartition conduit à obtenir la relation  $Eq:3.5$ . Par ailleurs, les différents temps n'apparaissent pas aussi dans l'expression  $Eq:3.2$ . Ainsi, en croisant les équations  $Eq:3.2$  et  $Eq:3.3$ , on met en évidence à la fois la vitesse commerciale et les différents temps. De plus, la vitesse commerciale étant fixée à 20 km/h, puis en supposant le temps d'attente en station  $T_s$  fixé à 30 secondes, il nous est possible de présenter le deuxième cas suivant :

$$2\text{ème CAS : } \begin{cases} V_{com} : \text{fixée} = 20\text{km/h} \\ T_s : \text{fixé} = 30\text{s soit } \frac{1\text{h}}{120} \\ T_{is} = ? \end{cases}$$

Ainsi, d'après l'équation Eq : 3.2.2, une fois la vitesse commerciale et le temps en station  $T_s$  égal à une valeur moyenne valable pour tous les modes de transport de 30 secondes sont fixés, on déduit le temps inter station  $T_{is}$ . Mais, compte tenu des données du problème sur l'offre d'exploitation de la ligne et la distance moyenne inter station, on détermine :

- d'abord le nombre de stations  $n_s$  par l'expression

$$n_s = \frac{L_l}{d_{is}} = \frac{10\text{km}}{0,500\text{km}}$$

$$AN : n_s = 20$$

- ensuite le temps total théorique de parcours de la ligne

$$T_l = \frac{L_l}{V_{com}} = \frac{10\text{km}}{20\text{km/h}} = 0,5\text{h}$$

$$AN : T_l = 0,5\text{h}$$

puis, de l'expression

$$V_{com} = \frac{L_l}{(n_s - 1)T_{is} + n_s T_s} \quad \text{Eq : 3.2.2}$$

$$20\text{km/h} = \frac{10\text{km}}{19T_{is} + 20 \cdot \frac{1\text{h}}{120}}$$

Enfin, on déduit que

$$\rightarrow T_{is} = \frac{10\text{km} - 20\text{km/h} \cdot 20 \cdot \frac{1\text{h}}{120}}{19 \cdot 20\text{km/h}}$$

$$AN : T_{is} = 0,018\text{h} \approx \frac{1}{60}$$

Ce résultat égal à 1 minute pour parcourir 500 m est irréaliste puisque cela nécessiterait une vitesse inter station d'une valeur de :

$$V_{is} = \frac{d_{is}}{T_{is}} = \frac{0,500km}{\frac{1h}{60}}$$

$$AN : V_{is} = 30km / h$$

Et compte tenu de l'accélération et des conditions de sécurité, l'hypothèse sur la vitesse inter station calculée  $V_{is} = 30km/h$  est difficilement compatible avec le matériel utilisé. Si on retient une vitesse inter station de 20km/h, on recalcule alors le temps inter station  $T_{is}$  :

$$T_{is} = \frac{d_{is}}{V_{is}} = \frac{0,500km}{20km / h}$$

$$AN : T_{is} = \frac{5km}{200km / h} = \frac{1}{40}h$$

En revenant à l'expression Eq:3.2.2 , puis en tenant compte de la valeur du nouveau temps inter station, on recalcule la vitesse commerciale :

$$V_{com} = \frac{L_t}{(n_s - 1)T_{is} + n_s T_s} \quad Eq:3.2.2$$

$$= \frac{10 km}{19 \cdot \frac{1}{40} h + 20 \cdot \frac{1}{120} h} = \frac{10 km}{\frac{3 \cdot 19 \cdot h + 20 \cdot h}{120}}$$

$$AN : V_{com} = \frac{1200km}{77h} \approx 15,6km / h$$

Après ce calcul, la vitesse malheureusement tombe en dessous de l'objectif fixé à 20 km/h. Mais, compte tenu de la précision des formules et de leurs résultats, une simplification peut être proposée :

### Proposition 1

$n_s$  équivalent à  $n_{dis}$

Nous supposons que le nombre de stations est égal au nombre d'intervalles. Dans ces conditions et compte tenu de l'hypothèse d'équirépartition faite au chapitre 3, on peut écrire l'expression de la vitesse commerciale sous la forme :

$$V_{com} = \frac{L_l}{n_s (T_{is} + T_s)} \quad Eq : 3.2.3$$

Suite à cette proposition, le troisième cas peut être envisagé de la façon suivante :

$$\begin{array}{l} 3^{\text{ème}} \text{ CAS :} \\ \left. \begin{array}{l} V_{com} : \text{fixée} = 20 \\ T_s : \text{fixé} = \frac{1}{120} \\ T_{is} : \text{fixé} = \frac{3}{120} = \frac{1}{40} \\ n_s = ? \end{array} \right\} \end{array}$$

En reportant ces valeurs dans l'expression Eq:3.2.3, on déduit le nombre de stations nécessaires  $n_s$

$$V_{com} = \frac{L_l}{n_s (T_{is} + T_s)} = 20 \text{ km/h} = \frac{10 \text{ km}}{n_s \left( \frac{1}{40} h + \frac{1}{120} h \right)}$$
$$n_s = \frac{10 \text{ km}}{20 \text{ km/h} \left( \frac{1}{40} h + \frac{1}{120} h \right)} = \frac{1}{\left( \frac{1}{20} + \frac{1}{60} \right)}$$

$$AN : n_s = \frac{60}{4} = 15$$

### 3.6.5.3 Troisième étape : choix du nombre de stations

Pour optimiser l'exploitation de la ligne en fonction du nouveau nombre de stations, on recalcule, le temps inter station tout en respectant les conditions d'exploitation imposées par le trafic. Pour cela, on fait une deuxième proposition.

Proposition 2

augmenter  $d_{is}$

Cette deuxième proposition nous conduit au quatrième cas :

$$4^{\text{ème}} \text{ CAS : } \begin{cases} V_{com} : \text{fixée} = 20 \\ T_s : \text{fixé} = \frac{1}{120} \\ n_s = 15 \\ T_{is} = ? \end{cases}$$

Compte tenu de la longueur de la ligne et du nombre de stations, on calcule :

- la distance inter station

$$n_s = \frac{L_l}{d_{is}} \rightarrow d_{is} = \frac{L_l}{n_s}$$
$$d_{is} = \frac{10km}{15} = 0,667$$

$$AN : d_{is} = 0,7km$$

Puis de l'expression

$$V_{com} = \frac{L_l}{n_s (T_{is} + T_s)} \quad Eq : 3.2.3$$

et on en déduit que

$$\rightarrow T_{is} = \frac{L_l}{V_{com} \cdot n_s} - T_s = \frac{10km}{20km/h \cdot 15} - \frac{1}{120} h$$

$$AN : T_{is} = 0,025 = \frac{1,5}{60} h$$

Il faut donc 1,5 minute pour parcourir 700 m, ce qui est maintenant plus réalisable que précédemment. et cela correspond à une vitesse inter station de :

$$V_{is} = \frac{d_{is}}{T_{is}} = \frac{0,700km}{\frac{1,5h}{60}}$$

$$AN : V_{is} = 28km/h$$



Cet exemple illustre plusieurs points forts parmi lesquels, on précise que :

- plus il y a de stations, plus la vitesse commerciale diminue et le maintien des interdistances de sécurité devient difficile.

- plus les stations sont proches (ce qui revient à la même chose pour une longueur de ligne donnée), et de plus, il faudra des matériels roulants puissants et rapides, et moins il faudra d'obstacles à leur circulation, pour atteindre des vitesses commerciales acceptables.

### 3.6.6 Estimation théorique de la distance inter station moyenne optimale

Le nombre de stations dans notre exemple est de 20. Or à l'étape d'avant projet, il est possible d'estimer le nombre de station. D'après la condition posée,  $L_l < 15 km$ , on peut calculer la distance inter station moyenne à l'aide de la formule :

$$d_{is_{moy}} = \frac{L_l}{(n_s - 1)} \quad Eq : 3.2.1.3$$

En l'appliquant à notre exemple, on obtient :

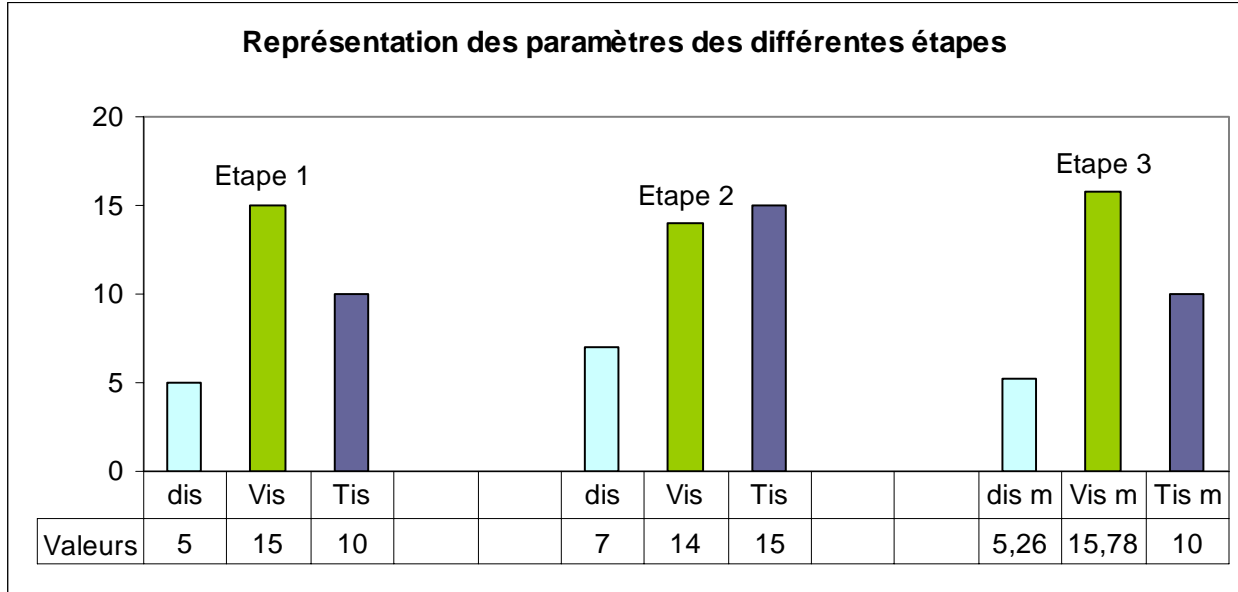
$$\begin{aligned} d_{is_{moy}} &= \frac{L_l}{(n_s - 1)} \quad Eq : 3.2.1.3 \\ &= \frac{10 km}{(20 - 1)} \end{aligned}$$

$$AN : d_{is_{moy}} = 0,526 km \text{ soit } 526 m$$

puis calculer pour cette distance moyenne inter station, la vitesse moyenne inter station en prenant un temps de parcours inter station moyen d'une minute.

$$V_{ismoy} = \frac{d_{is}}{T_{is}} = \frac{0,526 km}{\frac{1h}{60}}$$

$$AN : V_{ismoy} = 31,56 km / h$$



**Figure 3-20 : Représentation des distances inter station, des vitesses inter station, des temps inter station. Dans cette figure,  $d_{is}$  distance inter station,  $d_{ismoy}$  distance inter station moyenne,  $T_{is}$  temps inter station,  $T_{ismoy}$  temps inter station moyen,  $V_{is}$  vitesse inter station,  $V_{ismoy}$  vitesse inter station moyenne.**

### 3.6.6.1 Application pour le deuxième niveau d'analyse

Elle concerne l'illustration du deuxième niveau en faisant une analyse par site sur une distance inter station. Cette application permet de déterminer à l'aide des relevés sur terrain, le profil exact des vitesses commerciales inter station selon une répartition qui tienne compte des paramètres réels. Dans cette partie, nous menons les calculs à partir de la distance inter station moyenne calculée ( $d_{ismoy} = 0,526km$ ) pour une ligne de transport en commun inférieure à 15 km de long et de la vitesse commerciale moyenne inter station  $V_{ismoy} = 31,56km/h$  correspondante. l'ensemble de la ligne de transport en commun.

#### 3.6.6.1.1 Cas d'un site normal

La vitesse inter station sur un site normal avec une distance inter station moyenne optimale en prenant un temps inter station de 1 minute est donnée par la relation

$$V_{is} = \frac{d_{is_{moy}}}{T_{is}} \quad Eq : 3.3.1$$

$$= \frac{0,526 \text{ km}}{\frac{1}{60} \text{ h}},$$

$$AN : V_{is} = 31,56 \text{ km/h}$$

Or, en décomposant le temps inter station  $T_{is}$  en temps d'accélération  $t_a$ , en temps normal  $t_n$ , puis en temps de décélération  $t_d$ , on peut, en se servant des caractéristiques générales d'un Tramway standard, tableau 4-3.

<b>Performances mécaniques d'un Tramway standard</b>	
<b>Traction</b>	
Vitesse maximale	60 km/h
Puissance maximale à la jante en traction	880 kW
Accélération moyenne de 0 à 40 km/h en charge normale et en palier	1.15 m/s <sup>2</sup>
Accélération moyenne de 0 à 60 km/h en charge normale et en palier	0.95 m/s <sup>2</sup>
Accélération résiduelle à 60 km/h en charge normale et en palier	0.40 m/s <sup>2</sup>
<b>Freinage</b>	
Décélération moyenne en freinage maximal de service en charge normale et en palier	1.50 m/s <sup>2</sup>
Décélération moyenne en freinage d'urgence en charge normale et en palier	2.85 m/s <sup>2</sup>
Décélération moyenne en freinage de sécurité en charge normale et en palier	1.80 m/s <sup>2</sup>
<b>Performances générales</b>	
Kilométrage annuel moyen d'un véhicule	60 000 km

**Tableau 3-2 : Performances mécaniques d'un Tramway standard**

décomposer le temps inter station en une somme des temps d'accélération  $t_a$ , temps normal  $t_n$  et temps de décélération  $t_d$  selon l'équation :

$$T_{is} = t_a + t_n + t_d \quad Eq:3.3.1.1,$$

Or, connaissant l'accélération entre deux bornes pour une vitesse donnée, on peut déterminer le temps d'accélération à l'aide de l'équation.

$$t_a = \frac{V}{a} \quad Eq:3.3.1.1.1$$

Dans cette équation,  $V$  est toujours la vitesse inter station,  $a$  est l'accélération, puis  $t_a$  naturellement le temps d'accélération du véhicule.

### Accélération

**Premier cas : accélération moyenne de 0 à 40 km/h en charge normale et en palier**

$$t_a = \frac{V}{a} \quad Eq:3.3.1.1.1$$

$$= \frac{40000m/3600s}{1,15m/s^2}$$

$$AN : t_a = 9,66s$$

De ce résultat, on déduit une distance en accélération  $d_{isa}$  d'environ

$$d_{isa} = V_{is} \cdot t_a \quad Eq:3.3.1.1.2$$

$$= \frac{31,56km}{h} \cdot \frac{9,66h}{3600}$$

$$AN : d_{isa} = 0,085km$$

**Deuxième cas : accélération moyenne de 0 à 60 km/h en charge normale et en palier**

$$t_a = \frac{V}{a} \quad Eq : 3.3.1.1.1$$
$$= \frac{60000m/3600s}{0,95m/s^2}$$

**AN :  $t_a = 17,54s$**

De ce résultat, on déduit une distance en accélération  $d_{isa}$  d'environ

$$d_{isa} = V_{is} \cdot t_a \quad Eq : 3.3.1.1.2$$
$$= \frac{31,56km}{h} \cdot \frac{17,54h}{3600}$$

**AN :  $d_{isa} = 0,154km$**

**Troisième cas : accélération résiduelle à 60 km/h en charge normale et en palier**

$$t_a = \frac{V}{n} \quad Eq : 3.3.1.1.1$$
$$= \frac{60000m/3600s}{0,40m/s^2}$$

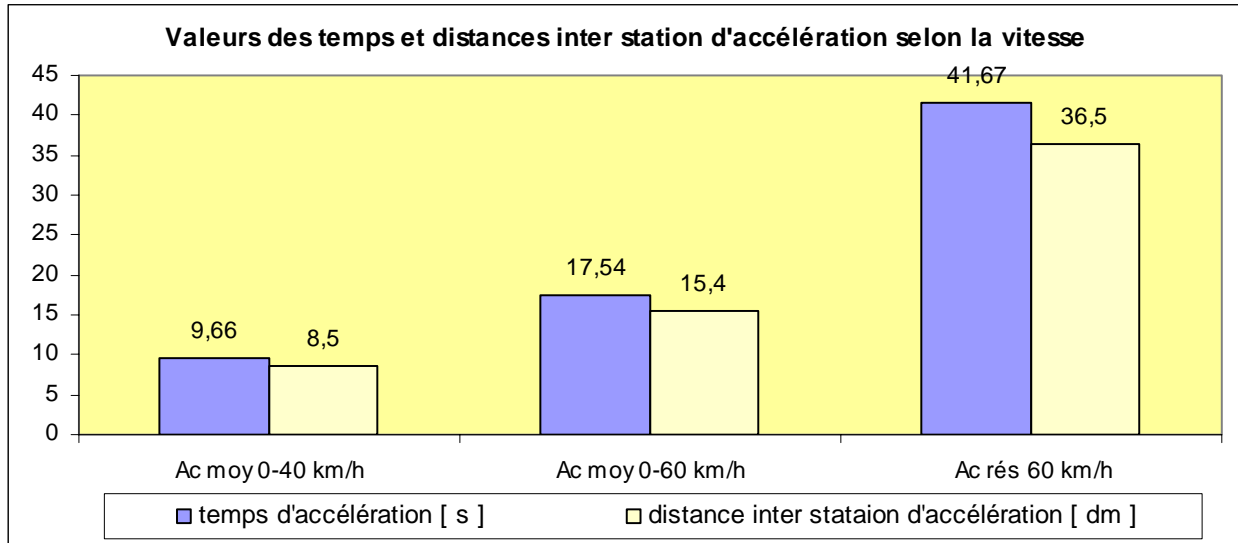
**AN :  $t_a = 41,67s$**

De ce résultat, on déduit une distance en accélération  $d_{isa}$  d'environ

$$d_{isa} = V_{is} \cdot t_a \quad Eq : 3.3.1.1.2$$
$$= \frac{31,56km}{h} \cdot \frac{41,67h}{3600}$$

**AN :  $d_{isa} = 0,365km$**

La figure 3-21 donne les valeurs des temps et distances inter station d'accélération en fonction de la vitesse.



**Figure 3-21 : Valeurs des temps et distances inter station d'accélération selon la vitesse.**

Dans cette figure, Ac moy 0-40 km/h désigne l'accélération moyenne que le véhicule est capable d'atteindre pour une vitesse entre 0 et 40 km/h, Ac moy 0-60 km/h, celle entre 0 et 60 km/h, puis Ac rés 60 km/h, une accélération résiduelle ou permanente à 60 km/h.

puis, le temps de décélération à l'aide de la même équation, mais changement de terme

$$t_d = \frac{V}{d} \quad Eq : 3.3.1.1.1$$

Cette équation est la même, avec  $V$  la vitesse inter station,  $d$  la décélération, puis  $t_d$  naturellement le temps de décélération du véhicule.

### Décélération

**Premier cas : décélération moyenne en freinage maximal de service en charge normale et en palier**

- A une vitesse de 60 km/h

$$t_d = \frac{V}{d} \quad Eq : 3.3.1.1.1$$
$$= \frac{60000m/3600s}{1,50m/s^2}$$

$$AN : t_d = 11,11s$$

De ce résultat, on déduit une distance de décélération  $d_{isd}$  d'environ

$$d_{isd} = V_{is} \cdot t_d \quad Eq : 3.3.1.1.2$$
$$= \frac{31,56km}{h} \cdot \frac{11,11h}{3600}$$

$$AN : d_{isd} = 0,097km$$

- A une vitesse de 40 km/h

$$t_d = \frac{V}{d} \quad Eq : 3.3.1.1.1$$
$$= \frac{40000m/3600s}{1,50m/s^2}$$

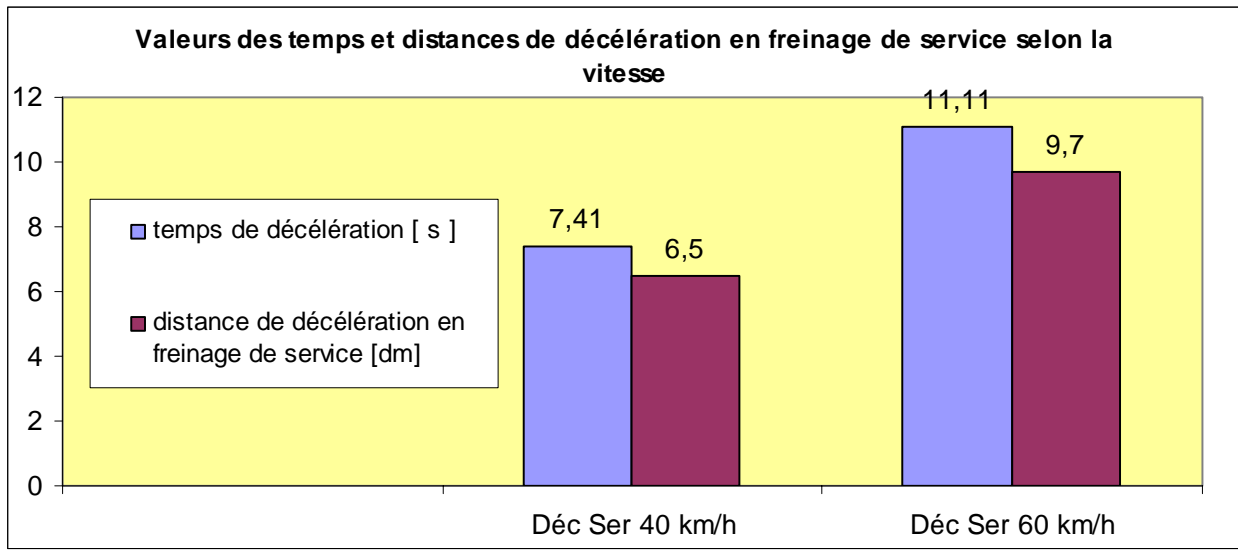
$$AN : t_d = 7,41s$$

De ce résultat, on déduit une distance de décélération  $d_{isd}$  d'environ 0,146 km

$$d_{isd} = V_{is} \cdot t_d \quad Eq : 3.3.1.1.2$$
$$= \frac{31,56km}{h} \cdot \frac{7,41h}{3600}$$

$$AN : d_{isd} = 0,065km$$

La figure 3-22 donne les valeurs des temps et distances de décélération en freinage de service selon la vitesse.



**Figure 3-22 : Valeurs des temps et distances de décélération en freinage de service selon la vitesse.**

Dans cette figure, Déc Ser 40 km/h désigne la décélération moyenne de service que le véhicule est capable de réaliser pour une vitesse de 40 km/h, Déc Ser 60 km/h, celle qu'il peut réaliser à une vitesse de 60 km/h.

**Deuxième cas : décélération moyenne en freinage d'urgence en charge normale et en palier**

**- A une vitesse de 60 km/h**

$$t_d = \frac{V}{d} \quad Eq : 3.3.1.1.1$$

$$= \frac{60000m/3600s}{2,85m/s^2}$$

**AN :  $t_d = 5,85s$**

De ce résultat, on déduit une distance de décélération  $d_{isd}$  d'environ



$$d_{isd} = V_{is} \cdot t_d \quad Eq : 3.3.1.1.2$$

$$= \frac{31,56km}{h} \cdot \frac{5,85h}{3600}$$

$$AN : d_{isd} = 0,05km$$

- A une vitesse de 40 km/h

$$t_d = \frac{V}{d} \quad Eq : 3.3.1.1.1$$

$$= \frac{40000m/3600s}{2,85m/s^2}$$

$$AN : t_d = 3,9s$$

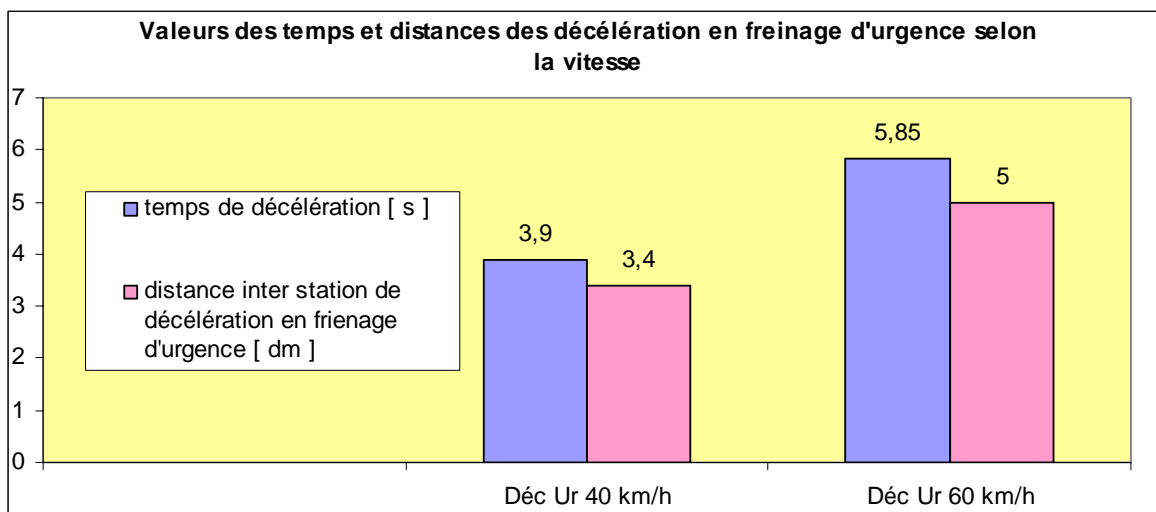
De ce résultat, on déduit une distance de décélération  $d_{isd}$  d'environ

$$d_{isd} = V_{is} \cdot t_d \quad Eq : 3.3.1.1.2$$

$$= \frac{31,56km}{h} \cdot \frac{3,9h}{3600}$$

$$AN : d_{isd} = 0,034km$$

La figure 3-23 donne les valeurs des temps et distances de décélération en freinage d'urgence selon la vitesse.



**Figure 3-23 : Valeurs des temps et distances de décélération en freinage d'urgence selon la vitesse.**

Dans cette figure, Déc Ur 40 km/h désigne la décélération moyenne de service que le véhicule est capable de réaliser pour une vitesse de 40 km/h, Déc Ur 60 km/h, celle qu'il peut réaliser à une vitesse de 60 km/h.

**Troisième cas : décélération moyenne en freinage de sécurité en charge normale et en palier**

- A une vitesse de 60 km/h

$$\begin{aligned}t_d &= \frac{V}{d} \quad Eq : 3.3.1.1.1 \\ &= \frac{60000m/3600s}{1,80m/s^2} \\ AN : t_d &= 9,3s\end{aligned}$$

De ce résultat, on déduit une distance de décélération  $d_{isd}$  d'environ 0,263 km

$$\begin{aligned}d_{isd} &= V_{is} \cdot t_d \quad Eq : 3.3.1.1.2 \\ &= \frac{31,56km}{h} \cdot \frac{9,3h}{3600} \\ AN : d_{isd} &= 0,08km\end{aligned}$$

- A une vitesse de 40 km/h

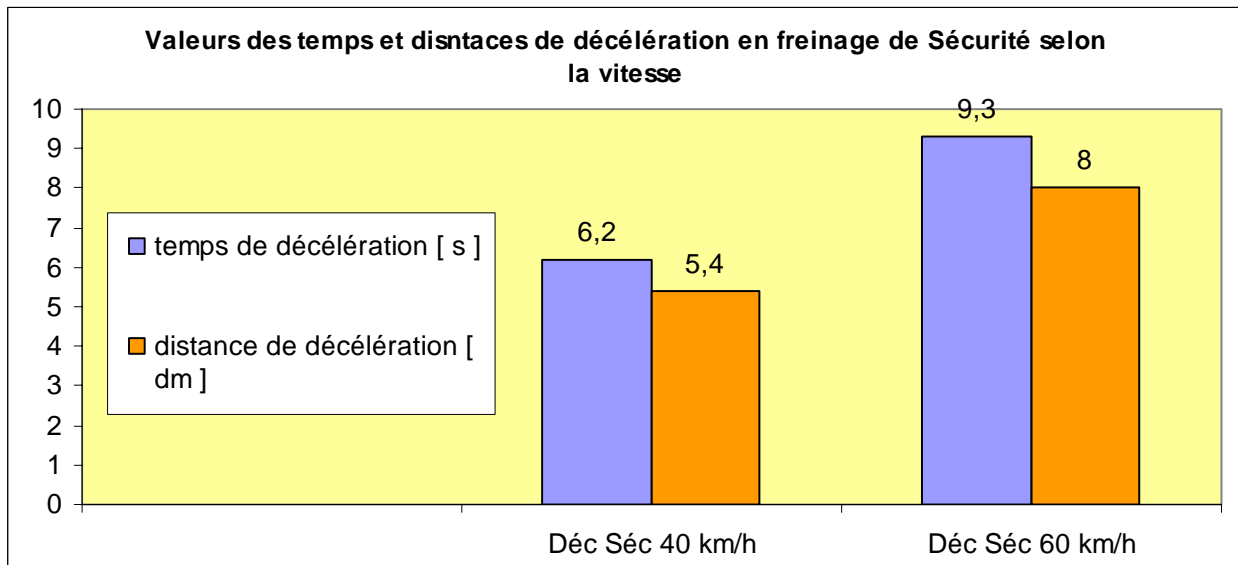
$$\begin{aligned}t_d &= \frac{V}{d} \quad Eq : 3.3.1.1.1 \\ &= \frac{40000m/3600s}{1,80m/s^2} \\ AN : t_d &= 6,20s\end{aligned}$$

De ce résultat, on déduit une distance de décélération  $d_{isd}$  d'environ

$$d_{isd} = V_{is} \cdot t_d \quad Eq : 3.3.1.1.2$$
$$= \frac{31,56km}{h} \cdot \frac{6,20h}{3600}$$

$$AN : d_{isd} = 0,054km$$

La figure 3-24 donne les valeurs des temps et distances de décélération en freinage de sécurité selon la vitesse.



**Figure 3-24 : Valeurs des temps et distances de décélération en freinage de sécurité selon la vitesse.**

Dans cette figure, Déc Séc 40 km/h désigne la décélération moyenne de service que le véhicule est capable de réaliser pour une vitesse de 40 km/h, Déc Séc 60 km/h, celle qu'il peut réaliser à une vitesse de 60 km/h. Toute cette analyse est récapitulée dans la figure 3-25 ci-dessous

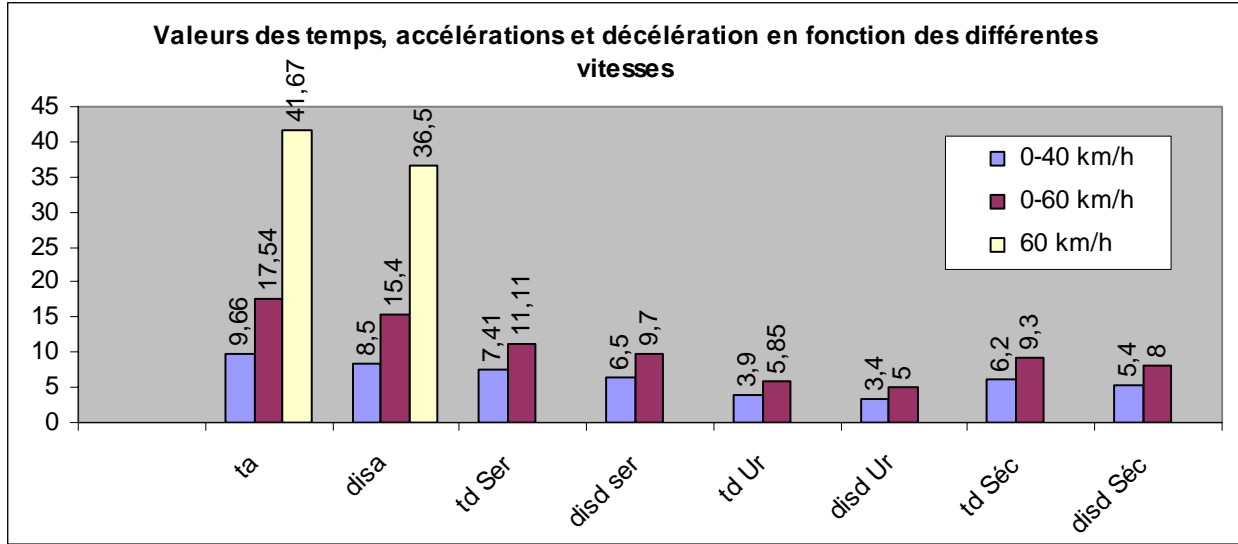


Figure 3-25 : Valeurs des temps, accélération et décélération en fonction des différentes vitesses.

Pour des raisons de sécurité, les distances inter station en accélération et en décélération y compris leurs temps respectifs doivent être préservés pour une vitesse commerciale donnée. De ce fait, pour augmenter la vitesse commerciale moyenne inter station, il n'est possible d'agir que sur le temps et la distance inter station que le véhicule peut parcourir en circulation normale. En revenant donc à l'équation fondamentale de la vitesse puis en tenant compte de la relation Eq : 3.3.1.1, l'expression de la vitesse inter station peut être réécrite sous la forme :

$$V_{is} = \frac{d_{is}}{t_a + t_n + t_d} \quad Eq : 3.3.2 ,$$

de cette équation, on peut déduire la valeur du temps de parcours normal  $t_n$  telle que :

$$t_n = \frac{d_{is}}{V_{is}} - (t_a + t_d) \quad Eq : 3.3.2.1 ,$$

- pour une vitesse maximale du véhicule égale à 40 km/h, le calcul donne

$$t_n = \frac{d_{is}}{V_{is}} - (t_a + t_d) \quad Eq : 3.3.2.1$$

$$= \frac{0,526 km}{31,56 km / h} - \left( \frac{9,66 h + 7,41 h}{3600} \right)$$

$$AN : t_n = 0,00849h \text{ soit } 42,93s$$

De ce résultat, on déduit une distance de parcours normal  $d_{isn}$  d'environ

$$d_{isn} = V_{is} \cdot t_n \quad Eq : 3.3.1.1.2$$

$$= \frac{31,56 km}{h} \cdot \frac{42,93 h}{3600}$$

$$AN : d_{isn} = 0,376 km$$

Ce qui correspond à une vitesse de **8,76 m/s**. Et en augmentant cette vitesse, on diminue le temps de parcours normal.

- pour une vitesse maximale du véhicule égale à 60 km/h, on obtient :

$$t_n = \frac{d_{is}}{V_{is}} - (t_a + t_d) \quad Eq : 3.3.2.1$$

$$= \frac{0,526 km}{31,56 km / h} - \left( \frac{17,54 h + 11,11 h}{3600} \right)$$

$$AN : t_n = 0,005325h \text{ soit } 31,35s$$

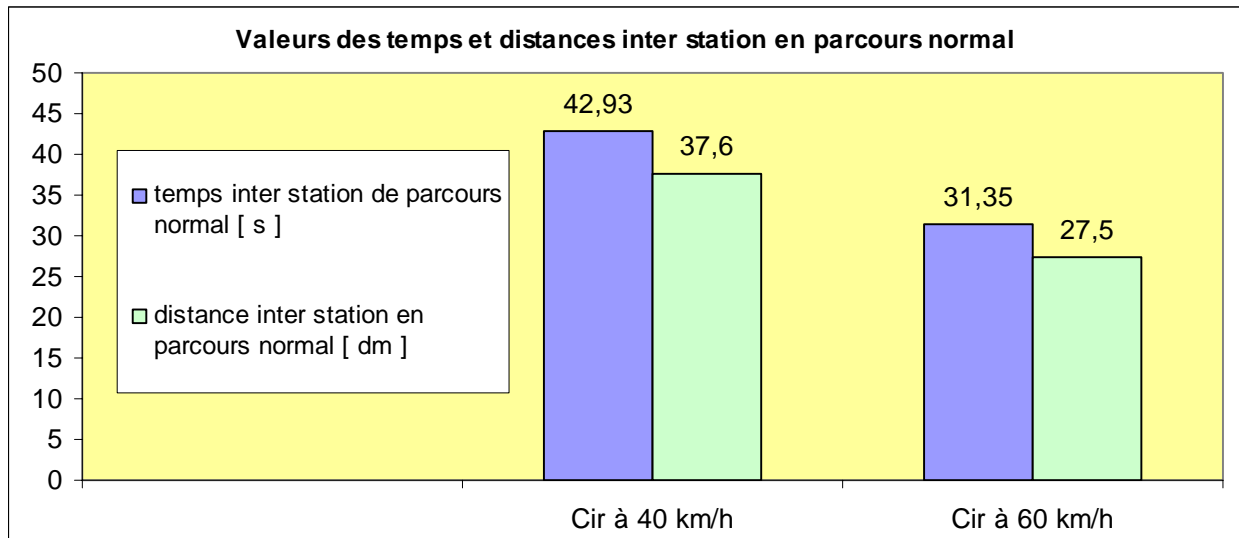
De ce résultat, on déduit une distance de parcours normal  $d_{isn}$  d'environ

$$d_{isn} = V_{is} \cdot t_n \quad Eq : 3.3.1.1.2$$

$$= \frac{31,56 km}{h} \cdot \frac{31,35 h}{3600}$$

$$AN : d_{isn} = 0,275 km$$

Ce qui correspond à la même vitesse de **8,76 m/s**. Et en augmentant cette vitesse, on diminue le temps de parcours normal. La figure 3-26 donne les valeurs des temps et distances inter station en parcours normal.



**Figure 3-26 : Valeurs des temps et distances inter station en parcours normal en fonction des différentes vitesses.**

Dans cette figure, Cir à 40 km/h désigne la circulation moyenne d'un véhicule à 40 km/h, Cir à 60 km/h, celle qu'il peut atteindre à une vitesse de 60 km/h.

Tableau récapitulatif					
Valeurs des temps des accélérations moyennes et de freinage maximal de service en charge normale et en palier			Valeurs des distances nécessaires pour une vitesse inter station de 31,56km/h		
Symbole	0 à 40 km/h	0 à 60 km/h	Symbole	0 à 40 km/h	0 à 60 km/h
$t_a$	9,66 s	17,54 s	$d_{isa}$	0,085 km	0,154 km
$t_n$	42,93 s	31,35 s	$d_{isn}$	0,376 km	0,275 km
$t_d$	7,41s	11,11 s	$d_{isd}$	0,065 km	0,097 km

**Tableau 3-3 : Récapitulatif des valeurs des temps d'accélération et des distances inter station**

Grâce à cette analyse, nous voyons que pour chaque distance inter station, il y a réellement trois zones distinctes : la zone d'accélération correspondante au temps inter station d'accélération et à la distance inter station d'accélération, la zone de parcours normal, correspondante au temps inter station en accélération normale et à la distance inter station sur laquelle le véhicule circule en parcours normal, puis la zone de décélération correspondante au temps inter station de décélération et à la distance inter station en décélération sur laquelle le véhicule est sensé freiner. La figure 3-27 donne une représentation graphique d'une répartition idéale des différents temps et vitesses inter station pour optimiser le débit horaire.

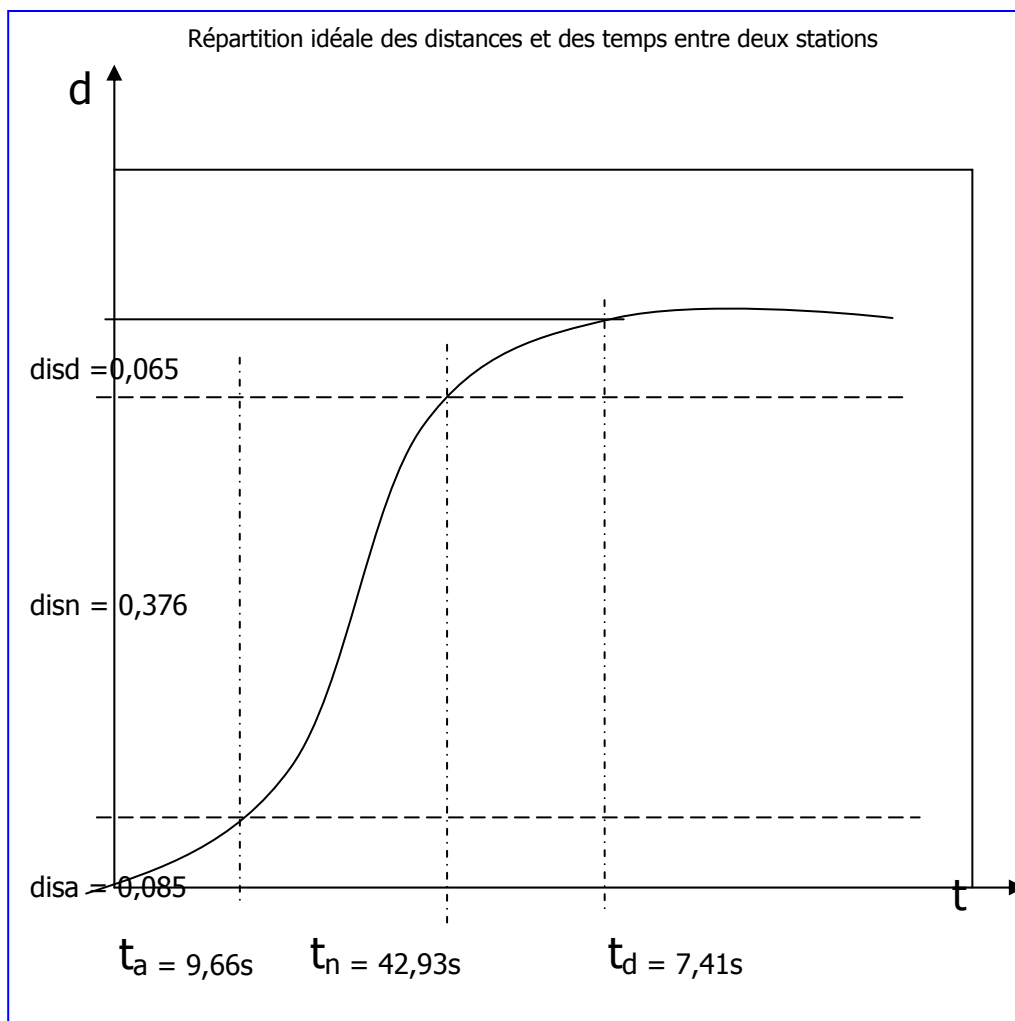


Figure 3-27 : Répartition idéale des distances et des temps inter station.

### **Conclusion du chapitre 3**

Une ligne de transport en commun est dans le cadre de notre travail de thèse, un ouvrage déjà existant. N'empêche que ainsi que nous l'avons vu, sa conception offre généralement l'occasion de modifier le panorama urbain d'une ville. Le problème que nous avons réellement abordé dans ce chapitre est le modèle d'optimisation du débit horaire.

En premier lieu, nous avons montré la difficulté d'assurer un équilibre entre l'offre de circulation et la demande de mobilité dans un environnement urbain figé ou qui n'évolue que très peu dans le temps. Puis, à l'aide de l'outil mathématique, nous avons proposé un modèle d'optimisation qui tient compte des paramètres physiques des matériels roulants (capacité des véhicules), des paramètres mécaniques des matériels roulants (vitesses du véhicule), de l'offre de fréquentation (fréquence d'exploitation) et d'un objectif de vitesse commerciale. La réalisation de ce modèle sur le terrain fait intervenir la vitesse inter station et la distance inter station qui est modulée à la fois en fonction du site et surtout des caractéristiques mécaniques des véhicules de transports en commun utilisés.



**CHAPITRE 4 :**  
**APPLICATION DU MODELE A L'ETUDE DE**  
**QUELQUES RESEAUX DE TRANSPORTS EN**  
**COMMUN FRANÇAIS**

# Table des matières du chapitre 4

<b>4.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>237</b>
<b>4.1.1</b>	<b>Les anciens réseaux.....</b>	<b>238</b>
<b>4.1.1.1</b>	<b>Cas du tramway de Lille.....</b>	<b>238</b>
4.1.1.1.1	Présentation du réseau.....	238
4.1.1.1.2	Typologie de la voie.....	239
4.1.1.1.3	Matériel roulant.....	239
4.1.1.1.4	Revêtements.....	240
4.1.1.1.5	Caractéristiques générales et offre de fréquentation du réseau.....	240
4.1.1.1.6	Les coûts du réseau.....	241
4.1.1.1.6.1	Le coût d'investissement.....	241
4.1.1.1.6.2	Le coût d'exploitation.....	242
4.1.1.2	Optimisation.....	242
4.1.1.2.1	Application du modèle au réseau tramway de Lille.....	243
4.1.1.2.1.1	Etude théorique du profil des vitesses sur le Tronc commun.....	244
4.1.1.2.1.2	Analyse des paramètres sur le tronc commun.....	245
4.1.1.2.1.3	Etude pratique du profil des vitesses sur le Tronc commun.....	247
4.1.1.2.1.3.1	Détermination du profil exact de la vitesse commerciale entre station sur le tronc commun.....	247
4.1.1.2.1.3.2	Calcul des vitesses réelles dans le sens aller sur le Tronc commun page 248	
4.1.1.2.1.3.2.1	Premier cas : heure normale.....	248
4.1.1.2.1.3.2.2	Deuxième cas : heure creuse.....	249
4.1.1.2.1.3.2.3	Troisième cas : heure de pointe.....	251
4.1.1.2.1.3.2.4	Conclusion partielle sur le Tronc commun.....	254

4.1.1.2.1.4	Etude théorique du profil des vitesses sur les différentes branches.....	255
4.1.1.2.1. 4.1	Etude théorique du réseau sur la branche Lille - Roubaix.....	256
4.1.1.2.1. 4.1.1	Analyse des paramètres sur le tronçon Lille – Roubaix.....	256
4.1.1.2.1. 4.1.2	Calcul dans le sens aller : branche Roubaix.....	258
4.1.1.2.1. 4.1.2.1	Premier cas : heure normale.....	258
4.1.1.2.1. 4.1.2.2	Deuxième cas : heure creuse.....	261
4.1.1.2.1. 4.1.2.3	Troisième cas : heure de pointe.....	263
4.1.1.2.1. 4.1.2.4	Résumé de toute la ligne Lille - Roubaix.....	268
4.1.1.2.1. 4.2	Etude théorique du réseau sur la branche Lille – Tourcoing.....	270
4.1.1.2.1. 4.2.1	Analyse des paramètres sur le tronçon Lille – Tourcoing.....	270
4.1.1.2.1. 4.2.2	Calcul dans le sens aller : branche Tourcoing.....	272
4.1.1.2.1. 4.2.2.1	Premier cas : heure normale.....	272
4.1.1.2.1. 4.2.2.2	Deuxième cas : heure creuse.....	274
4.1.1.2.1. 4.2.2.3	Troisième cas : heure de pointe.....	277
4.1.1.2.1. 4.2.2.4	Résumé de toute la ligne Lille - Tourcoing.....	281
4.1.1.2.1. 4.2.2.5	Comparaison des profils de vitesses sur les deux lignes.....	282
4.1.1.2.1. 5	Conclusion partielle sur les deux branches.....	283
4.1.1.2.1. 6	Optimisation : analyse de la vitesse inter station par site.....	283
4.1.1.2.1. 6.1	Premier site : Croisé Laroche.....	284
4.1.1.2.1. 6.1.1	Cas de la distance inter station Croisé Laroche Acacias = 0, 571 km.....	284
4.1.1.2.1. 6.1.2	Cas de la distance inter station Croisé Laroche Foch = 0, 231 km.....	285
4.1.1.2.1. 6.2	Deuxième site : Branche Lille - Tourcoing.....	286

4.1.1.2.1. 6.2.1	Cas de la distance inter station entre Faidherbe et Ma Campagne = 1,000 km.....	286
4.1.1.2.1. 6.3	Troisième site : Branche Lille - Roubaix.....	286
4.1.1.2.1. 6.3.1	Cas de la distance inter station entre Bol d’Air et Parc Barbieux = 0,775 km.....	287
4.1.1.2.1. 6.4	Conclusion partielle sur les deux branches.....	287
<b>4.1.1.3</b>	<b>Cas du tramway de Nantes.....</b>	<b>287</b>
4.1.1.3.1	Présentation du réseau.....	287
4.1.1.3.2	Aspect technique et le matériel.....	289
4.1.1.3.3	Typologie de la voie.....	289
4.1.1.3.4	Revêtements rencontrés et comportement observé.....	289
4.1.1.3.5	Caractéristiques générales et offre de fréquentation du réseau .	289
4.1.1.3.6	Les coûts du réseau.....	290
4.1.1.3.6.1	Le coût d’investissement.....	291
4.1.1.3.6.2	Le coût d’exploitation.....	291
4.1.1.3.7	Optimisation.....	291
4.1.1.3.8	Application du modèle à la ligne 3 du réseau tramway de Nantes.....	291
<b>4.1.2</b>	<b>Etude de nouveaux réseaux de tramways.....</b>	<b>296.</b>
<b>4.1.2.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>296</b>
<b>4.1.2.1.1</b>	<b>Cas du tramway de Valenciennes.....</b>	<b>297</b>
4.1.2.1.1.1	Présentation du réseau.....	297
4.1.2.1.1.2	Le matériel.....	298
4.1.2.1.1.3	Les conditions de confort.....	299
4.1.2.1.1.4	Les stations.....	299
4.1.2.1.1.5	La tarification.....	299
4.1.2.1.1.6	Caractéristiques générales et offre de fréquentation du réseau.....	301
4.1.2.1.1.7	Les coûts du réseau.....	303
4.1.2.1.1.7.1	Le coût d’investissement.....	303

4.1.2.1.1.7.2	Le coût d'exploitation.....	303
4.1.2.1.1.8	Application du modèle au réseau tramway de Valenciennes.....	303
4.1.2.1.1.9	Calcul des coûts après optimisation.....	307
4.1.2.1.1.9.1	Le coût d'investissement après optimisation.....	307
4.1.2.1.1.9.2	Le coût d'exploitation.....	307
<b>4.1.2.1.2</b>	<b>Cas de la ligne T3 du tramway de Paris.....</b>	<b>308</b>
4.1.2.1.2.1	Présentation du réseau de Paris.....	308
4.1.2.1.2.2	Objectif de desserte.....	309
4.1.2.1.2.3	Le matériel.....	310
4.1.2.1.2.4	Taux de correspondance.....	311
4.1.2.1.2.5	Requalification urbaine.....	311
4.1.2.1.2.6	Optimisation.....	312
<b>4.1.3</b>	<b>L'exemple du Bus à Haut Niveau de Service.....</b>	<b>315</b>
4.1.3.1	Présentation sommaire de Curitiba.....	315
4.1.3.1.1	Présentation du réseau de transport.....	316
4.1.3.1.2	Planification depuis trente ans.....	318
4.1.3.1.3	L'invention du métro de surface.....	318
4.2	Conclusion du chapitre 4.....	320

## Figures du chapitre 4

Figure 4-1	: Présentation schématique du réseau de Lille.....	239
Figure 4-2	: Représentation schématique complète du réseau Tramway de Lille.....	243
Figure 4-3	: Représentation schématique du tronç commun entre Lille Flandres et Croisé Laroche.....	244
Figure 4-4	: Courbes des vitesses inter station réelles en fonction des différents créneaux horaires entre Lille Flandres et Croisé Laroche.....	253
Figure 4-5	: Courbes des vitesses inter station réelles en fonction des différents créneaux horaires entre Lille Flandres et Croisé Laroche.....	254

Figure 4-6 : Représentation schématique des deux branches (Roubaix et Tourcoing) du réseau Tramway de Lille.....	255
Figure 4-7 : Courbes des vitesses inter station réelles en fonction des différents créneaux horaires entre Croisé Laroche et Roubaix Eurotéléport.....	267
Figure 4-8 : Représentation graphique du profil des vitesses réelles inter station en kilomètre par heure sur toute la ligne Lille Flandres - Roubaix.....	269
Figure 4-9 : Courbes des vitesses inter station réelles en fonction des différents créneaux horaires entre Croisé Laroche et Tourcoing Centre.....	280
Figure 4-10 : Représentation graphique du profil des vitesses réelles inter station en kilomètre par heure sur toute la ligne Lille Flandres - Tourcoing.....	282
Figure 4-11 : Représentation graphique du profil des vitesses réelles inter station en kilomètre par heure sur toute la ligne Lille Flandres - Roubaix.....	282
Figure 4-12 : Représentation graphique du profil des vitesses réelles inter station en kilomètre par heure sur toute la ligne Lille Flandres - Tourcoing.....	283
Figure 4-13 : Schéma de présentation du réseau Tramway de Nantes.....	288
Figure 4-14: Schéma de présentation du réseau Tramway de Valenciennes.....	298
Figure 4-15 : Schéma de présentation du réseau Tramway de Paris.....	308
Figure 4-16 : Schéma de présentation du réseau BHNS de CURITIBA.....	316

## Tableaux du chapitre 4

Tableau 4-1 : Caractéristiques générales du réseau tramway de Lille.....	241
Tableau 4-2 : Distances inter station et temps de parcours sur tronçon commun.....	245
Tableau 4-3 : Vitesses réelles en fonction des créneaux horaires entre Lille Flandres et Croisé Laroche	253
Tableau 4-4 Distances inter station et temps de parcours de la branche Lille – Roubaix page.....	256
Tableau 4-5 : Vitesses réelles en fonction des créneaux horaires entre Croisé Laroche et Roubaix Eurotéléport.....	266
Tableau 4-6 : Récapitulatif des vitesses réelles inter station en kilomètre par heure sur toute la ligne Lille Flandres – Roubaix.....	268
Tableau 4-7 des distances inter station et des temps de parcours du tronçon Lille – Tourcoing.....	270
Tableau 4-8 : Vitesses réelles en fonction des créneaux horaires entre Croisé Laroche et Tourcoing Centre.....	280
Tableau 4-9 : Récapitulatif des vitesses réelles inter station en kilomètre par heure sur toute la ligne Lille Flandres – Tourcoing.....	281
Tableau 4-10 : Caractéristiques générales du réseau Tramway de Valenciennes.....	284
Tableau 4-11 : Caractéristiques générales du réseau Tramway de Paris.....	290

## 4.1 Introduction

Dans cette partie, nous étudions le cas de quelques réseaux de tramway, certains pour leur relative ancienneté puis la distance inter station largement inférieure à la moyenne actuelle (Tramway de Marseille 299), d'autres pour leur nouveauté. Les premiers réseaux réapparaissant sont ceux de Lille rénové, Nantes et Grenoble et les réseaux nouveaux sont ceux de Valenciennes et le T3 de Paris. Dans le cas des réseaux anciens, l'intérêt de l'étude est d'une part de mettre en évidence leur particularité et d'autre part d'appliquer le modèle élaboré au chapitre 3 afin de voir dans quelle mesure il est possible d'optimiser l'exploitation de la ligne. Dans le cas des réseaux nouveaux il s'agit d'abord de mettre en relief les évolutions opérées au fil des années en terme de technologie et surtout les choix en matière de conception, le plus souvent imposés par des contraintes urbanistiques. Ces réseaux nouveaux de tramways posent d'importantes difficultés d'insertion dans le trafic compte tenu de la multimodalité des transports en commun présente sur la quasi-totalité de l'ensemble des lignes. Dans les deux cas, l'étude vise à optimiser la vitesse commerciale pour atteindre un certain débit horaire en tenant compte des contraintes du trafic.

## **4.1.1 Les anciens réseaux :**

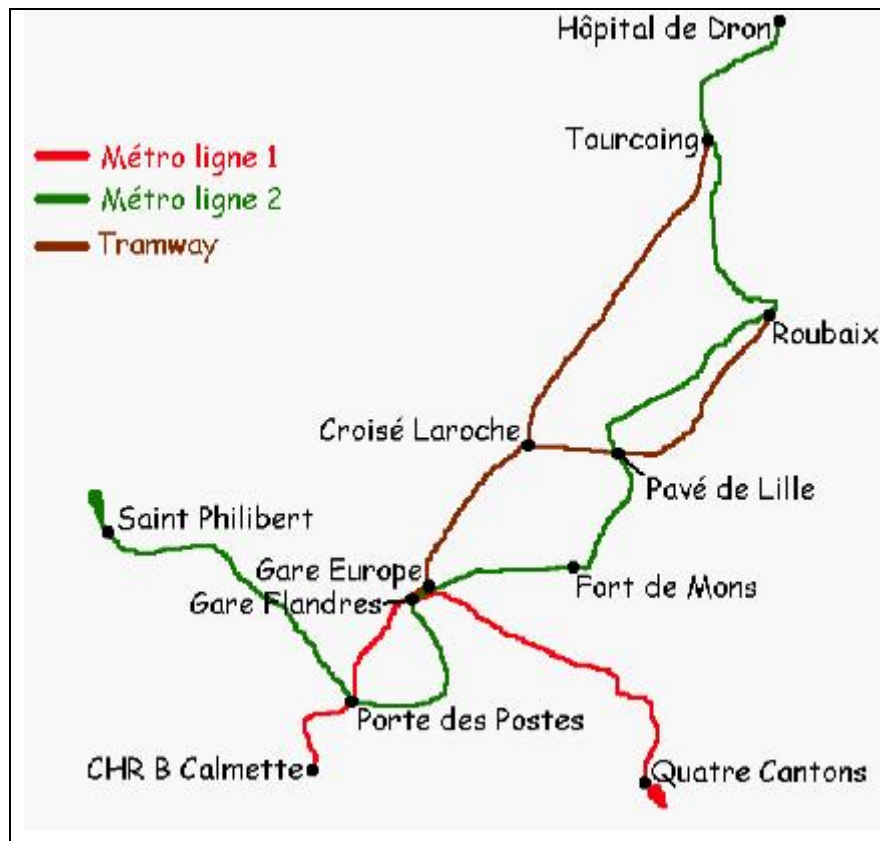
Les réseaux anciens ont pour avantage d'avoir été implantés sans beaucoup des difficultés de limitation d'espace et de contraintes urbanistiques. Avant les travaux d'innovation (cas de Lille), leur vitesse commerciale était en dessous de la moyenne actuelle (20 km/h) et l'intervalle de passage supérieur à 4 minutes.

### **4.1.1.1 Cas du tramway de Lille**

#### **4.1.1.1.1 Présentation du réseau**

Le réseau du tramway de Lille est en Y. Constitué de deux lignes R et T, il est muni d'un tronçon commun de 4 km allant de la gare Lille Flandres à la station Croisé Laroche où l'intervalle de passage est de 3,30 minutes, puis de deux branches de 7,5 km environ chacune qui se terminent respectivement à Roubaix et à Tourcoing avec un intervalle de passage qui peut monter jusqu'à 7 minutes, c'est-à-dire le double. Ce réseau compte 25 stations, et date de 1904. Il a été rénové d'abord en 1981 avec une prise de courant par pantographe et un matériel d'occasion Duwag, en raison d'une fermeture programmée en 1990. A ce moment la communauté urbaine a décidé d'implanter la ligne 2 de métro sur un autre itinéraire et de rénover entièrement le réseau Tramway. Cela a été fait en 1994 par Seco -Rail et Taverne (Belgique) et du matériel italien Breda. L'exploitation et l'entretien du réseau sont assurés par la société Transpole du Groupe Keolis. Les conditions d'exploitation prévoient une température minimale de -10°C et maximale de +45°C et une vitesse réglementaire en ville de 50 km/h. La figure 4-1 montre le réseau du tramway de Lille.





**Figure 4-1 : Présentation schématique du réseau de Lille**

#### 4.1.1.1.2 Typologie de la voie

Le Tramway de Lille est en site propre. Il est à 30% sur une voie en béton type St Denis – Bobigny et un rail 35GTF avec plusieurs passages à niveaux et souterrains sur le tronc commun. 70% de la pose est sur ballast avec traverses biblocs et un rail de type U50 dont le rayon mini en courbure est de 70/80 m et maxi de 200m. L'écartement est de  $1000 \pm 2$  mm en voies neuves et  $\pm 10$ mm en limite de maintenance. Les attaches sont de type Nabla posées au pas de 750 / 900 mm.

#### 4.1.1.1.3 Matériel roulant

Le tramway est alimenté en courant de traction par une ligne aérienne de contact (LAC). Il y a 24 rames de charge maximale à l'essieu de 8,5 T, d'une capacité de 245 passagers, une longueur de 30 mètres et une largeur de 2,40 mètres. Ces rames sont construites par Ansaldo

Breda (Italie) et sont à plancher bas avec 2 bogies en extrémité et 3 essieux situés aux 3 articulations de la rame. Le matériel est bruyant (roulement due aux petites roues, et crissement en courbes jusqu'à R = 200m).

#### **4.1.1.1.4 Revêtements**

Les intersections (carrefours) sont en asphalte, en enrobé ou en béton et le reste du réseau en pavés, en briques ou sans revêtements. On note par ailleurs beaucoup de sablage de la voie et beaucoup d'usure ondulatoire en raison de la conception des voitures. Les revêtements (béton, enrobé, pavés, briques) s'appuient par endroit directement contre les profilés des rails sans joints, ce qui entraîne un vieillissement prématuré.

En conclusion, la voie est de conception simple profitant d'une vision urbaine futuriste de l'ingénieur Mongy au début du 20<sup>ème</sup> siècle

#### **4.1.1.1.5 Caractéristiques générales et offre de fréquentation du réseau**

Elles concernent les données relatives à la ligne et à son exploitation. Ces données sont issues d'une étude organisée en 2001 par le CERTU, le CETE de Lyon et le CETE Nord Picardie (débit horaire, fréquence, distance inter station, intervalle de passage), complétée par des données provenant de Transpole (nombre de portes, nombre de stations, nombre de rames, fréquence sur le tronc commun et sur les branches). L'intervalle de passage intersection est de 8 minutes en heure de pointe, puis de 30 minutes le soir sur un tronçon normal et de 3,30 minutes en heure de pointe, puis 15 minutes sur le tronçon commun. Le tableau 4-1 résume l'ensemble des caractéristiques générales du réseau du tramway de Lille.

Réseau de Lille		Matériel : Tramway		
Tronçon	Lille – Roubaix	Lille – Tourcoing	Symbole	Total
Longueur de la ligne	10,9 km	11,5 km	$L_l$	19 km
Nombre de stations	23	22	$n_s$	36
Nombre de rames	24 rames Breda		$n_v$	24
Capacité d'une rame	168 (4 places/m <sup>2</sup> ) 245 (6 places /m <sup>2</sup> )		$C$	245
Vitesse commerciale	23 km/h		$V_{com}$	
Trafic journalier en 1999*	34 000 voyageurs/j		$Q_{théo/j}$	34 000
Horaires d'ouverture	De 5h00 à 24h00		$T_j$	19h
Débit horaire	1789 voyageurs/h		$Q/h$	
Fréquences	7 min. en pointe - 30 min. le soir		$I_p$	
Vitesse maxi du véhicule	70 km/h		$V_v$	
Distance inter station moyenne	528 m		$d_{is}$	
Longueur du véhicule	29,90 m		$L_v$	
Largeur du véhicule	2,4 m		$\ell_v$	

**Tableau 4-1 : Caractéristiques générales du réseau tramway de Lille.**

#### 4.1.1.1.6 Les coûts du réseau

##### 4.1.1.1.6.1 Le coût d'investissement

Selon les coûts présentés à la section 2.8.1 du chapitre 2 concernant l'investissement, le coût moyen d'investissement pour un kilomètre de voie double étant environ de 20 millions d'euros pour un tramway, le réseau de Lille aurait dû coûter en investissement, s'il avait été construit récemment autour de 380 millions d'euros. Nous rappelons que l'investissement comprend l'ensemble du projet c'est-à-dire l'infrastructure, les matériels roulants, les installations fixes, les équipements et les stations.

#### 4.1.1.1.6.2 Le coût d'exploitation

Le coût d'exploitation pour un véhicule par an et par kilomètre étant de 4 à 4,9 euros pour une rame de tramway, le réseau de Lille avec ses 24 rames Breda coûte en terme d'exploitation annuelle entre 1824 € et 2234,4 € par an. Ces coûts d'exploitation comprennent l'achat d'énergie, les charges de personnel, la sous-traitance, les frais généraux et les impôts et taxes. Par ailleurs avec un coût en investissement pour une rame de tramway de 1,5 à 2,2 millions d'euros, le réseau de Lille a dépensé pour l'acquisition de ses 24 rames un montant dans la fourchette de 36 à 52,8 millions d'euros.

#### 4.1.1.2 Optimisation

Le modèle établi au chapitre 3 a pour but d'optimiser le réseau c'est-à-dire d'améliorer le débit horaire sans augmenter les charges, ni la nécessité de construire d'autres infrastructures. A l'évidence, pour un réseau donné, il n'est pas possible de modifier la longueur de la ligne  $L_l$ , la distance inter station  $d_{is}$  et le nombre de stations  $n_s$ . D'après ce constat, notre modèle ne dépend que de trois variables : la capacité  $C$ , la fréquence  $f$ , la vitesse commerciale  $V_{com}$ . Par ailleurs, la vitesse commerciale est un objectif d'après l'hypothèse 3.2. Dans ces conditions, il ne reste que deux variables et d'après la formule *Eq* : 3.1, pour optimiser le débit horaire, on a deux scénarios possibles : le premier est tel que pour une capacité donnée, on augmente la fréquence, puis le deuxième est tel qu'on augmente la capacité pour une fréquence donnée (éventuellement plus faible). Dans les deux cas, on fait un ajustement qui tient compte des conditions de sécurité afin de trouver un compromis acceptable.

#### 4.1.1.2.1 Application du modèle au réseau tramway de Lille



Figure 4-2 : Représentation schématique complète du réseau Tramway de Lille

#### 4.1.1.2.1.1 Etude théorique du profil des vitesses sur le Tronc commun

L'étude théorique du réseau Tramway de Lille permet à l'aide des fiches horaires et des distances inter station d'évaluer la vitesse commerciale moyenne sur le réseau. Ce réseau est composé de deux branches raccordées par un tronç commun. Les informations traitées dans cette partie datent de la correction du 20 octobre 2003 et proviennent de la compagnie Transpole responsable de l'exploitation du réseau de transport urbain de Lille.

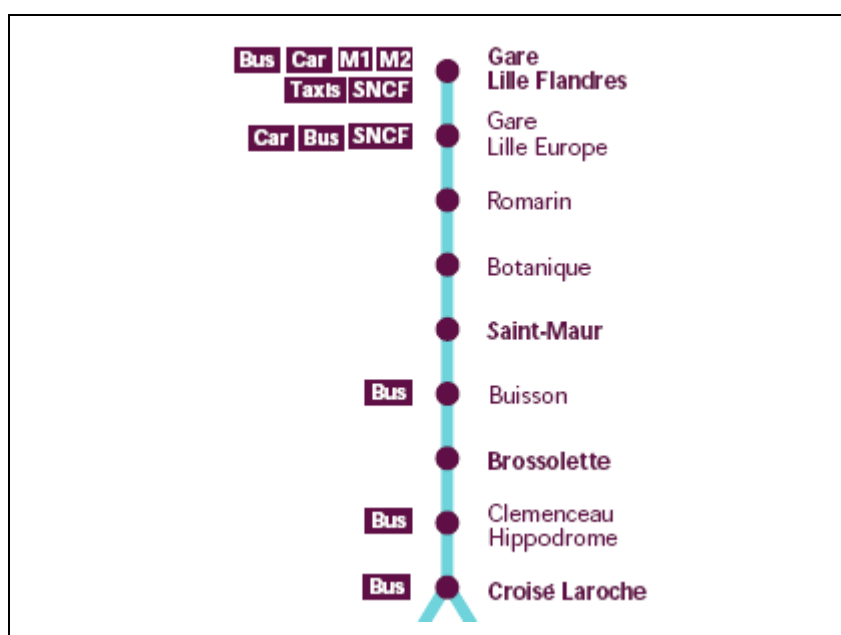


Figure 4-3 : Représentation schématique du tronç commun entre Lille Flandres et Croisé Laroche

Repère		Distance inter station [km]	Temps inter station [h]	Distance inter station cum [km]	Temps inter station cum [h]
Station de départ	Station d'arrivée	$d_{is}$	$T_{is}$	$d_{cum}$	$T_{cum}$
<b>Lille Flan</b>	Lille Europe	0,335	<b>1,19/60</b>	0,335	1,19/60
Lille Europe	Romarin	0,718	1,34/60	1,053	2,53/60
Romarin	Botanique	0,510	1,23/60	1,563	3,76/60
Botanique	<b>St Maur</b>	0,335	<b>0,59/60</b>	<b>1,898</b>	<b>4,35/60</b>
<b>St Maur</b>	Buisson	0,764	1,42/60	2,662	5,77/60
Buisson	<b>Brossolette</b>	0,563	<b>1,35/60</b>	<b>3,225</b>	<b>7,12/60</b>
<b>Brossolette</b>	Clemenceau	0,222	0,48/60	3,447	7,60/60
Clemenceau	<b>Croisé Lar</b>	0,539	<b>1,40/60</b>	<b>3,986</b>	<b>9/60</b>

Tableau 4-2 : Distances inter station et temps de parcours sur tronçon commun

#### 4.1.1.2.1.2 Analyse des paramètres sur le tronc commun

Sachant que le Tramway transporte 34 000 passagers par jour et circule pendant une durée de 19 heures soit de 05h 00 à 24h 00, alors le débit théorique qu'il peut transporter par heure est de  $Q = 1789 \text{ pass/h}$ . Compte tenu de la capacité normale du véhicule  $C = 168 \text{ pass}$ , on déduit

la fréquence théorique  $f$  de la ligne d'après l'équation

$$Q = C.f \quad \text{Eq : 3.1,}$$

$$Q = C.f \rightarrow f = \frac{Q}{C}$$

$$\text{AN: } f = \frac{1789}{168} = 10,64 \approx 11/h$$

Ce résultat suppose qu'il est possible de faire 11 rotations par heure soit un intervalle de passage de 5,45 minutes. Or, l'intervalle de passage réel entre deux véhicules Tramway entre

Lille et Croisé Laroche est précisément de 3,30 minutes sur le tronç commun soit une fréquence de 18 rotations par heure. Donc le débit peut être estimé réellement à

$$Q = C.f \quad Eq : 3.1$$

$$= 168 \text{ pass.} / h$$

$$AN : Q = 3024 \text{ pass} / h$$

D'après la carte réseau du Tramway, la distance inter station moyenne entre Lille Flandres et Croisé Laroche est de **0,498 km** pour une durée moyenne inter station, compte tenu du nombre de stations de **1 minute sans** arrêts aux stations et de 1,125 minutes avec arrêts. D'après ce premier résultat 3024 passagers par heure et par sens supérieur à 1789 passagers par heure, on peut dire que le tramway de Lille est sous exploité et cela pour deux raisons possibles : la première est que l'offre est supérieure à la demande ; c'est-à-dire que la construction d'un tel tramway à l'époque n'était pas justifiée pour les besoins qu'il fallait satisfaire (on est conforté dans cette idée au regard de la fréquentation moyenne journalière des autres réseaux de France (50 000 passagers par jour). La deuxième est que ce tramway circule sur une voie largement partagée avec d'autres moyens de transports urbains de surface dans un contexte de trafic urbain lourd.

- la vitesse moyenne commerciale sur le tronç commun est

$$V_{cmoy} = \frac{L_{TC}}{T_{TC}} = \frac{3,986km}{\frac{9h}{60}}$$

$$AN : V_{cmoy} = 26,57 \text{ km} / h$$

- la vitesse inter station sans arrêts aux stations sur le tronç commun est

$$V_{is} = \frac{d_{ismoy}}{T_{ismoy}} = \frac{0,498km}{\frac{1h}{60}}$$

$$AN : V_{cmoy} = 29,86 \text{ km} / h$$

- la vitesse inter station avec arrêts aux stations sur le tronç commun est



$$V_{isa} = \frac{d_{ismoy}}{T_{ismoy}} = \frac{0,498km}{\frac{1,125h}{60}}$$

$$AN : V_{cmoy} = 26,56 \text{ km / h}$$

Or d'après ces résultats, on remarque que la vitesse moyenne commerciale sur le tronc commun est parfaitement identique à la vitesse inter station lorsqu'on considère les temps d'arrêts aux stations. En raison de la précision des calculs, il est possible d'estimer la fréquence pratique de sous exploitation du réseau. Ainsi, en faisant la différence des vitesses commerciales moyennes avec et sans arrêt, puis en les divisant par la distance inter station moyenne calculée, on obtient :

$$f_{pp} = \frac{V_{cmoy\text{sa}} - V_{cmoy\text{a}}}{d_{ismoy}} = \frac{29,86km/h - 26,56km/h}{0,498km}$$

$$AN : V_{cmoy} = 26,56 \text{ km / h}$$

Ce résultat permet de confirmer la fréquence pratique lorsqu'on le retranche de la fréquence obtenue par calcul telle que  $f_p = 11/h = (18 - 7)/h$ .

#### 4.1.1.2.1.3 Etude pratique du profil des vitesses sur le Tronc commun

Elle consiste à utiliser les données réelles d'exploitation relevées sur terrain.

##### 4.1.1.2.1.3.1 Détermination du profil exact de la vitesse commerciale entre station sur le tronc commun.

Pour déterminer le profil exact de la vitesse commerciale entre station sur le tronc commun, il faut calculer à chaque fois la valeur exacte de cette vitesse entre deux stations dans le sens aller, comme dans le sens retour.

#### 4.1.1.2.1.3.2 Calcul des vitesses réelles dans le sens aller sur le Tronc commun

L'objectif de ce calcul est de déterminer selon trois créneaux horaires : heure normale, heure creuse, heure de pointe, les vitesses réelles inter station entre Lille Flandres et Croisée Laroche.

##### 4.1.1.2.1.3.2.1 Premier cas : heure normale

- Entre Lille Flandres et Lille Europe, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,335km}{\frac{1,19h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 16,89 \text{ km / h}$$

- Lille Europe et Romarin, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,718km}{\frac{1,34h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 32,15 \text{ km / h}$$

- Romarin et Botanique, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,510km}{\frac{1,23h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 24,88 \text{ km / h}$$

- Botanique et Saint-Maur, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,335km}{\frac{0,59h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 34,06 \text{ km / h}$$

- Saint-Maur et Buisson, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,764km}{\frac{1,42h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 32,28 km / h$$

- Buisson et Brossolette, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,563km}{\frac{1,30h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 25,98 km / h$$

- Brossolette et Clemenceau, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,222km}{\frac{0,48h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 27,75 km / h$$

- Clemenceau et Croisé Laroche, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,539km}{\frac{1,35h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 23,95 km / h$$

#### 4.1.1.2.1.3.2.2 Deuxième cas : heure creuse

- Entre Lille Flandres et Lille Europe, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,335km}{\frac{1,19h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 16,89 km / h$$

- Lille Europe et Romarin, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,718km}{\frac{1,34h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 32,15 km / h$$

- Romarin et Botanique, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,510km}{\frac{1,23h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 24,88 km / h$$

- Botanique et Saint-Maur, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,335km}{\frac{0,59h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 34,06 km / h$$

- Saint-Maur et Buisson, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,764km}{\frac{1,42h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 32,28 km / h$$

- Buisson et Brossolette, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,563km}{\frac{1,35h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 25,02 km / h$$

- Brossolette et Clemenceau, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,222km}{\frac{0,48h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 27,75 km / h$$

- Clemenceau et Croisé Laroche, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,539km}{\frac{1,40h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 23,10 km / h$$

#### 4.1.1.2.1.3.2.3 Troisième cas : heure de pointe

- Entre Lille Flandres et Lille Europe, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,335km}{\frac{1,19h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 16,89 km / h$$

- Lille Europe et Romarin, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,718km}{\frac{1,39h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 30,99 km / h$$

- Romarin et Botanique, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,510km}{\frac{1,23h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 24,88 km / h$$

- Botanique et Saint-Maur, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,335km}{\frac{0,59h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 34,06 \text{ km / h}$$

- Saint-Maur et Buisson, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,764 \text{ km}}{\frac{1,47 \text{ h}}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 31,18 \text{ km / h}$$

- Buisson et Brossolette, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,563 \text{ km}}{\frac{1,40 \text{ h}}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 24,12 \text{ km / h}$$

- Brossolette et Clemenceau, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,222 \text{ km}}{\frac{0,48 \text{ h}}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 27,75 \text{ km / h}$$

- Clemenceau et Croisé Laroche, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,539 \text{ km}}{\frac{1,40 \text{ h}}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 23,10 \text{ km / h}$$

Vitesse réelle inter station en kilomètre par heure				
Station de départ	Station d'arrivée	Créneau horaire		
		heure normale	heure creuse	heure de pointe
Lille Flandres	Lille Europe	16,89	16,89	16,89
Lille Europe	Romarin	32,15	32,15	30,99
Romarin	Botanique	24,88	24,88	24,88
Botanique	Saint-Maur	34,06	34,06	34,06
Saint-Maur	Buisson	32,28	32,28	31,18
Buisson	Brossolette	25,98	25,02	24,12
Brossolette	Clemenceau H	27,75	27,75	27,75
Clemenceau H	Croisé Laroche	23,95	23,10	23,10

Tableau 4-3 : Vitesses réelles en fonction des créneaux horaires entre Lille Flandres et Croisé Laroche

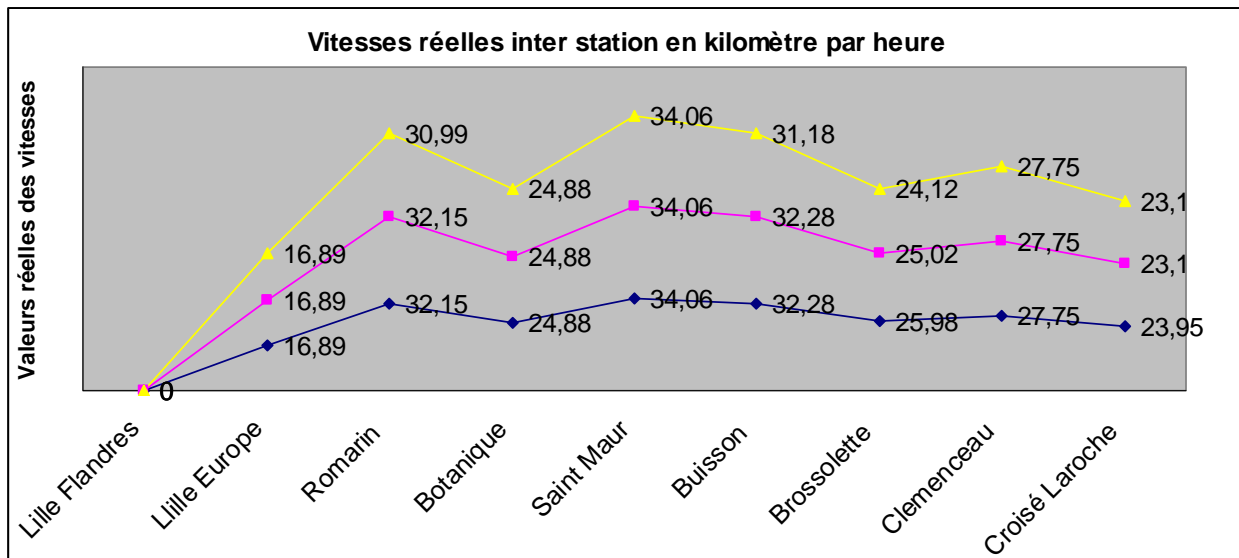
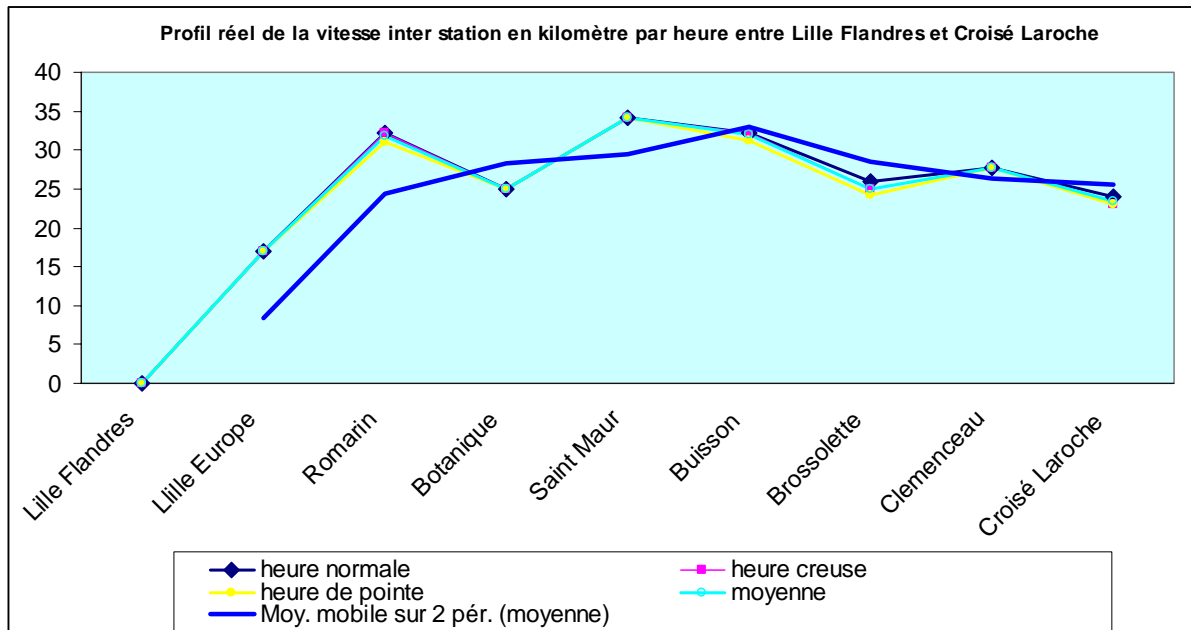


Figure 4-4 : Courbes des vitesses inter station réelles en fonction des différents créneaux horaires entre Lille Flandres et Croisé Laroche



**Figure 4-5 : Courbes des vitesses inter station réelles en fonction des différents créneaux horaires entre Lille Flandres et Croisé Laroche**

#### 4.1.1.2.1.3.2.4 Conclusion partielle sur le Tronc commun

Le tronc commun alimente alternativement les deux branches du réseau, ce qui explique une fréquence deux fois plus élevée que sur chaque branche soit  $f = 15/h$ . Ce tronc commun traverse une zone fortement peuplée, fortement urbanisée et maillée de plusieurs carrefours. Sur le terrain, cela se traduit par un nombre élevé de stations, qui sont toutes situées au niveau des carrefours. Par conséquent, bien que deux carrefours aient été revus pour être traversés en souterrain, la prise en compte des conditions de régulation aux carrefours traversés en surface explique la faible vitesse commerciale moyenne réelle.

D'après les courbes de la figure 4-5, on remarque que pendant les heures creuses tout comme pendant les heures de pointe, la vitesse réelle entre certaines stations peut être supérieure ou inférieure à la vitesse correspondant au créneau d'horaire normal.



#### 4.1.1.2.1.4 Etude théorique du profil des vitesses sur les différentes branches

Sur les branches, l'étude consiste à déterminer également le profil de vitesses puis à le dessiner. Afin de mesurer l'influence de la capacité, nous adoptons pour le calcul sur les différentes branches, la norme maximale de la capacité soit 6 passagers par mètre carré, correspondante à une capacité du véhicule de 245 places et une exploitation en heure de pointe.

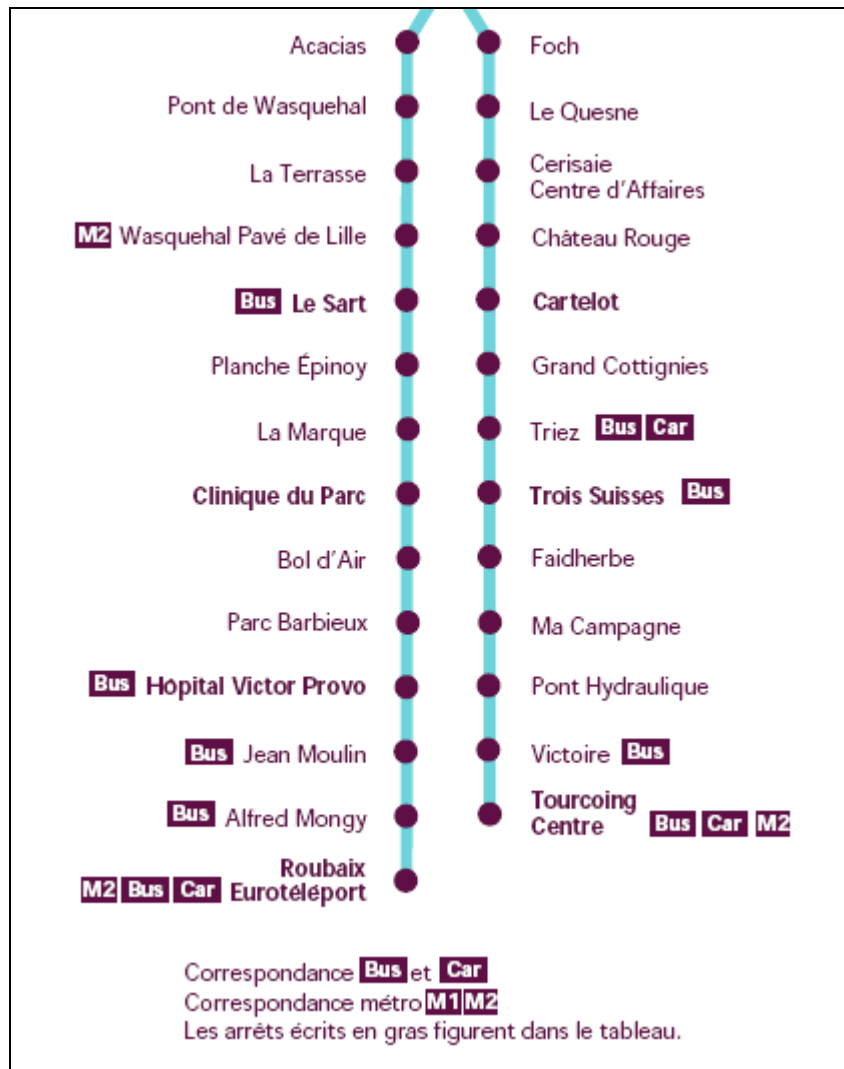


Figure 4-6 : Représentation schématique des deux branches (Roubaix et Tourcoing) du réseau Tramway de Lille.

#### 4.1.1.2.1. 4.1 Etude théorique du réseau sur la branche Lille - Roubaix

Repère		Distance inter station [km]	Temps inter station [h]	Distance inter station cum [km]	Temps inter station cum [h]
Station de départ	Station d'arrivée	$d_{is}$	$T_{is}$	$d_{cum}$	$T_{cum}$
<b>Croisé Lar</b>	Acacias	0,571	1,35/60	0,571	1,35/60
Acacias	Pont Was	0,555	1,35/60	1,126	2,70/60
Pont Was	La Terrasse	0,579	1,17/60	1,705	3,87/60
La Terrasse	Was Pavé	0,292	1,06/60	1,997	4,93/60
Was Pavé	<b>SART</b>	0,620	<b>1,32/60</b>	<b>2,617</b>	<b>6,25/60</b>
<b>SART</b>	Planche Ep	0,530	1,24/60	3,147	7,47/60
Planche Ep	La marque	0,341	1,06/60	3,488	8,55/60
La marque	<b>Clinique P</b>	0,431	<b>1,11/60</b>	3,919	<b>9,66/60</b>
<b>Clinique P</b>	Bol d'air	0,384	1,17/60	4,303	10,83/60
Bol d'air	Parc Barb	0,775	1,34/60	5,018	12,17/60
Parc Barb	<b>Hôpital Pro</b>	0,538	<b>1,34/60</b>	5,616	<b>13,51/60</b>
<b>Hôpital Pro</b>	Jean Moulin	0,547	2,07/60	6,163	15,58/60
Jean Moulin	Alfred Mongy	0,386	2,06/60	6,549	17,64/60
Alfred Mongy	<b>Roubaix</b>	0,478	<b>2,09/60</b>	<b>7,027</b>	<b>19,73/60</b>

Tableau 4-4 Distances inter station et temps de parcours de la branche Lille – Roubaix

#### 4.1.1.2.1. 4.1.1 Analyse des paramètres sur le tronçon Lille – Roubaix

En considérant le même nombre de passagers transportés par jour comme dans le cas du tronçon commun, par conséquent le même débit horaire, également la même durée journalière pour le fonctionnement du Tramway, compte tenu de la capacité maximale du véhicule en heure de pointe  $C = 245 \text{ pass}$ , on déduit la fréquence théorique  $f$  de la ligne d'après l'équation

$$Q = C.f \quad \text{Eq : 3.1,}$$

$$Q = C.f \rightarrow f = \frac{Q}{C}$$

$$AN: f = \frac{1789}{245} = 4,79 \approx 5 / h$$

Ce résultat suppose 5 rotations par heure soit un intervalle de passage de 12 minutes. Or, l'intervalle réel de passage entre deux véhicules sur la branche Roubaix est précisément de 7 minutes soit une fréquence de 8,57 rotations par heure. Donc le débit peut être estimé réellement à une valeur maximale de :

$$Q = C.f \quad Eq: 3.1$$

$$= 245 \text{ pass.} \cdot 9 / h$$

$$AN: Q = 2205 \text{ pass} / h$$

D'après la carte réseau du Tramway, la distance inter station moyenne entre Croisé Laroche et Roubaix est de **0,540 km** pour une durée moyenne inter station, compte tenu du nombre de stations de **1,41 minute sans** arrêts aux stations et de 1,52 minutes avec arrêts. D'après ces valeurs, on peut déduire que :

- la vitesse moyenne commerciale sur la branche Roubaix est

$$V_{cmoy} = \frac{L_{TC}}{T_{TC}} = \frac{7,027 \text{ km}}{\frac{19,73 \text{ h}}{60}}$$

$$AN: V_{cmoy} = 21,37 \text{ km} / h$$

- la vitesse inter station sans arrêts aux stations sur la branche Roubaix est

$$V_{is} = \frac{d_{ismoy}}{T_{ismoy}} = \frac{0,540 \text{ km}}{\frac{1,41 \text{ h}}{60}}$$

$$AN: V_{cmoy} = 23 \text{ km} / h$$

- la vitesse inter station avec arrêts aux stations sur la branche Roubaix est

$$V_{isa} = \frac{d_{ismoy}}{T_{ismoy}} = \frac{0,540km}{\frac{1,52h}{60}}$$

$$AN: V_{cmoy} = 21,32 km / h$$

D'après ces résultats, on remarque que la vitesse moyenne commerciale sur le tronç commun est quasi-identique à la vitesse inter station lorsqu'on considère les temps d'arrêts aux stations.

#### 4.1.1.2.1. 4.1.2 Calcul dans le sens aller : branche Roubaix

##### 4.1.1.2.1. 4.1.2.1 Premier cas : heure normale

- Entre Croisé Laroche et Acacias, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,571km}{\frac{1,35h}{60}}$$

$$AN: V_{réelle} = 25,37 km / h$$

- Acacias et pont de Wasquehal, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,555km}{\frac{1,25h}{60}}$$

$$AN: V_{réelle} = 26,64 km / h$$

- Pont de Wasquehal et Terrasse, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,579km}{\frac{1,12h}{60}}$$

$$AN: V_{réelle} = 31,02 km / h$$

- Terrasse et Wasquehal Pavé de Lille, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,292km}{\frac{1,01h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 17,34 km / h$$

- Wasquehal Pavé de Lille et Le Sart, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,620km}{\frac{1,17h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 31,78 km / h$$

- Le Sart et Planche Epinoy, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,530km}{\frac{1,17h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 27,18 km / h$$

- Planche Epinoy et La Marque, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,341km}{\frac{1,01h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 20,26 km / h$$

- La Marque et Clinique du Parc, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,431km}{\frac{1,06h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 24,40 km / h$$

- Clinique du Parc et Bol d'Air, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,384km}{\frac{1,08h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 21,33 \text{ km / h}$$

- Bol d'Air et Parc Barbieux, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,775 \text{ km}}{\frac{1,29 \text{ h}}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 36,05 \text{ km / h}$$

- Parc Barbieux et H\u00f4pital Victor Provo, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,538 \text{ km}}{\frac{1,24 \text{ h}}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 26,03 \text{ km / h}$$

- H\u00f4pital Victor Provo et Jean Moulin, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,547 \text{ km}}{\frac{1,57 \text{ h}}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 20,90 \text{ km / h}$$

- Jean Moulin et Alfred Mongy, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,386 \text{ km}}{\frac{1,46 \text{ h}}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 15,86 \text{ km / h}$$

- Alfred Mongy et Roubaix Eurot\u00e9léport, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,478 \text{ km}}{\frac{1,59 \text{ h}}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 18,03 \text{ km / h}$$

#### 4.1.1.2.1. 4.1.2.2 Deuxième cas : heure creuse

- Entre Croisé Laroche et Acacias, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,571km}{\frac{1,35h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 25,37 km / h$$

- Acacias et pont de Wasquehal, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,555km}{\frac{1,25h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 26,64 km / h$$

- Pont de Wasquehal et Terrasse, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,579km}{\frac{1,17h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 29,69 km / h$$

- Terrasse et Wasquehal Pavé de Lille, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,292km}{\frac{1,01h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 17,34 km / h$$

- Wasquehal Pavé de Lille et Le Sart, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,620km}{\frac{1,22h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 30,49 km / h$$

- Le Sart et Planche Epinoy, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,530km}{\frac{1,22h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 26,07 km / h$$

- Planche Epinoy et La Marque, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,341km}{\frac{1,06h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 19,30 km / h$$

- La Marque et Clinique du Parc, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,431km}{\frac{1,06h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 24,40 km / h$$

- Clinique du Parc et Bol d'Air, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,384km}{\frac{1,15h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 20,03 km / h$$

- Bol d'Air et Parc Barbieux, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,775km}{\frac{1,29h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 36,05 km / h$$

- Parc Barbieux et H\u00f4pital Victor Provo, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,538km}{\frac{1,29h}{60}}$$



$$AN : V_{réelle} = 25,02 \text{ km / h}$$

- Hôpital Victor Provo et Jean Moulin, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,547 \text{ km}}{\frac{2,02 \text{ h}}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 16,25 \text{ km / h}$$

- Jean Moulin et Alfred Mongy, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,386 \text{ km}}{\frac{1,56 \text{ h}}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 14,85 \text{ km / h}$$

- Alfred Mongy et Roubaix Eurot\u00e9l\u00e9port, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,478 \text{ km}}{\frac{2,04 \text{ h}}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 14,06 \text{ km / h}$$

#### 4.1.1.2.1. 4.1.2.3 Troisième cas : heure de pointe

- Entre Croisé Laroche et Acacias, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,571 \text{ km}}{\frac{1,35 \text{ h}}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 25,37 \text{ km / h}$$

- Acacias et pont de Wasquehal, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,555km}{\frac{1,35h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 24,67 km / h$$

- Pont de Wasquehal et Terrasse, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,579km}{\frac{1,17h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 29,69 km / h$$

- Terrasse et Wasquehal Pavé de Lille, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,292km}{\frac{1,06h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 16,53 km / h$$

- Wasquehal Pavé de Lille et Le Sart, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,620km}{\frac{1,32h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 28,18 km / h$$

- Le Sart et Planche Epinoy, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,530km}{\frac{1,24h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 25,65 km / h$$

- Planche Epinoy et La Marque, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,341km}{\frac{1,06h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 19,30 \text{ km / h}$$

- La Marque et Clinique du Parc, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,431 \text{ km}}{\frac{1,110 \text{ h}}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 23,30 \text{ km / h}$$

- Clinique du Parc et Bol d'Air, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,384 \text{ km}}{\frac{1,17 \text{ h}}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 20,20 \text{ km / h}$$

- Bol d'Air et Parc Barbieux, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,775 \text{ km}}{\frac{1,34 \text{ h}}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 34,70 \text{ km / h}$$

- Parc Barbieux et H\u00f4pital Victor Provo, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,538 \text{ km}}{\frac{1,34 \text{ h}}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 24,09 \text{ km / h}$$

- H\u00f4pital Victor Provo et Jean Moulin, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,547 \text{ km}}{\frac{2,07 \text{ h}}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 15,85 \text{ km / h}$$

- Jean Moulin et Alfred Mongy, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,386km}{\frac{2,06h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 11,24 km / h$$

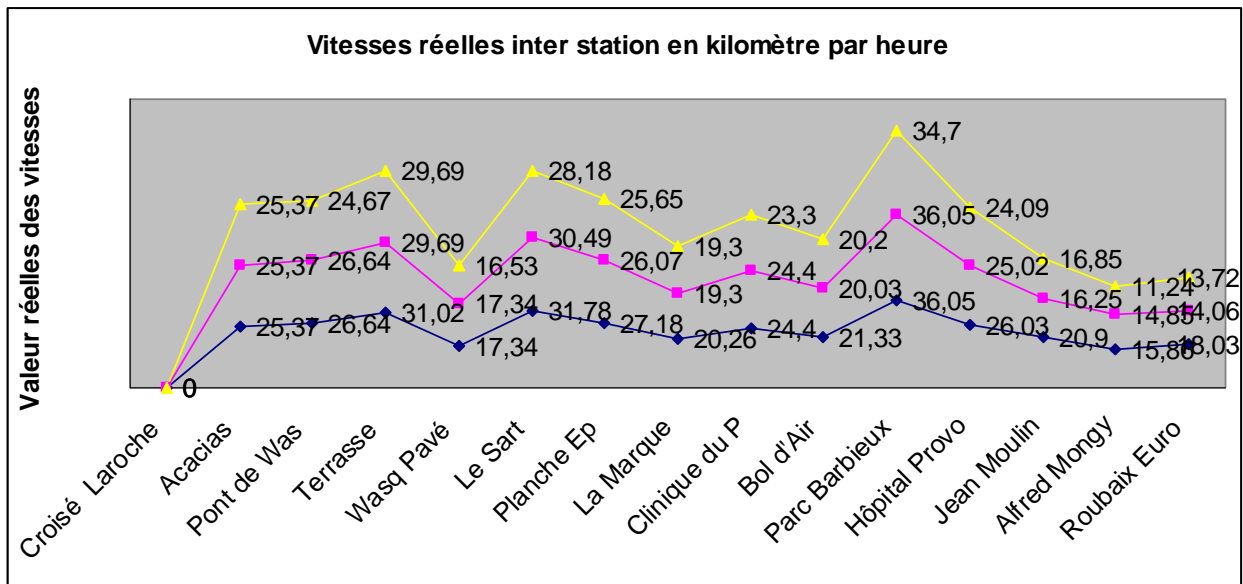
- Alfred Mongy et Roubaix Eurot\u00e9l\u00e9port, la vitesse r\u00e9elle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,478km}{\frac{2,09h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 13,72 km / h$$

Vitesse r\u00e9elle inter station en kilom\u00e8tre par heure				
Station de d\u00e9part	Station d'arriv\u00e9e	Cr\u00e9neaux horaires		
		heure normale	heure creuse	heure de pointe
Crois\u00e9 Laroche	Acacias	25,37	25,37	25,37
Acacias	Pont de Was	26,64	26,64	24,67
Pont de Was	Terrasse	31,02	29,69	29,69
Terrasse	Wasq Pav\u00e9	17,34	17,34	16,53
Wasq Pav\u00e9	Le Sart	31,78	30,49	28,18
Le Sart	Planche \u00c9p	27,18	26,07	25,65
Planche \u00c9p	La Marque	20,26	19,3	19,3
La Marque	Clinique du P	24,4	24,4	23,3
Clinique du P	Bol d'Air	21,33	20,03	20,2
Bol d'Air	Parc Barbieux	36,05	36,05	34,7
Parc Barbieux	H\u00f4pital Provo	26,03	25,02	24,09
H\u00f4pital Provo	Jean Moulin	20,9	16,25	16,85
Jean Moulin	Alfred Mongy	15,86	14,85	11,24
Alfred Mongy	Roubaix Euro	18,03	14,06	13,72

**Tableau 4-5 : Vitesses r\u00e9elles en fonction des cr\u00e9neaux horaires entre Crois\u00e9 Laroche et Roubaix Eurot\u00e9l\u00e9port**

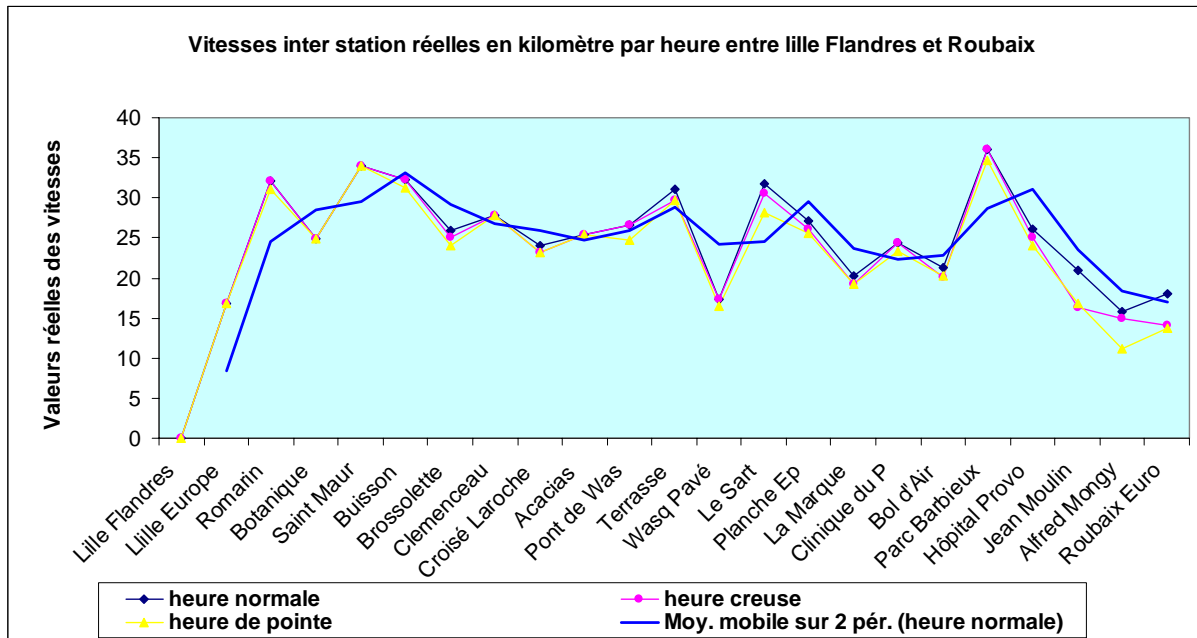


**Figure 4-7 : Courbes des vitesses inter station réelles en fonction des différents créneaux horaires entre Croisé Laroche et Roubaix Eurotéléport**

#### 4.1.1.2.1. 4.1.2.4 Résumé de toute la ligne Lille - Roubaix

Vitesse réelle inter station en kilomètre par heure sur toute la ligne				
Station de départ	Station d'arrivée	Créneaux horaires		
		heure normale	heure creuse	heure de pointe
Lille Flandres	Lille Europe	16,89	16,89	16,89
Lille Europe	Romarin	32,15	32,15	30,99
Romarin	Botanique	24,88	24,88	24,88
Botanique	Saint Maur	34,06	34,06	34,06
Saint Maur	Buisson	32,28	32,28	31,18
Buisson	Brossolette	25,98	25,02	24,12
Brossolette	Clemenceau	27,75	27,75	27,75
Clemenceau	Croisé Laroche	23,95	23,1	23,1
Croisé Laroche	Acacias	25,37	25,37	25,37
Acacias	Pont de Was	26,64	26,64	24,67
Pont de Was	Terrasse	31,02	29,69	29,69
Terrasse	Wasq Pavé	17,34	17,34	16,53
Wasq Pavé	Le Sart	31,78	30,49	28,18
Le Sart	Planche Ep	27,18	26,07	25,65
Planche Ep	La Marque	20,26	19,3	19,3
La Marque	Clinique du P	24,4	24,4	23,3
Clinique du P	Bol d'Air	21,33	20,03	20,2
Bol d'Air	Parc Barbieux	36,05	36,05	34,7
Parc Barbieux	Hôpital Provo	26,03	25,02	24,09
Hôpital Provo	Jean Moulin	20,9	16,25	16,85
Jean Moulin	Alfred Mongy	15,86	14,85	11,24
Alfred Mongy	Roubaix Euro	18,03	14,06	13,72

**Tableau 4-6 : Récapitulatif des vitesses réelles inter station en kilomètre par heure sur toute la ligne Lille Flandres - Roubaix**



**Figure 4-8 : Représentation graphique du profil des vitesses réelles inter station en kilomètre par heure sur toute la ligne Lille Flandres - Roubaix**

#### 4.1.1.2.1. 4.2 Etude théorique du réseau sur la branche Lille – Tourcoing

Repère		Distance inter station [km]	Temps inter station [h]	Distance inter station cum [km]	Temps inter station cum [h]
Station de départ	Station d'arrivée	$d_{is}$	$T_{is}$	$d_{cum}$	$T_{cum}$
<b>Croisé Lar</b>	Foch	0,231	1,08/60	0,231	1,08/60
Foch	Le Quesne	0,801	1,37/60	1,032	2,45/60
Le Quesne	Cerisaie C	0,529	1,16/60	1,561	3,61/60
Cerisaie C	Ch. Rouge	0,337	1,12/60	1,898	4,73/60
Ch. Rouge	<b>Cartelot</b>	0,563	<b>1,19/60</b>	<b>2,461</b>	<b>5,92/60</b>
<b>Cartelot</b>	G. Cottiguiés	0,539	1,26/60	3,000	7,18/60
G. Cottiguiés	Triéz	0,789	1,40/60	3,789	8,58/60
Triéz	<b>Trois Suisse</b>	0,902	<b>2,05/60</b>	<b>4,691</b>	<b>10,63/60</b>
<b>Trois Suisse</b>	Faidherbe	0,590	1,24/60	5,281	11,87/60
Faidherbe	Ma Camp	1,000	1,54/60	6,281	13,41/60
Ma Camp	Pont Hydra	0,361	1,15/60	6,642	14,56/60
Pont Hydra	Victoire	0,593	2,06/60	7,235	16,62/60
Victoire	<b>Tourcoing</b>	0,345	<b>2,07/60</b>	<b>7,580</b>	<b>18,69/60</b>

Tableau 4-7 des distances inter station et des temps de parcours du tronçon Lille – Tourcoing

#### 4.1.1.2.1. 4.2.1 Analyse des paramètres sur le tronçon Lille – Tourcoing

Sur la branche Tourcoing, le nombre de passagers transportés par jour servant de base de calcul est identique à la branche Roubaix. Par conséquent le débit horaire, est également identique ainsi que la même durée journalière pour le fonctionnement du Tramway. Compte tenu de la capacité maximale du véhicule en heure de pointe  $C = 245 \text{ pass}$ , on déduit la fréquence théorique  $f$  de la ligne d'après l'équation



$$Q = C.f \quad Eq : 3.1,$$

$$Q = C.f \rightarrow f = \frac{Q}{C}$$

$$AN : f = \frac{1789}{245} = 4,79 \approx 5/h$$

Ce résultat de 5 rotations par heure soit un intervalle de passage de 12 minutes est inférieur à l'intervalle réel de passage entre deux véhicules sur la branche Tourcoing qui est de 7 minutes soit une fréquence de 8,57 par heure d'après les informations obtenues de Transpole. Donc le débit peut être estimé réellement à une valeur maximale de :

$$Q = C.f \quad Eq : 3.1$$

$$= 245 \text{ pass.} / h$$

$$AN : Q = 2205 \text{ pass} / h$$

D'après la carte réseau du Tramway, la distance inter station moyenne entre Croisé Laroche et Tourcoing est de **0,583 km** pour une durée moyenne inter station, compte tenu du nombre de stations de **1,34 minute sans** arrêts aux stations et de **1,44 minutes** avec arrêts. D'après ces valeurs, on peut déduire que :

- la vitesse moyenne commerciale sur la branche Tourcoing est alors

$$V_{cmoy} = \frac{L_{TC}}{T_{TC}} = \frac{7,580km}{\frac{18,69h}{60}}$$

$$AN : V_{cmoy} = 24,33 \text{ km} / h$$

- la vitesse inter station sans arrêts aux stations sur la branche Roubaix est

$$V_{is} = \frac{d_{ismoy}}{T_{ismoy}} = \frac{0,583km}{\frac{1,34h}{60}}$$

$$AN : V_{cmoy} = 26,10 \text{ km} / h$$

- la vitesse inter station avec arrêts aux stations sur la branche Roubaix est

$$V_{isa} = \frac{d_{ismoy}}{T_{ismoy}} = \frac{0,583km}{\frac{1,44h}{60}}$$

$$AN : V_{cmoy} = 24,30 km / h$$

D'après ces résultats, on remarque que la vitesse moyenne commerciale sur le tronc commun est quasi-identique à la vitesse inter station lorsqu'on considère les temps d'arrêts aux stations.

#### 4.1.1.2.1. 4.2.2 Calcul dans le sens aller : branche Tourcoing

##### 4.1.1.2.1.4.2.2.1 Premier cas : heure normale

- Entre Croisé Laroche et Foch, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,231km}{\frac{0,58h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 23,89 km / h$$

- Foch et Le Quesne, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,801km}{\frac{1,27h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 37,83 km / h$$

- Le Quesne et Cerisaie , la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,529km}{\frac{1,06h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 29,94 km / h$$

- Cerisaie et Château Rouge, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,337km}{\frac{1,02h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 19,83 km / h$$

- Château Rouge et Cartelot, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,563km}{\frac{1,14h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 39,63 km / h$$

- Cartelot et Grand Cottignies, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,539km}{\frac{1,16h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 27,88 km / h$$

- Grand Cottignies et Triez, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,789km}{\frac{1,30h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 36,42 km / h$$

- Triez et Trois Suisses, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,902km}{\frac{1,53h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 35,37 km / h$$

- Trois Suisses et Faidherbe, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,590km}{\frac{1,19h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 29,75 \text{ km / h}$$

- Faidherbe et Ma Campagne, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{1,000 \text{ km}}{\frac{1,43 \text{ h}}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 41,96 \text{ km / h}$$

- Ma Campagne et Pont hydraulique, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,361 \text{ km}}{\frac{1,05 \text{ h}}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 20,63 \text{ km / h}$$

- Pont hydraulique et Victoire, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,593 \text{ km}}{\frac{1,56 \text{ h}}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 22,80 \text{ km / h}$$

- Victoire et Tourcoing Centre, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,345 \text{ km}}{\frac{2,07 \text{ h}}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 10 \text{ km / h}$$

#### 4.1.1.2.1.4.2.2.2 Deuxième cas : heure creuse

- Entre Croisé Laroche et Foch, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,231km}{\frac{1,03h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 13,46 km / h$$

- Foch et Le Quesne, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,801km}{\frac{1,32h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 36,41 km / h$$

- Le Quesne et Cerisaie , la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,529km}{\frac{1,06h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 29,94 km / h$$

- Cerisaie et Château Rouge, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,337km}{\frac{1,07h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 18,88 km / h$$

- Château Rouge et Cartelot, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,563km}{\frac{1,19h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 28,39 km / h$$

- Cartelot et Grand Cottignies, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,539km}{\frac{1,16h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 27,88 \text{ km / h}$$

- Grand Cottignies et Triez, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,789 \text{ km}}{\frac{1,35 \text{ h}}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 35,06 \text{ km / h}$$

- Triez et Trois Suisses, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,902 \text{ km}}{\frac{2,00 \text{ h}}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 27,06 \text{ km / h}$$

- Trois Suisses et Faidherbe, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,590 \text{ km}}{\frac{1,24 \text{ h}}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 28,55 \text{ km / h}$$

- Faidherbe et Ma Campagne, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{1,000 \text{ km}}{\frac{1,48 \text{ h}}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 40,54 \text{ km / h}$$

- Ma Campagne et Pont hydraulique, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,361 \text{ km}}{\frac{1,10 \text{ h}}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 19,69 \text{ km / h}$$

- Pont hydraulique et Victoire, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,593km}{\frac{2,01h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 17,70 km / h$$

- Victoire et Tourcoing Centre, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,345km}{\frac{2,07h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 10 km / h$$

#### 4.1.1.2.1.4.2.3 Troisième cas : heure de pointe

- Entre Croisé Laroche et Foch, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,231km}{\frac{1,08h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 12,83 km / h$$

- Foch et Le Quesne, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,801km}{\frac{1,37h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 35,08 km / h$$

- Le Quesne et Cerisaie , la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,529km}{\frac{1,16h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 27,36 km / h$$

- Cerisaie et Château Rouge, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,337km}{\frac{1,12h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 18,05 km / h$$

- Château Rouge et Cartelot, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,563km}{\frac{1,19h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 28,39 km / h$$

- Cartelot et Grand Cottignies, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,539km}{\frac{1,26h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 25,67 km / h$$

- Grand Cottignies et Triez, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,789km}{\frac{1,40h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 33,84 km / h$$

- Triez et Trois Suisses, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,902km}{\frac{2,05h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 26,40 km / h$$

- Trois Suisses et Faidherbe, la vitesse réelle d'exploitation est :



$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,590km}{\frac{1,24h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 28,55 km / h$$

- Faidherbe et Ma Campagne, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{1,000km}{\frac{1,54h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 38,96 km / h$$

- Ma Campagne et Pont hydraulique, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,361km}{\frac{1,15h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 18,83 km / h$$

- Pont hydraulique et Victoire, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,593km}{\frac{2,06h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 17,21 km / h$$

- Victoire et Tourcoing Centre, la vitesse réelle d'exploitation est :

$$V_{réelle} = \frac{d_{isr\u00e9elle}}{T_{isr\u00e9elle}} = \frac{0,345km}{\frac{2,07h}{60}}$$

$$AN : V_{réelle} = 10 km / h$$

Vitesse réelle inter station en kilomètre par heure				
Station de départ	Station d'arrivée	Créneaux horaires		
		heure normale	heure creuse	heure de pointe
Croisé Laroche	Foch	23,89	13,46	12,83
Foch	Le Quesne	37,83	36,41	35,08
Le Quesne	Cerisaie C	29,94	29,94	27,38
Cerisaie C	Ch. Rouge	19,83	18,88	18,05
Ch. Rouge	Cartelot	39,63	29,39	28,39
Cartelot	G. Cottiguiès	27,88	27,88	25,67
G. Cottiguiès	Triez	36,42	35,06	33,84
Triez	Trois Suisse	35,37	27,06	26,40
Trois Suisse	Faidherbe	29,75	28,55	28,55
Faidherbe	Ma Camp	41,86	40,54	38,96
Ma Camp	Pont Hydra	20,63	19,69	18,83
Pont Hydra	Victoire	22,80	17,70	17,21
Victoire	Tourcoing	10	10	10

Tableau 4-8 : Vitesses réelles en fonction des créneaux horaires entre Croisé Laroche et Tourcoing Centre

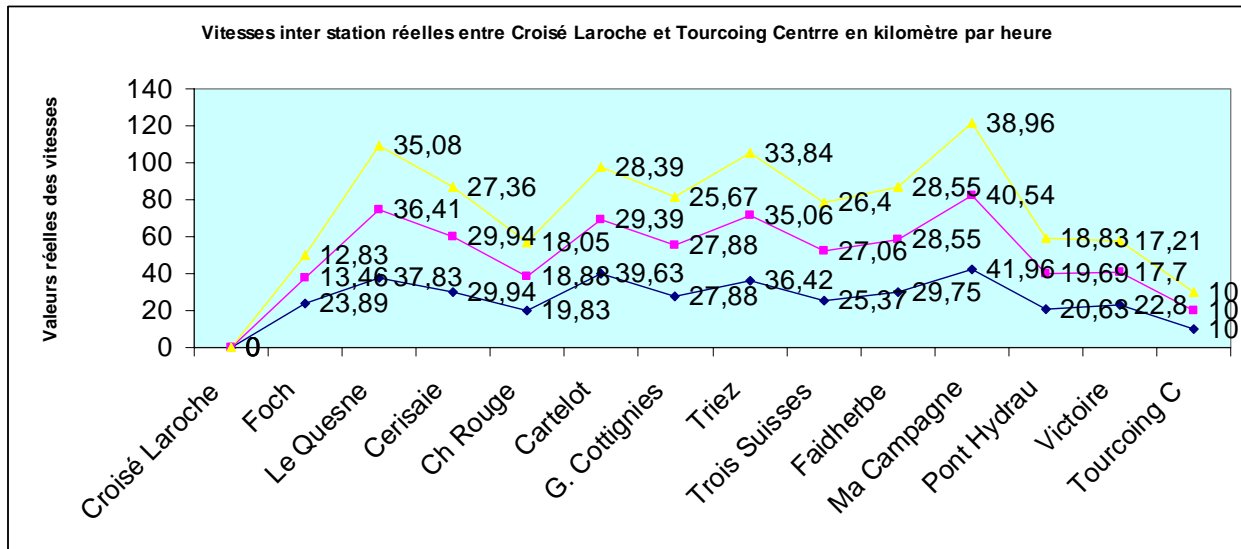


Figure 4-9 : Courbes des vitesses inter station réelles en fonction des différents créneaux horaires entre Croisé Laroche et Tourcoing Centre

#### 4.1.1.2.1.4.2.2.4 Résumé de toute la ligne Lille - Tourcoing

Vitesse réelle inter station en kilomètre par heure sur toute la ligne				
Station de départ	Station d'arrivée	Créneaux horaires		
		heure normale	heure creuse	heure de pointe
Lille Flandres	Lille Europe	16,89	16,89	16,89
Lille Europe	Romarin	32,15	32,15	30,99
Romarin	Botanique	24,88	24,88	24,88
Botanique	Saint Maur	34,06	34,06	34,06
Saint Maur	Buisson	32,28	32,28	31,18
Buisson	Brossolette	25,98	25,02	24,12
Brossolette	Clemenceau	27,75	27,75	27,75
Clemenceau	Croisé Laroche	23,95	23,1	23,1
Croisé Laroche	Foch	23,89	13,46	12,83
Foch	Le Quesne	37,83	36,41	35,08
Le Quesne	Cerisaie	29,94	29,94	27,36
Cerisaie	Ch Rouge	19,83	18,88	18,05
Ch Rouge	Cartelot	39,63	29,39	28,39
Cartelot	G. Cottignies	27,88	27,88	25,67
G. Cottignies	Triez	36,42	35,06	33,84
Triez	Trois Suisses	25,37	27,06	26,4
Trois Suisses	Faidherbe	29,75	28,55	28,55
Faidherbe	Ma Campagne	41,96	40,54	38,96
Ma Campagne	Pont Hydrau	20,63	19,69	18,83
Pont Hydrau	Victoire	22,8	17,7	17,21
Victoire	Tourcoing C	10	10	10

**Tableau 4-9 : Récapitulatif des vitesses réelles inter station en kilomètre par heure sur toute la ligne Lille Flandres - Tourcoing**

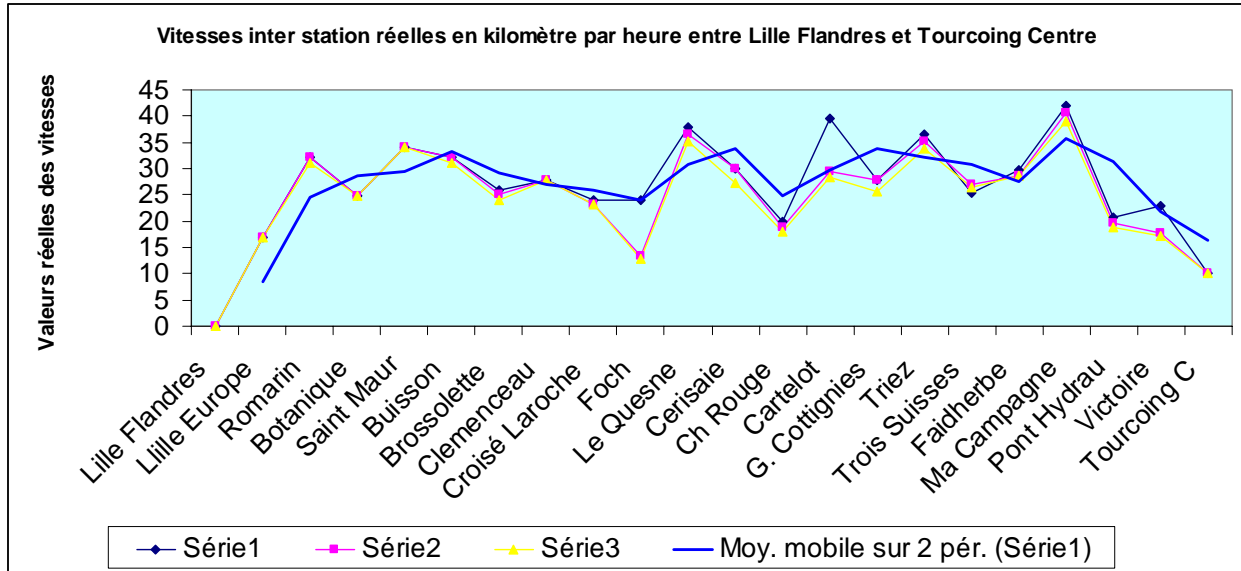


Figure 4-10 : Représentation graphique du profil des vitesses réelles inter station en kilomètre par heure sur toute la ligne Lille Flandres - Tourcoing

#### 4.1.1.2.1.4.2.2.5 Comparaison des profils de vitesses sur les deux lignes

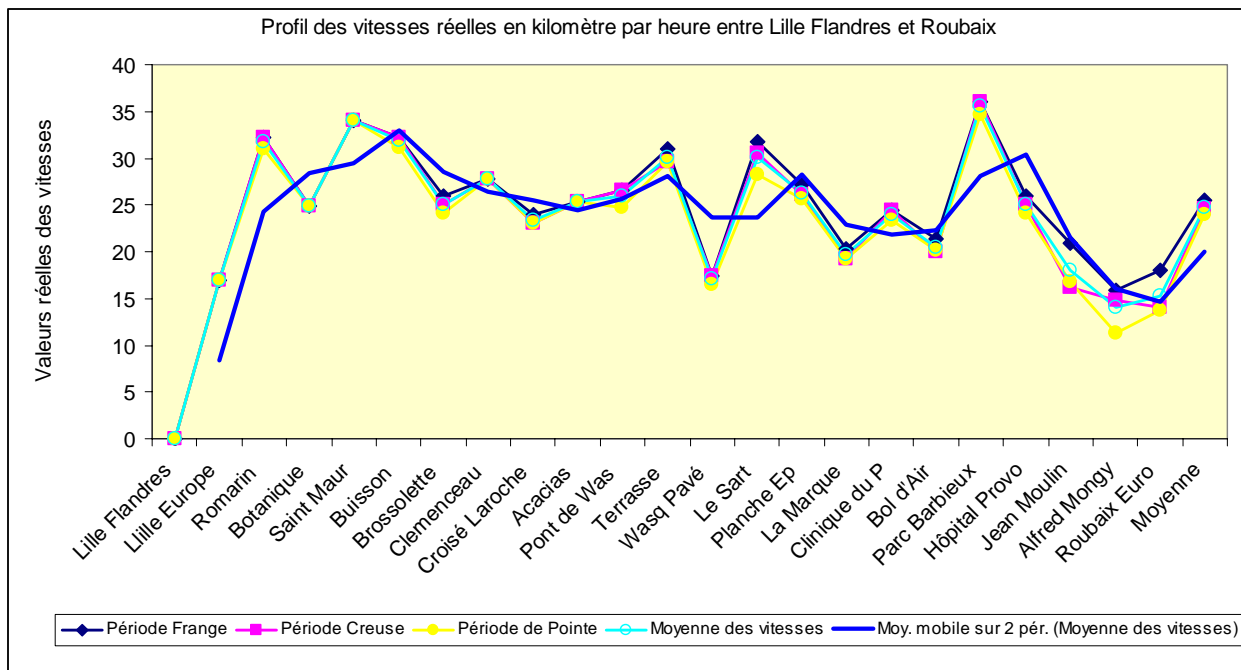
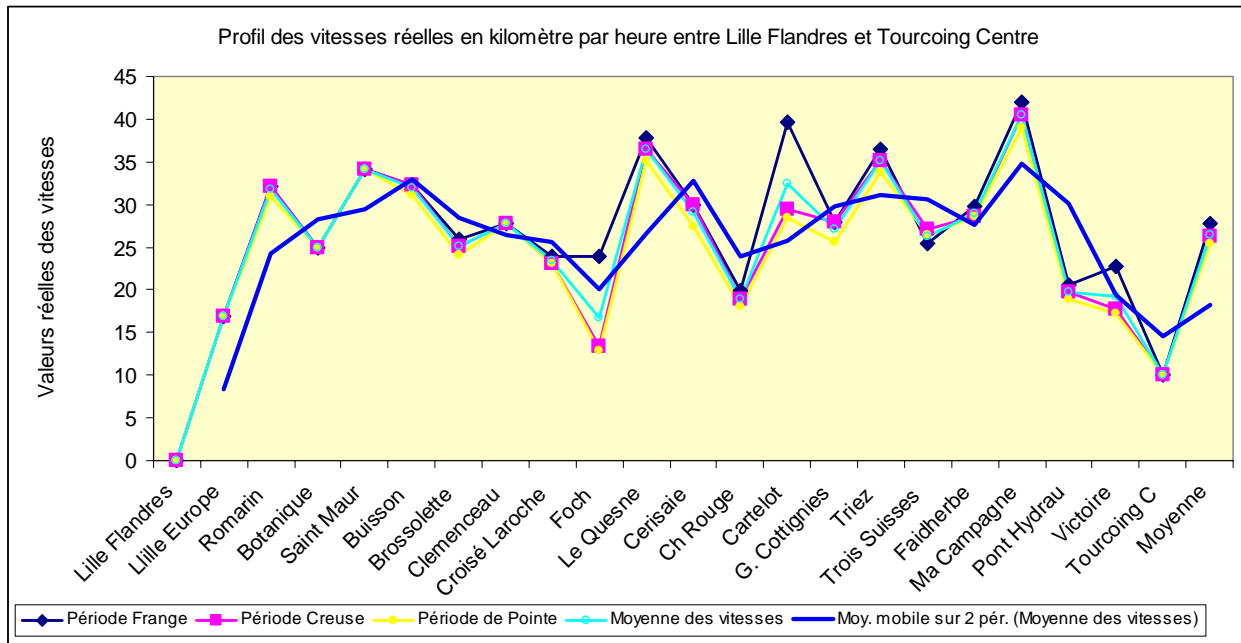


Figure 4-11 : Représentation graphique du profil des vitesses réelles inter station en kilomètre par heure sur toute la ligne Lille Flandres - Roubaix



**Figure 4-12 : Représentation graphique du profil des vitesses réelles inter station en kilomètre par heure sur toute la ligne Lille Flandres - Tourcoing**

#### 4.1.1.2.1. 5 Conclusion partielle sur les deux branches

Le profil de la vitesse réelle inter station est très irrégulier sur les deux branches. Il atteint des valeurs plus élevées sur la branche Tourcoing que sur la branche Roubaix. Cela s'explique par des distances inter stations plus élevées et un trafic moindre que sur la branche Roubaix.

#### 4.1.1.2.1. 6 Optimisation : analyse de la vitesse inter station par site.

L'optimisation consiste à analyser les vitesses réelles inter station pour trois sites différents : Croisé Laroche, Cartelot sur la ligne Lille – Tourcoing et l'Hôpital Provo sur la ligne Lille – Roubaix. Le tableau ci-dessous rappelle les caractéristiques pour le réseau tramway de Lille

Réseau de Lille		Matériel : Tramway	
Vitesse commerciale	23 km/h	$V_{com}$	
Vitesse maxi du véhicule	70 km/h	$V_v$	
Distance inter station moyenne	528 m	$d_{is}$	
Accélération	0,9 m/s <sup>2</sup>		
Décélération	1,1 m/s <sup>2</sup>		

#### 4.1.1.2.1. 6.1 Premier site : Croisé Laroche

##### 4.1.1.2.1. 6.1.1 Cas de la distance inter station Croisé Laroche Acacias = 0,571 km

$$t_a = \frac{V}{a} \quad Eq : Aj 2'$$

$$= \frac{70000m/3600s}{0,90m/s^2}$$

$$AN : t_a = 21,60s$$

Ce résultat entraîne une distance en accélération  $d_{isa}$  d'environ

$$d_{isa} = V_{com} \cdot t_a \quad Eq : Aj 2'$$

$$= \frac{23km}{h} \cdot \frac{21,60h}{3600}$$

$$AN : d_{isa} = 0,138km$$

Puis

$$t_d = \frac{V}{d} \quad Eq : Aj 2'$$

$$= \frac{70000m/3600s}{1,1m/s^2}$$

$$AN : t_d = 17,68s$$

Ce qui correspond à une distance de décélération  $d_{isd}$  d'environ

$$\begin{aligned} d_{isd} &= V_{com} \cdot t_d \quad Eq : Aj 2' \\ &= \frac{23km}{h} \cdot \frac{17,68h}{3600} \end{aligned}$$

$$AN : d_{isd} = 0,113km$$

Enfin, temps inter station en parcours normal

$$\begin{aligned} T_{isn} &= T_{is} - (T_{isa} + T_{isd}) \\ &= 95 - (21,6 + 17,68) \end{aligned}$$

$$AN : T_{isn} = 55,72s$$

puis distance inter station en parcours normal

$$\begin{aligned} d_{isn} &= d_{is} - (d_{isa} + d_{isd}) \\ &= 0,571 - (0,138 + 0,113) \end{aligned}$$

$$AN : d_{isn} = 0,320km$$

soit une vitesse de

$$V_{isn} = \frac{d_{isn}}{T_{isn}} = \frac{0,320km}{55,72h / 3600}$$

$$AN : V_{isn} = 20,67km/h$$

#### 4.1.1.2.1. 6.1.2 Cas de la distance inter station Croisé Laroche Foch = 0,231 km

Pour ce deuxième cas, ce qui change c'est seulement la distance inter station. Donc on calcule le temps inter station en parcours normal,

$$\begin{aligned} T_{isn} &= T_{is} - (T_{isa} + T_{isd}) \\ &= 58 - (21,6 + 17,68) \end{aligned}$$

$$AN : T_{isn} = 18,72s$$

puis on calcule la distance inter station en parcours normal

$$\begin{aligned}d_{isn} &= d_{is} - (d_{isa} + d_{isd}) \\ &= 0,231 - (0,138 + 0,113)\end{aligned}$$

$$AN : d_{isd} = -0,02km$$

Ce résultat est absurde, donc il faut baisser la vitesse commerciale

#### 4.1.1.2.1. 6.2 Deuxième site : Branche Lille - Tourcoing

##### 4.1.1.2.1. 6.2.1 Cas de la distance inter station entre Faidherbe et Ma Campagne = 1,000 km

En procédant de la même manière, on calcule le temps inter station en parcours normal,

$$\begin{aligned}T_{isn} &= T_{is} - (T_{isa} + T_{isd}) \\ &= 103 - (21,6 + 17,68)\end{aligned}$$

$$AN : T_{isn} = 63,72s$$

puis on calcule la distance inter station en parcours normal

$$\begin{aligned}d_{isn} &= d_{is} - (d_{isa} + d_{isd}) \\ &= 1 - (0,138 + 0,113)\end{aligned}$$

$$AN : d_{isd} = 0,749km$$

Ce qui correspond à une vitesse commerciale inter station de

$$V_{isn} = \frac{d_{isn}}{T_{isn}} = \frac{0,749km}{63,72h / 3600}$$

$$AN : V_{isn} = 42,3km / h$$

#### 4.1.1.2.1. 6.3 Troisième site : Branche Lille - Roubaix



#### 4.1.1.2.1. 6.3.1 Cas de la distance inter station entre Bol d'Air et Parc Barbieux = 0,775 km

En procédant de la même manière, on calcule le temps inter station en parcours normal,

$$\begin{aligned}T_{isn} &= T_{is} - (T_{isa} + T_{isd}) \\ &= 89 - (21,6 + 17,68)\end{aligned}$$

$$AN : T_{isn} = 49,72s$$

puis on calcule la distance inter station en parcours normal

$$\begin{aligned}d_{isn} &= d_{is} - (d_{isa} + d_{isd}) \\ &= 0,775 - (0,138 + 0,113)\end{aligned}$$

$$AN : d_{isd} = 0,524km$$

Ce qui correspond à une vitesse commerciale inter station de

$$V_{isn} = \frac{d_{isn}}{T_{isn}} = \frac{0,524km}{49,72h / 3600}$$

$$AN : V_{isn} = 37,9km / h$$

#### 4.1.1.2.1. 6.4 Conclusion partielle sur les deux branches

Nous constatons que sur les différentes branches que la vitesse inter station est en pratique supérieure à la moyenne sur le tronc commun ce, en raison de la densité de la population.

### 4.1.1.3 Cas du tramway de Nantes

#### 4.1.1.3.1 Présentation du réseau

La première ligne du tramway nantais a été mise en service en 1985. Depuis 1992, le réseau s'est agrandi et compte actuellement trois lignes. Sur une longueur totale réseau de 38 kilomètres, la première ligne, allant de Beaujoire à Saint Herblain (de couleur vert olive sur la carte du réseau)

est exploitée avec une vitesse commerciale de 22 km/h et atteint un trafic journalier de 95 000 voyageurs. Elle a 17,6 km de long et compte 32 stations. La deuxième ligne (de couleur rouge sur la carte réseau) part d'Orvault à Neustrie. Elle a une longueur de 13,9 kilomètres et compte 30 stations avec un trafic journalier de 110 000 voyageurs pour une vitesse commerciale de 18 km/h. Enfin, la troisième (de couleur bleue sur la carte) est longue de 6,4 kilomètres, compte 12 stations en partant de Sillon de Bretagne à l'Hôtel Dieu. Avec une vitesse commerciale de 17 km/h, elle atteint grosso modo le tiers du trafic journalier des deux autres lignes soit 36 000 voyageurs ; ce qui la place en dessous de la moyenne standard de l'ensemble des lignes en France. L'ensemble du réseau est desservi par 46 rames Alstom d'une capacité de 236 places dont 74 assises et 33 rames Adtranz-Bombardier de 252 places avec 72 assises. La durée d'exploitation journalière sur l'ensemble du réseau est de 19 heures soit un intervalle allant de 05h 00 à 24 h 00 et l'intervalle de passage varie de 5 à 8 minutes en heure de pointe, puis de 20 à 30 minutes le soir. La figure 4-14 montre le réseau tramway de Nantes.

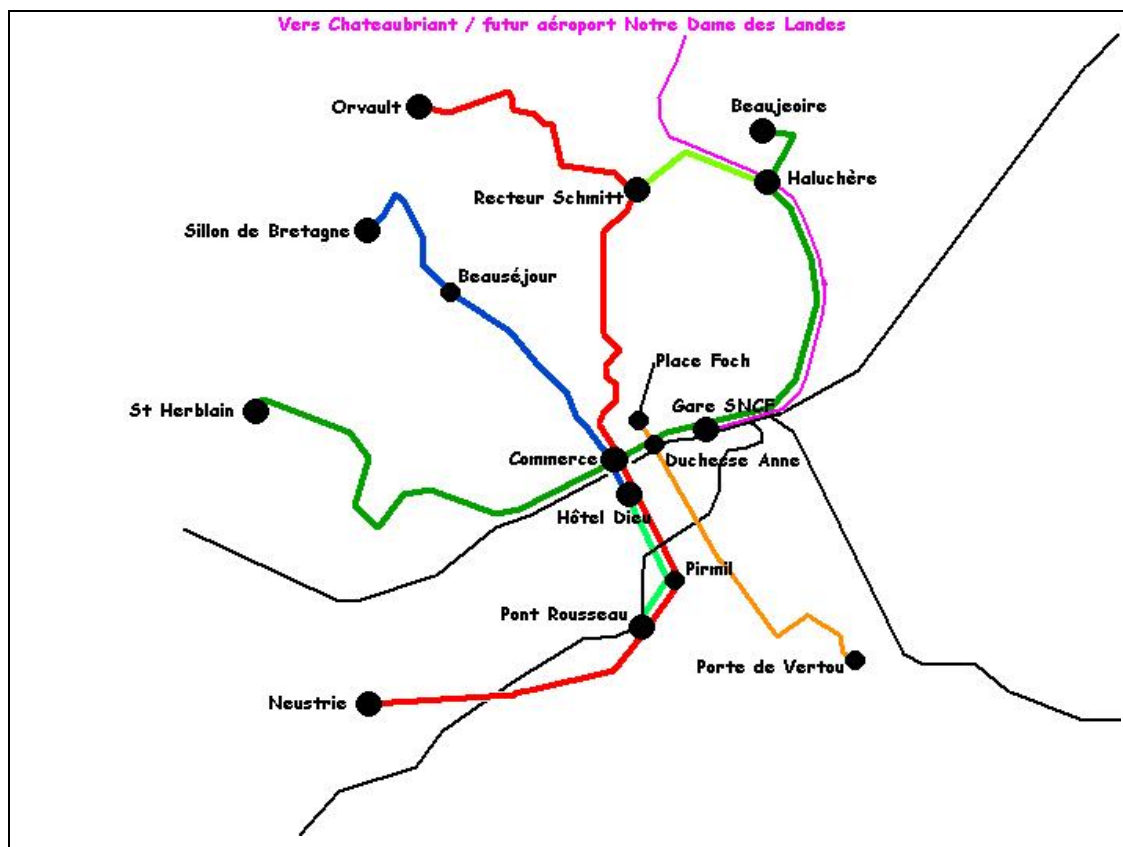


Figure 4-13 : Schéma de présentation du réseau Tramway de Nantes

#### **4.1.1.3.2 Aspect technique et le matériel**

Le tramway de Nantes a des véhicules de type Alstom 85 ou Bombardier 2000. Ils sont alimentés en courant de traction par une ligne aérienne de contact (LAC).

#### **4.1.1.3.3 Typologie de la voie**

Deux types de pose sont répertoriés sur le réseau de tramway de Nantes : la pose sur traverses et la pose sur entretoises. Des dispositifs d'affaiblissements vibratoires sont mis en place localement sur les lignes comme la pose de dalles flottantes ou la pose ORTEC. L'exploitation du tramway se fait aussi bien en site propre qu'en site partagé et priorité aux carrefours et il est prioritaire aux feux.

#### **4.1.1.3.4 Revêtements rencontrés et comportement observé**

De nombreux types de revêtements sont présents sur le réseau du tramway de Nantes. Quelques sections sont recouvertes de ballast non circulé et très peu esthétique. En sites propres, les sections sont aménagées avec un décor où le gazon alterne avec le béton, ou encore avec des plantes vivaces et des éléments modulaires. En site partagé, on retrouve des revêtements du type enrobé armé ou asphalte qui peuvent être de différentes couleurs.

En conclusion, sur l'aspect technique il est à noter que cette infrastructure est totalement intégrée dans le site de Nantes, de par le choix des revêtements et la forte contribution architecturale du projet.

#### **4.1.1.3.5 Caractéristiques générales et offre de fréquentation du réseau**

Elles sont issues d'une étude organisée en 2001 par le CERTU, le CETE de Lyon et le CETE Nord Picardie (débit horaire, distance inter station, intervalle de passage), complétée par des données provenant du site web : <http://grizzli.beat.free.fr/fer/urbain/nantes.htm>. Le tableau 4.-15 résume l'ensemble des caractéristiques générales du réseau de Nantes.

Réseau de Nantes			Matériel : Tramway		
Ligne	L1	L2	L3	Symbole	Total
Longueur de la ligne	17,6 km	13,9 km	6,4 km	$L_l$	
Nombre de stations	32	30	12	$n_s$	
Nombre de rames	46 Rames Alsthom : (3 caisses sur 4 bogies)			$n_v$	
	33 Rames Adtranz -Bombardier : (5 caisses sur 3 bogies)				
Capacité d'une rame	Rames Alsthom : 236 (74 assises)			$C$	
	Rames Adtranz -Bombardier : 252 (72 assises)				
Vitesse moyenne	22 km/h	18 km/h	17 km/h	$V_{com}$	
Trafic journalier	95 000 voyageurs	110 000 voyageurs	36 000 voyageurs	$Q_{théol j}$	
Horaires d'ouverture	De 5h00 à 24h00			$T_j$	
Débit horaire	5000 voy/h	5789 voy/h	1895 voy/h	$Q_{/h}$	
Intervalle de passage	5/8 min. en pointe - 20/30 min. le soir			$I_p$	
Vitesse maxi du véhicule	70 km/h			$V_v$	
Distance moyenne inter station	497 m			$d_{is}$	
Longueur du véhicule	29,4 m			$L_v$	
Largeur du véhicule	2,3 m			$\ell_v$	

**Tableau 4-15 : Caractéristiques générales du réseau Tramway de Nantes**

#### 4.1.1.3.6 Les coûts du réseau

L'ensemble des coûts englobe les coûts d'investissement, les coûts d'exploitation. Dans ce qui suit, nous présentons ces différents coûts.

#### 4.1.1.3.6.1 Le coût d'investissement

Selon la fourchette des coûts actuels, (présentés à la section 2.8.1 du chapitre 2) le réseau de Nantes aurait coûté en investissement, s'il avait été construit récemment au total 758 millions d'euros soit 352 millions pour la première ligne, 278 millions pour la deuxième et 128 pour la troisième.

#### 4.1.1.3.6.2 Le coût d'exploitation

Avec ses 46 rames Alstom (à 3 caisses sur 4 bogies) et 33 rames Adtranz -Bombardier : (à 5 caisses sur 3 bogies) puis un coût d'exploitation pour un véhicule par an et par kilomètre évalué entre 4 et 4,9 euros pour une rame de tramway, ce réseau coûte par an entre 11976,4 et 14671,09 €. Pour l'acquisition des rames, le montant d'investissement s'élèverait entre 118,5 et 173,8 millions d'euros.

#### 4.1.1.3.7 Optimisation

Pour optimiser ce réseau, nous procédons directement à l'application du modèle établi au chapitre 3. Pour cela, nous choisissons la troisième ligne en raison de sa faible vitesse commerciale (17 km/h). Son trafic journalier étant de 36 000 passagers, le débit horaire est par conséquent de 1895 passagers par heure et par direction.

#### 4.1.1.3.8 Application du modèle à la ligne 3 du réseau tramway de Nantes

L'application de notre modèle sur cette ligne a pour objectif d'optimiser son exploitation par l'amélioration du trafic horaire. Ainsi, sachant que le débit horaire est  $Q = 1895 \text{ pass/h}$ , et la capacité  $C = 236 \text{ pass}$  d'après l'équation

$$Q = C.f \quad \text{Eq : 3.1,}$$

on déduit la fréquence :

$$Q = C.f \rightarrow f = \frac{Q}{C}$$

$$AN: f = \frac{1895}{236} = 8,02 \approx \frac{8}{h}$$

Ce résultat de la fréquence égale à 8/h correspond à un intervalle de passage de 7,5 minutes ; valeur comprise entre 5 et 8 minutes indiquées en période de pointe. Pour optimiser l'exploitation de la ligne, commençons par appliquer le premier scénario en fixant la capacité à 236 places, puis cherchons à augmenter la fréquence.

$$Sc N^{\circ}1: \begin{cases} C = 236 \text{ pass} \\ f = ? \end{cases}$$

Pour cela, prenons un intervalle de passage de 5 minutes qui est la borne inférieure permettant d'avoir une fréquence de 12/h. Pour cette valeur de la fréquence, on trouve un nombre de véhicules d'après l'équation Eq:3.1.2, d'environ 4,5 soit sensiblement 0,70 véhicules par kilomètre. En reportant la valeur de la fréquence dans l'équation Eq:3.1, on trouve un débit de 2832 passagers par heure soit une hausse théorique de + 50 % par rapport à une fréquence de 8/h. Dans ce cas, on doit vérifier qu'avec cette valeur de la fréquence égale à 12/h, le temps inter station est réaliste. En égalisant les équations

$$f = n_v \frac{V_{com}}{L_l} \quad Eq:3.1.2 \quad [1/h]$$

et

$$V_{com} = \frac{L_l}{n_s (T_{is} + T_s)_s} \quad Eq:3.2.3,$$

puis en simplifiant par la longueur de la ligne  $L_l$ , on peut montrer que

$$\frac{f}{n_v} = \frac{1}{n_s (T_{is} + T_s)_s},$$

, après quoi, on déduit que

$$\begin{aligned} \rightarrow T_{is} &= \frac{n_v}{n_s \cdot f} - T_s \\ &= \frac{4,5}{12.12/h} - \frac{1}{120} h \end{aligned}$$

En supposant que le temps d'arrêt en station est de 30 secondes tous réseaux confondus. L'application numérique donne :

$$AN: T_{is} = 0,023 \approx \frac{1,4}{60} h$$

Ce temps inter station égal à 1,4 minutes est théoriquement réaliste pour parcourir une distance de 497 mètres sans risque d'accident et correspond à une vitesse inter station de

$$\begin{aligned} V_{is} &= \frac{d_{is}}{T_{is}} \\ &= \frac{0,497km}{1,4h/60} \end{aligned}$$

$$AN: V_{is} = 21,3km/h$$

Cette vitesse inter station égale à 21 km/h est également réaliste et permet de garantir une vitesse commerciale de 17 km/h.

Par souci d'optimiser l'exploitation, il est possible d'augmenter la capacité en maintenant fixe la fréquence de départ. Ce qui donne le scénario suivant :

$$Sc N^{\circ}2: \begin{cases} C = ? \text{ pass} \\ f = 8/h \end{cases}$$

Pour cela, augmentons d'abord la capacité de 50 % soit 354 places. En reportant la valeur de cette capacité dans l'équation Eq : 3.1, on obtient un débit de 2832 passagers par heure soit une hausse identique au premier scénario (+ 50 %). On précise qu'une fréquence de 8/h correspond d'après l'équation Eq : 3.1.2 à 3 véhicules soit environ 0,47 véhicules au kilomètre et à un intervalle de passage de 7,5 minutes. Ensuite, déterminons le temps inter station.

D'après les équations Eq:3.1.2 et Eq:3.2.3 et compte tenu des hypothèses prises sur le temps d'arrêt en station, on déduit le temps inter station

$$\begin{aligned} \rightarrow T_{is} &= \frac{n_v}{n_s \cdot f} - T_s \\ &= \frac{3}{12.8/h} - \frac{1}{120} h \end{aligned}$$

$$AN: T_{is} = 0,023 \approx \frac{1,4}{60} h$$

Ce temps inter station est identique à celui trouvé dans le premier scénario, ce qui est logique, compte tenu du fait que la fréquence est la même.

En s'appuyant sur l'équation

$$Q_{théo} = C \cdot n_v \cdot \frac{V_{com}}{L_l} \quad Eq:3.2,$$

on peut avoir d'autres scénarios. Par exemple : augmenter le nombre de véhicules  $n_v$  en gardant la vitesse commerciale  $V_{com}$  fixe, ou augmenter la vitesse commerciale en gardant le nombre de véhicules fixe. Commençons par augmenter le nombre de véhicules à 6 soit une augmentation de + 100 % et maintenons fixe la vitesse commerciale à 17 km/h. Ainsi que le montre le scénario suivant :

$$Sc N^{\circ}3 : \begin{cases} n_v = 6 \\ V_{com} = 17 km/h \end{cases}$$

Dans ces conditions, on recalcule la fréquence  $f$  à l'aide de la formule

$$\begin{aligned} f &= n_v \frac{V_{com}}{L_l} \quad Eq:3.1.2 \quad [1/h] \\ &= 6 \cdot \frac{17 km/h}{6,4 km} = 15,94/h \end{aligned}$$

$$AN : f = 16/h$$



En reportant ce résultat dans l'équation  $Eq : 3.1$ , on obtient un débit horaire théorique de 3776 passagers soit une augmentation de + 99,3 % ce qui correspond à un intervalle de passage de 3,75 minutes soit une augmentation de la fréquence de + 100 %. En théorie on peut avoir 0,94 véhicules au kilomètre. Compte tenu de la valeur de l'intervalle de passage égale à 3,75 minutes inférieure à l'intervalle de passage indiqué (5 à 8 minutes), ce scénario n'est pas envisageable (ou seulement en site propre) pour des raisons d'insertion dans le trafic.

Fixons à présent le nombre de véhicules  $n_v$  à 3 et augmente la vitesse commerciale  $V_{com}$  à 25 km/h soit une hausse de + 47,1 %. On obtient le scénario 4 suivant :

$$Sc N^{\circ}4 : \begin{cases} n_v = 3 \\ V_{com} = 25 \text{ km/h} \end{cases}$$

Avec cette valeur de la vitesse égale à 25 km/h, la fréquence d'après l'équation  $Eq : 3.1.2$  est égale à 11,7 /h soit une hausse de + 46,8 %, puis à l'aide de la formule  $Eq : 3.1.2$ , on trouve un débit de 2761 passagers par heure soit une augmentation de + 45,70 %. Le problème lorsqu'on a une vitesse élevée est que le site doit de préférence être propre afin d'éviter des risques d'accidents ; ce qui malheureusement n'est pas le cas. De ce fait, ce scénario n'est pas envisageable.

Enfin, en s'appuyant sur l'équation  $Eq : 3.3$ , on peut distinguer d'autres scénarios. En effet, on peut envisager d'augmenter le nombre de stations  $n_s$  et supposer le temps inter stations  $T_{is}$  et le temps en station  $T_s$  fixes. Ce scénario n'est pas possible puisque le nombre de stations existe réellement par conséquent le temps inter station ainsi que le temps en station. Diminuer le nombre de stations  $n_s$  n'est également pas possible non plus. Augmenter le temps inter stations  $T_{is}$ , suppose diminuer la vitesse commerciale baisse en raison du trafic : scénario incompatible avec notre objectif, ou enfin diminuer le temps inter stations  $T_{is}$ . Pour cela, diminuons le temps inter station à 1 minute. Compte tenu du nombre de stations  $n_s$  et du temps d'arrêt en station  $T_s$ , en se servant de l'équation

$$\frac{f}{n_v} = \frac{1}{n_s (T_{is} + T_s)},$$

ensuite, on déduit que

$$\begin{aligned} f &= \frac{n_v}{n_s (T_{is} + T_s)} \\ &= \frac{3}{12 \left( \frac{1}{60} h + \frac{1}{120} h \right)} \\ f &= 15/h \end{aligned}$$

Une fréquence de 15/h d'après l'équation Eq:3.1, donne un débit horaire de 3540 passagers soit une augmentation du débit de + 86,8 % et correspond à un intervalle de passage de 4 minutes soit une augmentation de la fréquence de + 87,5 %. Le nombre de véhicules est dans ce cas d'après l'équation

$$\begin{aligned} f &= n_v \frac{V_{com}}{L_l} \quad Eq:3.1.2 \quad [1/h] \\ \rightarrow n_v &= \frac{f \cdot L_l}{V_{com}} = \frac{15/h \cdot 6,4km}{17km/h} \\ n_v &= 5,6 \approx 6 \end{aligned}$$

Enfin, en raison des conditions de sécurité et d'entretien, on peut doubler le nombre de véhicules et par la même occasion doubler les différents coûts.

## 4.1.2 Etude de nouveaux réseaux tramways

### 4.1.2.1 Introduction

Les réseaux nouveaux de tramway diffèrent des anciens d'abord par leur modernité puis, par leur caractère optimal. En effet, les nouveaux réseaux font face encore plus que par le passé à des contraintes de type urbanistique (insertion dans le trafic, manque d'espace...), de type technologique (le matériel doit répondre de plus en plus à des normes de sécurité innovantes

pour, être de plus en plus accessible, assurer le confort des usagers...) et de type économique en terme de restriction budgétaire pour pouvoir assurer les coûts d'investissement, d'exploitation et de maintenance tout en visant à promouvoir les transports collectifs. Compte tenu du modèle mathématique élaboré au chapitre 3, le but de l'étude dans cette partie vise à moduler la fréquence d'insertion des modes de transport dans le trafic pour respecter un débit horaire imposé pour une vitesse commerciale fixée dans un tissu urbain figé afin de respecter le débit horaire imposé. Les nouveaux réseaux présentent plusieurs avantages par rapport aux anciens que nous allons expliciter plus loin.

#### **4.1.2.1.1 Cas du tramway de Valenciennes**

##### **4.1.2.1.1.1 Présentation du réseau**

Le projet "Transvilles" permettra de relier les différents pôles de la conurbation valenciennoise par la réalisation de 21 kilomètres de ligne et 34 stations, dont 5 transformées en centres d'échanges multimodaux. La première phase a été mise en service en 2006, longue de 11 kilomètres avec un atelier dépôt et un coût de financement qui s'élève à 243 millions d'euros (HT), elle comporte 19 stations entre Dutemple et l'Université du Mont Houy (en couleur bleue marine sur la carte réseau), avec une branche vers les Tertiales/Poterne. En attendant des prolongements prévus dans un sens vers la commune de Saint-Saulve et dans l'autre vers Denain à l'horizon 2014. [setec tpi : Transports en site propre T 23, année 2002 - 2003]. La figure 4.3.4 montre le réseau tramway de Valenciennes.

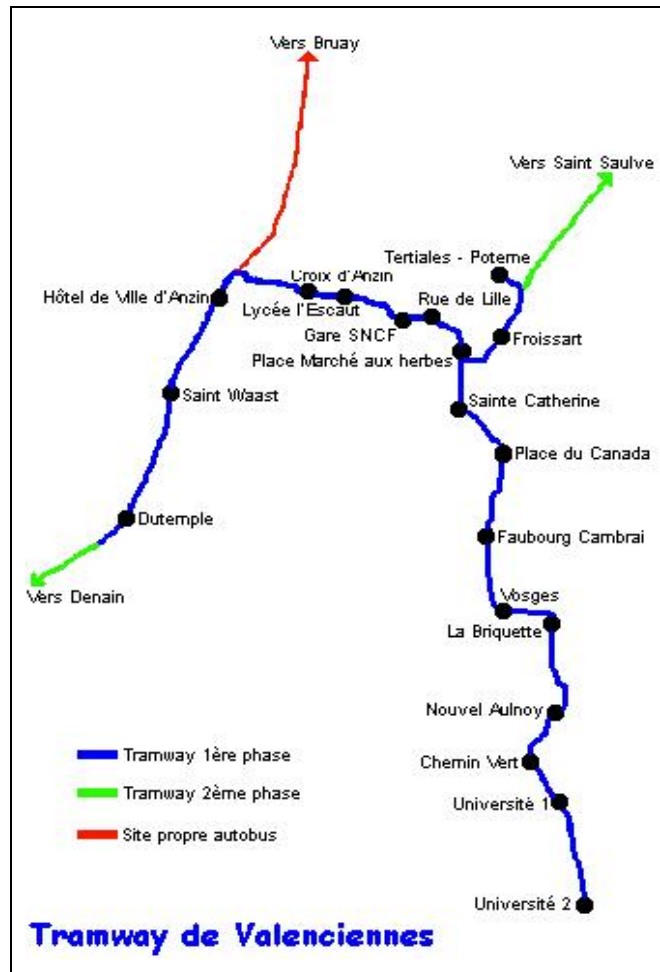


Figure 4-14 : Schéma de présentation du réseau Tramway de Valenciennes.

#### 4.1.2.1.1.2 Le matériel

Le réseau est exploité actuellement en utilisant de 17 rames de type Alstom Citadis, modèle 302, d'une longueur de 33 m pour une largeur de 2,4 m et une capacité de 295 places dont 48 places assises, la parcourant avec une vitesse de 20 km/h en milieu urbain, et 70 km/h hors agglomération [Sources : La Gazette des communes]. Les rames du tramway ont été conçues par Alstom Transport et « personnalisées » pour le Valenciennois par la commission Design du SITURV. Dotée de chaque côté de 4 doubles portes et de 2 portes simples, la rame accueille sans difficulté les personnes à mobilité réduite grâce à la présence d'un plancher bas intégral. Larges surfaces vitrées, vitres teintées, espaces aérés, climatisation, le tramway du Valenciennois est signé d'une livrée gris métallisé et sur l'avant de deux ouïes latérales et d'une calandre en forme de V.

#### **4.1.2.1.1.3 Les conditions de confort**

Les sièges sont rétractables et confortables avec girouettes lumineuses annonçant le prochain arrêt et compartiments spacieux et lumineux ... Le tramway va permettre aux voyageurs de se déplacer dans des conditions optimales de confort. Le conducteur est lui-même doté d'un siège ergonomique. De la même façon, les rails qui ont été choisis pour équiper le tramway, les rails 41 GPU de Corus, assurent une continuité parfaite de la table de roulement. Soudés entre eux, ils évitent les saccades et améliorent le confort des passagers. Enfin, par les journées ensoleillées, les voyageurs apprécieront la climatisation de la rame.

#### **4.1.2.1.1.4 Les stations**

Les stations, leur équipement et leur mobilier ont été conçus, pensés et réalisés spécialement pour le Tramway du Valenciennois. Comme pour les rames, leur design répond à une recherche d'ergonomie optimale, d'accessibilité, de confort, de sécurité et d'intégration urbaine esthétisante. Cette démarche se traduit par des équipements complémentaires : à l'extrémité de la station, un totem offre des informations complètes sur la ligne (nom de la station, plan de la ligne, horaires), sur le réseau (correspondances bus, pôle d'échanges), sur le quartier et sur la ville (plan...) ; des dalles podotactiles indiquent aux personnes aveugles et mal voyantes les bordures du quai ; les abris faits de verre et de matière composite accueillent des bancs de bois et de métal qui reprennent le design du tramway ; les bandeaux de station indiquent non seulement le nom de l'arrêt mais aussi la commune ; un distributeur de tickets abrité permet d'acheter son titre de transport en espèces ou par carte bancaire, ou de recharger sa « Transcarte » ; des barrières situées de part et d'autre de la station sécurisent le quai ; des caméras de vidéosurveillance assurent une sécurité permanente de la station depuis le Poste de Commande Centralisé.

#### **4.1.2.1.1.5 La tarification**

Le tarif est unique, ce qui permet de faciliter l'usage et de rendre les transports collectifs attractifs. Le SITURV, signataire de la charte régionale Nord – Pas de Calais de l'intermodalité dans les transports, travaille depuis 1997 à simplifier la tarification par la création de titres de

voyage multimodaux. L'objectif est que chaque client puisse, pour ses correspondances, choisir indifféremment, entre le bus, le TER, et le tramway avec le même titre de transport. Dès sa première application en 1997, en collaboration avec la SNCF Région Lille et Valenciennes-Stationnement, le SITURV a mis en service « Transcarte » sur le réseau de bus du Valenciennois. En 2005, plus de 42 000 personnes utilisent cette carte à puce pour emprunter les bus et les TER inscrits à l'intérieur du périmètre urbain. Ce type de tarification est étendu au nouveau tramway.

Par ailleurs, une autre mesure tarifaire incitative, celle lancée autour des 4 Parkings Relais (P+R) vise à offrir une alternative véritablement concurrentielle à la voiture en centre ville. Ainsi, pour 2,60€ par véhicule versés à l'entrée du parking, tous ses occupants bénéficient d'un billet aller et retour en tramway. Les tarifs proposés se déclinent en deux gammes : celle destinée aux voyageurs réguliers qui peuvent s'acquitter d'un abonnement répondant à leurs besoins et qui s'appuie sur la carte à puce rechargeable « Transcarte », et celle des cartes -tickets « Transval » destinées aux voyageurs occasionnels. Ces deux gammes se présentent de la manière suivante :

Voyageurs Réguliers	Voyageurs Occasionnels
<p><b>Lycéens, jeunes et étudiants</b></p> <p>Pass Booster Mensuel .....11,00 €/ mois</p> <p>Pass Jeune Mensuel .....28 ,50 €/ mois</p> <p>Pass Jeune Annuel .....203,50 €/an</p> <p><b>Adultes</b></p> <p>Pass Lib Mensuel .....34,30 €/ mois</p> <p>Pass Lib+ Mensuel .....24,00 €/ mois</p> <p><b>Senior</b></p> <p>Pass Senior Annuel.....dédié aux seniors non imposables</p>	<p><b>Voyageurs Occasionnels:</b></p> <p>Transval 1 voyage .....1,40 €</p> <p>Transval 2 voyages .....2, 60 €/ l'unité</p> <p>Transval 5 voyages .....6, 00 €/ l'unité</p> <p>Transval 10 voyages .....11, 00 €/ l'unité</p> <p>Transval journée.....3, 60 €/ l'unité</p> <p>Pour les personnes se trouvant en situation particulière (demandeurs d'emploi...)</p> <p>Transéco 5 voyages .....4,60 €/ l'unité</p> <p>Transéco 10 voyages .....8,35 €/ l'unité</p>

#### **4.1.2.1.1.6 Caractéristiques générales et offre de fréquentation du réseau**

L'intervalle de passage est de 5 minutes en heure de pointe, et toutes les 10 minutes aux heures creuses. Pour faire l'ensemble du parcours, il faut 25 minutes. La ligne de tramway est en site propre et bénéficie d'une priorité sur le trafic routier aux carrefours ; ce qui assure aux passagers des temps de transport optimisés. Corrélativement, la simplification des lignes de bus en centre ville va alléger la circulation et, grâce au tramway, éviter aux clients Transvilles d'être bloqués dans les embouteillages aux heures de pointe. À la fréquence élevée de circulation des tramways s'associe une amélioration des fréquences de passage pour les lignes de bus à haut niveau de service. Par exemple, la ligne reliant la Gare de Valenciennes à Quievrechain (via St Saulve et Denain) se voit renforcée avec un bus toutes les 12 minutes aux heures de pointe contre un tous les quarts d'heure auparavant. Des services de soirée vont être mis en place jusqu'à 23h30 le vendredi et le samedi sur les lignes les plus fréquentées. Le tableau 4.-17 résume l'ensemble des caractéristiques générales du réseau du tramway de Valenciennes.

Réseau de Valenciennes		Matériel : Tramway		
Ligne	Phase 1	Phase 2	Symbole	Total
Longueur de la ligne	11 km	10 km	$L_l$	21 km
Nombre de stations	19	15	$n_s$	34
Nombre de rames	17 rames Citadis		$n_v$	24
Capacité d'une rame	295 places (48 assises)		$C$	?
Vitesse moyenne	20 km/h en milieu urbain 70 km/h hors agglomération		$V_{com}$	
Trafic journalier 2006	51 000 voyageurs		$Q_{théo / j}$	
Horaires d'ouverture	De 5h00 à 24h00		$T_j$	19h
Débit horaire	2684 voyageurs/heure		$Q_{/h}$	
Fréquences	5 min. en pointe - 10 min. le soir		$I_p$	
Vitesse maxi du véhicule	70 km/h		$V_v$	
Distance inter station	520 m		$d_{is}$	
Longueur du véhicule	33 m		$L_v$	
Largeur du véhicule	2,4 m		$\ell_v$	

**Tableau 4-17 : Caractéristiques générales du réseau Tramway de Valenciennes**

Le Tramway de Valenciennes souligne trois faits majeurs : il circule sur les anciennes voies du chemin de fer une fois sorti du centre ville, il circule sur voie unique hors de la ville et à vitesse élevée. En assurant tout à la fois un bon confort aux usagers et des temps de déplacement réduits, la particularité du Tramway de Valenciennes se justifie plus pour des raisons économique d'abord par l'installation des lignes sur les anciennes plate formes du chemin de fer, puis par l'adoption d'une voie unique hors de la ville doublée seulement aux stations pour



permettre le croisement de deux véhicules, lui permettant ainsi de circuler à des vitesses élevées.

#### **4.1.2.1.1.7 Les coûts du réseau**

Les coûts du réseau se divisent en coûts d'investissement, en coûts d'exploitation puis des coûts divers qui ne sont pas présentés dans cette partie.

##### **4.1.2.1.1.7.1 Le coût d'investissement**

L'investissement de la première phase a coûté 243 millions d'euros et a été financée par l'autofinancement, des subventions (dont 41,5 M€ État) et un emprunt auprès de la Banque Européenne d'Investissement pour un montant de 110,5 M€. La phase 2, déjà en cours de réalisation, permettra de prolonger à l'été 2007, la ligne 1 de 8,5 km empruntant sur 6,5 km le tracé de l'ancienne voie ferrée des houillères et de desservir 7 stations jusqu'à Denain. Son coût est estimé à 69 ME matériel roulant inclus (4 rames supplémentaires). Cette phase 1 du tramway constitue l'épine dorsale du réseau intercommunal Transvilles qui prévoit de transporter 24 millions de passagers chaque année d'ici 3 ans, soit une augmentation de 30 % [TRANS FLASH, N° 315 – Juillet, Août 2006 –].

##### **4.1.2.1.1.7.2 Le coût d'exploitation**

Selon les coûts présentés à la section 2.8.1 du chapitre 2, le coût d'exploitation pour un véhicule par an et par kilomètre étant de 4 à 4,9 euros pour une rame de tramway, le réseau de Valenciennes exploité à l'aide de 19 rames Alstom sur une longueur de 11 kilomètres coûte en terme d'exploitation par année entre 836€ à 1024,1€. L'ensemble des coûts d'investissement et d'exploitation depuis que le réseau existe se lèvent à un peu plus de 269 M€.

#### **4.1.2.1.1.8 Application du modèle au réseau tramway de Valenciennes**

Sachant que  $Q = 2684 \text{ pass/h}$  et  $C = 295 \text{ pass}$ , on déduit la fréquence théorique  $f$  de la ligne d'après l'équation

$$Q = C.f \quad Eq:3.1,$$

$$Q = C.f \rightarrow f = \frac{Q}{C}$$

$$AN: f = \frac{2684}{295} = 9,1 \approx 9/h$$

Ce résultat de la fréquence égal à 9/h suppose qu'il est possible de faire 9 rotations par heure soit un intervalle de passage de 6 minutes et 40 secondes.

Appliquons le premier scénario en fixant la capacité à 295 places et cherchons à augmenter la fréquence.

$$Sc N^{\circ}1: \begin{cases} C = 295 \text{ pass} \\ f = ? \end{cases}$$

Compte tenu des données du réseau sur l'intervalle de passage  $i_p$  égal à 5 minutes en heure de pointe, en diminuant  $i_p$ , on augmente  $f$ . En choisissant donc un intervalle de passage de 4 minutes (on précise au passage que l'intervalle de passage couramment rencontrées dans les systèmes tramways actuels varie de 5 à 8 minutes pour un débit horaire généralement inférieur à 4000 passagers par heure), on recalcule la fréquence  $f$  à l'aide la relation

$$f = \frac{1}{i_p} = \frac{1}{4h/60}$$

$$AN : f = 15/h$$

Avec ce résultat égal à 15/h on augmente la fréquence + 67 %. En reportant cette valeur dans l'équation Eq:3.1, on obtient un débit de 4425 passagers par heure, ce qui correspond à une augmentation du débit horaire théorique de + 64,8 % par rapport à une fréquence de 9/h.

Appliquons le deuxième scénario en augmentant la capacité de + 67 % également soit 493 places et maintenons la fréquence à sa valeur initiale de 9/h.

$$Sc N^{\circ 2} : \begin{cases} C = 493 \text{ pass} \\ f = 9/h \end{cases}$$

En reportant cette nouvelle valeur de la capacité dans l'équation Eq:3.1, on obtient le débit devient de 4437 passagers par heure soit + 65 %. Ce deuxième résultat montre qu'une augmentation identique de la fréquence et/ou de la capacité, ne change presque pas en théorie la valeur du débit.

Mais, au regard du débit horaire réel (2684 passagers par heure), comme en témoigne également l'intervalle de passage (5 minutes), la zone géographique du réseau n'est pas fortement peuplée. Il n'est donc pas optimal d'avoir des rames à grande capacité, ni une fréquence trop élevée. Par conséquent on peut ajuster à la fois, la capacité et la fréquence afin d'optimiser le débit horaire théorique. En effet, le nombre de véhicules en pratique est de 19, mais à l'aide de l'expression

$$f = n_v \frac{V_{com}}{L_l} \quad Eq:3.1.2 \quad [1/h] ,$$

connaissant la vitesse commerciale, la longueur de la ligne puis la fréquence, on déduit le nombre de véhicules

$$\rightarrow n_v = \frac{f \cdot L_l}{V_{com}} = 9/h \cdot \frac{11km}{20km/h}$$

$$AN : n_v = 4,95 \approx 5$$

Ce résultat égal à 5 indique qu'on a approximativement 0,45 véhicules au kilomètre soit sensiblement un véhicule tous les 500 mètres. Mais, pour cette fréquence vérifions que le temps inter station est réaliste. Connaissant donc le nombre de stations (17), le temps d'arrêt en station (pris à 30 secondes tous réseaux confondus), en rapportant la fréquence au nombre de véhicules calculés

$$\frac{f}{n_v} = \frac{1}{n_s (T_{is} + T_s)},$$

on déduit le temps inter station

$$\begin{aligned} \rightarrow T_{is} &= \frac{n_v}{n_s \cdot f} - T_s \\ &= \frac{5}{17.9/h} - \frac{1}{120} h \end{aligned}$$

$$AN: T_{is} = 0,0243 \approx \frac{1,46}{60} h$$

Ce résultat du temps inter station égal à 1,46 minutes est réaliste pour parcourir une distance de 520 mètres sans risque d'accident et correspond à une vitesse inter station de

$$\begin{aligned} V_{is} &= \frac{d_{is}}{T_{is}} \\ &= \frac{0,52km}{1,46h/60} \end{aligned}$$

$$AN: V_{is} = 21,3km / h$$

Par contre, ce résultat de la vitesse inter station égale à 21 km/h est à peine réaliste pour garantir une vitesse commerciale de 20 km/h. Pour cela, il faut augmenter la vitesse inter station, donc diminuer le temps inter station.

Diminuons par exemple le temps inter station à 1,2 minutes soit de -21,6 %. Cette nouvelle valeur va correspondre à une vitesse inter station de 26 km/h soit + 30 % de la vitesse commerciale. Ce résultat de la vitesse commerciale égale à 26 km/h augmente théoriquement la fréquence seulement de + 2 %. Cette analyse montre qu'une augmentation significative de la vitesse inter station n'est pas forcément synonyme d'augmentation significative de la fréquence.

En revanche, la capacité des véhicules étant déjà suffisamment importante (295 places), la réduction de l'intervalle de passage à 4 minutes ayant pour conséquence d'augmenter la fréquence de +67 %, on peut pour optimiser la ligne, fixer cette valeur de la capacité à 295 places, laisser l'intervalle de passage à 5 minutes correspondant à une fréquence de 12/h soit +33 % par rapport à la fréquence initiale. Cette valeur de la fréquence engendre un débit horaire théorique de 3540 passagers par heure, correspondant à une augmentation de + 38,9%, puis un nombre de véhicules de 7 soit +40 % par rapport à la fréquence initiale. Par ailleurs, compte

tenu des conditions d'exploitation et de maintenance et en raison du nombre de véhicules dont dispose la ligne, on peut doubler le nombre de véhicules c'est-à-dire l'augmenter de 100 % soit 14 véhicules.

Avec ces deux scénarios, la ligne est optimale avec 14 véhicules d'une capacité de 295 places, une fréquence de passage de 5 minutes, un temps inter station de 1,2 minutes, puis un temps d'arrêt en station de 30 secondes.

#### **4.1.2.1.1.9 Calcul des coûts après optimisation**

##### **4.1.2.1.1.9.1 Le coût d'investissement après optimisation**

Suite aux résultats obtenus après optimisation, notamment sur le nombre des véhicules, on peut recalculer le coût d'investissement de la première phase. Compte tenu du coût en investissement pour un kilomètre de voie double (20 millions d'euros), une rame de tramway de 1,5 à 2,2 millions d'euros, le réseau de Valenciennes aurait dépensé pour l'investissement de la voie un montant 110 M€, pour l'acquisition de ses 14 rames un montant de 21 à 30,8 millions d'euros. En adoptant une augmentation de +50 % pour prendre en compte des éventuels frais en tout genre soit de 31,5 à 46,2 M€, la fourchette d'investissement serait entre 156,2 M€ soit une économie de 55,56 %.

##### **4.1.2.1.1.9.2 Le coût d'exploitation**

Les coûts d'exploitation diminuent presque de 35,7% sur l'ensemble du réseau pour les 14 véhicules par an, en passant de 1860,1€ à 1370,6€.

Tout compte fait, avec 14 véhicules, on économise globalement 50 % des dépenses lorsque l'exploitation de la ligne est optimale.

En réalité ce qui a coûté cher n'est pas tant l'investissement en terme de construction de la ligne du tramway de Valenciennes en voie double, mais plutôt l'aménagement des stations notamment celles qui ont été transformées en véritable centres d'échanges multimodaux qui sont hyper équipées. En effet, en raison du fait que le tramway de Valenciennes sert plusieurs communes, donc traverse inévitablement des zones à faible densité qui ne justifie pas

nécessairement l'installation d'un tramway, l'aspect économique a été pris en compte par la construction d'une voie unique lorsque le tramway sort de la zone urbaine.

#### 4.1.2.1.2 Cas de la ligne T3 du tramway de Paris

##### 4.1.2.1.2.1 Présentation du réseau de Paris

Après avoir totalement disparu en 1938 de l'agglomération Parisienne, le tramway est réapparu en juillet 1992 sur une première ligne (T1) entre Bobigny et La Courneuve sur une longueur de 9 kilomètres avec 21 stations, et 23 rames pour être prolongé quelques mois plus tard jusqu'à la gare RER de Saint Denis. Le matériel qui a été adopté est le matériel standard conçu par Alstom circulant à Grenoble ou Rouen. En 1997, l'ancienne ligne SNCF "La Défense - Issy Plaine" dont la desserte était assurée par des automotrices très anciens à captage du courant par troisième rail a été entièrement remplacée par une ligne de tramway reprenant les anciennes gares du parcours. Cette nouvelle ligne (T2) prévue pour être prolongée dans Paris en direction de la Porte de Versailles est longue de 11,3 kilomètres, comporte 13 stations et est exploitée par 12 rames d'une capacité de 178 places (offrant la possibilité d'accoupler 2 rames) dont 52 assises. La figure 4-18 montre le réseau tramway de Paris.

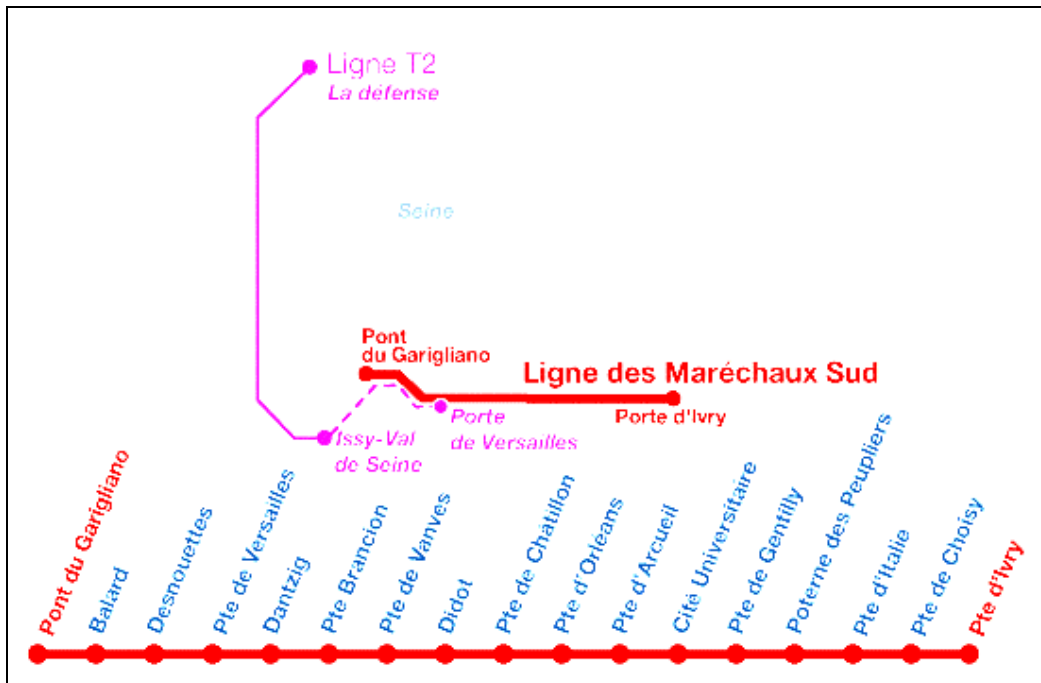


Figure 4-15 : Schéma de présentation du réseau Tramway de Paris.

Réseau de Paris			Matériel : Tramway		
Ligne	T1	T2	T3	Symbole	Total
Longueur de la ligne	12 km	11km	9 km	$L_l$	
Nombre de stations	21	13	17	$n_s$	
Nombre de rames	23	12	21	$n_v$	
Capacité d'une rame	174 (52 assises)	186 (54 assises)	230 places (90 assises)	$C$	
Vitesse commerciale	20 km/h		20 km/h	$V_{com}$	
Trafic journalier	60 000 voyageurs		85 500 voyageurs/j	$Q_{théo / j}$	
Horaires d'ouverture	De 05h 00 à 00h 00			$T_j$	
Débit horaire	3158 voyageurs		4500 voyageur	$Q_{/h}$	
Intervalle de passage	4 à 8 min	5 à ? min	4 min le matin 20 min le soir	$I_p$	
Vitesse maxi du véhicule	70 km/h			$V_v$	
Distance inter station			520 m	$d_{is}$	
Longueur du véhicule	29,4 m		48,5 m	$L_v$	
Largeur du véhicule	2,3 m		2,65 m	$\ell_v$	

**Tableau 4.11 : caractéristiques générales du réseau Tramway de Paris**

#### 4.1.2.1.2.2 Objectif de desserte

D'après les premières études, l'objectif a été tel que les stations devraient être au nombre de **22 à 27** sur l'Est et 3 à 5 sur l'Ouest selon les tracés retenus. Le nombre des stations et leur implantation proposés ont été étudiés en fonction des contraintes techniques, pour assurer tout à la fois une bonne desserte des quartiers traversés, une vitesse commerciale élevée et une bonne connexion avec les autres modes de transport public. Les stations sont distantes de **520**

m en moyenne pour permettre l'objectif d'une vitesse commerciale de **20 km/h**. Cette distance est certes supérieure à celle des stations de bus PC (**395 m**) mais l'aménagement des cheminements piétonniers et l'augmentation de la fréquence de passage (temps d'attente en station diminué) et de la vitesse commerciale améliorée de 5 km/h par rapport au bus rendent les déplacements plus confortables et plus rapides. Entre deux stations, il faut compter **un peu plus d'une minute de temps de parcours**. Ce temps de trajet est assuré de façon régulière grâce au site propre et à la priorité du tramway aux carrefours.

Les études de trafic ont montré d'ailleurs que le tramway est plus attractif que le bus : les usagers, plus nombreux, sont gagnants. L'accessibilité du tramway aux personnes à mobilité réduite a été considéré comme un objectif prioritaire, mode de transport situé en surface et d'une manière générale le plus accessible. Il s'inscrit dans le cadre du schéma directeur d'accessibilité de la voie publique aux personnes handicapées élaboré par la Ville de Paris en 2002, il est conforme aux documents législatifs et réglementaires en vigueur. Il entre également dans le cadre du contrat de plan État/Région qui prévoit un programme de mise en accessibilité des gares et stations franciliennes comportant une meilleure complémentarité entre les différents réseaux de transports en commun. Condition de l'intégration sociale des personnes handicapées, l'accessibilité des transports en commun est aussi un élément de confort pour l'ensemble de la population qui compte 30 % de personnes handicapées ou en situation de mobilité réduite.

#### **4.1.2.1.2.3 Le matériel**

Le matériel utilisé sur le T3, est le véhicule Citadis 402 d'Alstom à 4 bogies et 7 voitures comportant un plancher bas facilement accessible. Les aménagements intérieurs des rames sont conçus par des ergonomes afin que chacun puisse trouver sa place. Les quais sont au même niveau que le plancher des rames. L'écart est en principe inférieur à 3 cm lorsque la rame est en position nominale par rapport à la voie. Le réaménagement urbain des boulevards des Maréchaux comporte la mise en conformité de la voirie avec les normes d'accessibilité aux personnes à mobilité réduite. Les cheminements piétons sont plus rectilignes et dégagés d'obstacles. Les traversées piétonnes sont perpendiculaires aux trottoirs. Ceux-ci sont abaissés, des bandes de guidage sont créées. Des places "Grands invalides" sont aménagées, à raison d'une place sur cinquante. Les zones de concession des commerces sont matérialisées sur la



chaussée afin d'éviter les entraves à la circulation piétonne. La mise aux normes PMR des traversées piétonnes a permis en même temps de sécuriser les traversées des enfants.

Enfin, l'accessibilité ne se mesure pas exclusivement à l'inter-distance entre les arrêts. L'inter distance la plus longue à parcourir à pieds pour atteindre un arrêt passe de 150 m à 220 m, mais la régularité et la vitesse du tramway permettent un temps global de parcours plus réduit.

La qualité des aménagements urbains (limitation des mobiliers de voirie, amélioration des traversées piétonnes...) apportent un plus indéniable en terme d'accessibilité. La réorganisation du réseau de bus a été menée afin de faciliter les correspondances entre RER, métro, bus et tramway, en particulier aux portes principales de Paris ; ce qui fait du tramway T3, une ligne structurante. Enfin, les services de bus de proximité appelés Traverses ont été développés sur le principe de la traverse de Charonne créée en 2004, avec Alésia Montsouris mise en service en 2005 et enfin de la Traverse sur les 18<sup>ème</sup> et 19<sup>ème</sup> arrondissements.

#### **4.1.2.1.2.4 Taux de correspondance**

Le tramway T3 offre une possibilité de rabattement efficace sur le réseau Métro lourd, contribuant ainsi à l'amélioration des correspondances et au maillage du réseau. Le tramway T3 a également permis l'optimisation des correspondances (emplacement des stations du tramway) et le traitement des cheminements jusqu'aux stations métro et RER. La création de nouveaux accès ou de couloirs de correspondance a pu également être étudiée dans certains cas particuliers. Il existe également 33 correspondances avec les lignes de bus de banlieue.

#### **4.1.2.1.2.5 Requalification urbaine**

Le T3 a constitué un accélérateur de rénovation urbaine des quartiers périphériques de Paris et de sa proche couronne. À l'heure actuelle, le cadre de vie sur les boulevards des Maréchaux, notamment à l'Est, a été remis en l'état. Les riverains qui souffraient de l'insécurité due à la circulation routière et de la pollution atmosphérique et sonore vivent aujourd'hui dans un environnement urbain plus paisible et plus harmonieux. Dans le même temps, de nombreuses opérations d'urbanisme ont été réalisées à Paris et dans les communes limitrophes. Les aménagements liés au tramway T3 ont participé à la refonte du paysage urbain en faisant des

Maréchaux un boulevard urbain accueillant un trafic de desserte plus locale plutôt qu'une annexe du périphérique. Leur trame végétale a été renforcée pour leur donner une image plus proche de la couronne verte voisine. Les particularités des portes de Paris seront mises en valeur afin que les entrées de la capitale deviennent plus remarquables.

Le projet a permis une couture urbaine atténuant l'effet de barrière des Maréchaux par l'aménagement de franchissements sécurisés et des traitements paysagers. L'histoire des Maréchaux qui peu à peu a généré un espace déshumanisé et occupé par la voiture en créant une coupure forte entre Paris et sa banlieue s'est aujourd'hui améliorée localement, en embellissant le cadre de vie des boulevards et en facilitant la vie quotidienne, les travaux réalisés ont réduit cet effet de coupure [AU CAHIER D'ACTEURS N°12].

#### 4.1.2.1.2.6 Optimisation

Le tramway T3 entièrement sur la commune de Paris est un cas particulier en ce qu'il met en exergue la difficulté de marier la régularité de la circulation avec l'objectif de maximiser le débit horaire théorique dans un contexte de trafic donné pour un objectif de vitesse commerciale donnée.

En effet, le choix du tramway T3 a été adopté parce que le trafic journalier de la ligne de bus articulés PC 2 atteignait 50 000 personnes/jour. À l'heure de pointe la plus chargée, entre 8 h et 9 h, on comptait 4 900 personnes par heure. La capacité du bus PC était limitée du fait du nombre de passagers possibles par véhicule (100 personnes maximum). Les arrêts non équipés présentaient une gêne à la montée et à la descente. Une augmentation de la fréquence a même révélé son inefficacité : expérimentée lors de l'enquête publique pour le premier tronçon du tramway, elle aboutissait à la formation de "trains d'autobus" (lorsque les bus sont nombreux à se suivre, leur vitesse diminue, et cela désorganise leurs intervalles de passage) du fait des encombrements générés.

Sachant que le débit horaire est  $Q = 4500 \text{ pass} / h$  et la capacité est  $C = 230 \text{ pass}$ , on déduit la

fréquence théorique  $f$  de la ligne d'après l'équation

$$Q = C.f \quad \text{Eq : 3.1,}$$

$$Q = C.f \rightarrow f = \frac{Q}{C}$$

$$AN: f = \frac{4500}{230} = 19,56 \approx 20/h$$

Ce résultat égal à 20/h suppose qu'il est théoriquement possible pour un véhicule de faire 20 rotations par heure soit un intervalle de passage de 3 minutes. On rappelle que cela n'est possible qu'à condition d'avoir un site entièrement propre.

Toutefois, appliquons le premier scénario en fixant la capacité à 230 places et cherchons à augmenter la fréquence.

$$Sc N^{\circ}1: \begin{cases} C = 245 \text{ pass} \\ f = ? \end{cases}$$

L'intervalle réel de passage de la ligne étant  $i_p = 4 \text{ min}$ , si on diminue  $i_p$  et compte tenu de la remarque précédente, on choisira un intervalle de passage de 3 minutes ; ce qui permet d'avoir une fréquence d'après la relation,

$$f = \frac{1}{i_p} = \frac{1}{3h/60}$$

$$AN : f = 20/h$$

Avec ce résultat égal à 20/h, la fréquence initiale n'augmente presque pas, puisque en reportant cette valeur dans l'équation Eq:3.1, on obtient une légère augmentation du débit horaire théorique de 100 places soit 4600 passagers/heure.

Appliquons le deuxième scénario en augmentant la capacité par exemple de + 26 % soit 290 places et maintenons la fréquence à la valeur de départ égale à 20/h.

$$Sc N^{\circ}2: \begin{cases} C = 290 \text{ pass} \\ f = 20/h \end{cases}$$

En reportant cette nouvelle valeur de la capacité dans l'équation Eq:3.1, on obtient un débit de 5800 passagers par heure soit une augmentation de + 28 %. D'après ce deuxième résultat, le

premier scénario donne un débit horaire d'environ de moins 26 %. Alors, on remarque que l'application du premier scénario ou du second scénario augmente le débit horaire différemment.

Mais, en raison d'un intervalle de passage égal de 4 minutes en heure de pointe et de 20 minutes le soir malgré l'importance du trafic, connaissant ensuite le débit horaire initial, on sous-entend que la zone géographique du réseau est pas fortement peuplée. Il s'avère de cet fait, impératif d'augmenter la capacité des rames afin d'optimiser le trafic journalier de la ligne de transport. Or l'augmentation de la capacité des véhicules peut s'accompagner de l'augmentation des temps d'arrêt en station ; ce qui supposerait par conséquent une augmentation du temps de parcours total.

Mais l'hypothèse d'augmentation du temps de parcours se couple très mal avec l'objectif de garder fixe la vitesse commerciale à 20 kilomètres par heure. Pour cela, il convient de chercher un nombre idéal de véhicules qu'il faudrait faire circuler avec l'idée d'augmenter la vitesse inter station afin de maintenir la vitesse commerciale moyenne à 20 kilomètres par heure. Ainsi, à l'aide de l'équation

$$f = n_v \frac{V_{com}}{L_l} \quad Eq: 3.1.2 \quad [1/h] \quad ,$$

on, déduit le nombre de véhicules sur la ligne

$$\rightarrow n_v = \frac{f \cdot L_l}{V_{com}} = 20/h \cdot \frac{9km}{20km/h}$$

$$AN : n_v = 9$$

Ce résultat égal à 9 indique qu'on a exactement 1 véhicule au kilomètre sur chaque ligne toutes les 3 minutes. Mais d'après le deuxième scénario et en tenant compte de l'intervalle réel de passage, on peut diminuer le nombre de véhicules et augmenter la capacité des véhicules à 290 places.

Prenons pour cela 7 véhicules par exemple d'une capacité de 290 places, puis un intervalle de passage de 4 minutes. On peut trouver la nouvelle fréquence théorique à l'aide de la formule :

$$f = n_v \frac{V_{com}}{L_l} \quad Eq : 3.1.2 \quad [1/h]$$

$$= 7 \cdot \frac{20km/h}{9km}$$

$$AN : f = 15,55 \approx 16/h$$

Puis le débit d'après la formule

$$Q = C.f \quad Eq : 3.1$$

$$= 290 \text{ pass.} \cdot 15/h$$

$$AN : Q = 4640 \text{ pass/h}$$

Ce résultat augmente le débit initial d'environ + 3 % mais, l'intervalle de passage correspondant à cette fréquence est de 3,75 minutes inférieur à 4 minutes. On remarque d'après cette analyse que pour garder un débit horaire supérieur à 4500 passagers par heure et par sens, tout en ramenant le nombre de véhicules à 6 pour avoir une fréquence limite de rotation de 15/h, correspondant à 4 minutes, il faut nécessairement augmenter la capacité des véhicules à 360 places par exemple.

**En conclusion**, après analyse, nous estimons qu'une exploitation du tramway T3 de Paris serait optimale pour améliorer son trafic journalier avec 6 véhicules d'une capacité de 360 places avec une fréquence de 14/h correspondant à environ 4,30 minutes en heure de pointe.

## 4.1.3 L'exemple du Bus à Haut Niveau de Service

### 4.1.3.1 Présentation sommaire de Curitiba

Curitiba est une grande ville du Brésil et la capitale de l'État du Paraná située à 909 m d'altitude, sur le piémont de la Serra do Mar, à une centaine de kilomètres du port de Paranaqua. Sa position géographique est de 25.42° Sud, et 49.29° Ouest. Sa population est de 1 757 904 habitants au recensement de 2005, soit de + 48 % supérieure à celle de Lyon (1 186 605 en 1999), avec une superficie de 434,97 km<sup>2</sup> comprise entre celles de Saint Etienne

(443 km<sup>2</sup> soit -1,8 %) et Strasbourg (304 km<sup>2</sup> soit +43 %). Cette population en forte croissance : elle a été multipliée par trois en l'espace de 25 ans. Depuis une trentaine d'années, la municipalité de Curitiba a engagé un projet de développement urbain dont certains aspects ont été présentés comme des exemples à travers le monde entier. En juin 1996, au deuxième sommet mondial des maires et urbanistes qui s'est tenu à Istanbul, Curitiba a été récompensée comme la cité la plus innovante au monde. Le système de transport a également été récompensé par l'English Building and Social Housing Foundation (EBSHF). Les principaux axes d'innovation ont été la politique de transports, les actions en faveur de l'emploi, l'amélioration du cadre de vie et la formation des acteurs. La ville a souhaité allier croissance économique, développement social et protection de l'environnement et définir des actions dans l'esprit d'un développement durable.

#### 4.1.3.1.1 Présentation du réseau de transport

Le premier axe du programme a été celui des transports urbains : l'objectif était de développer l'utilisation des transports en commun afin d'améliorer la circulation dans la ville. La figure ci-dessous montre le réseau d'autobus de la ville de Curitiba.

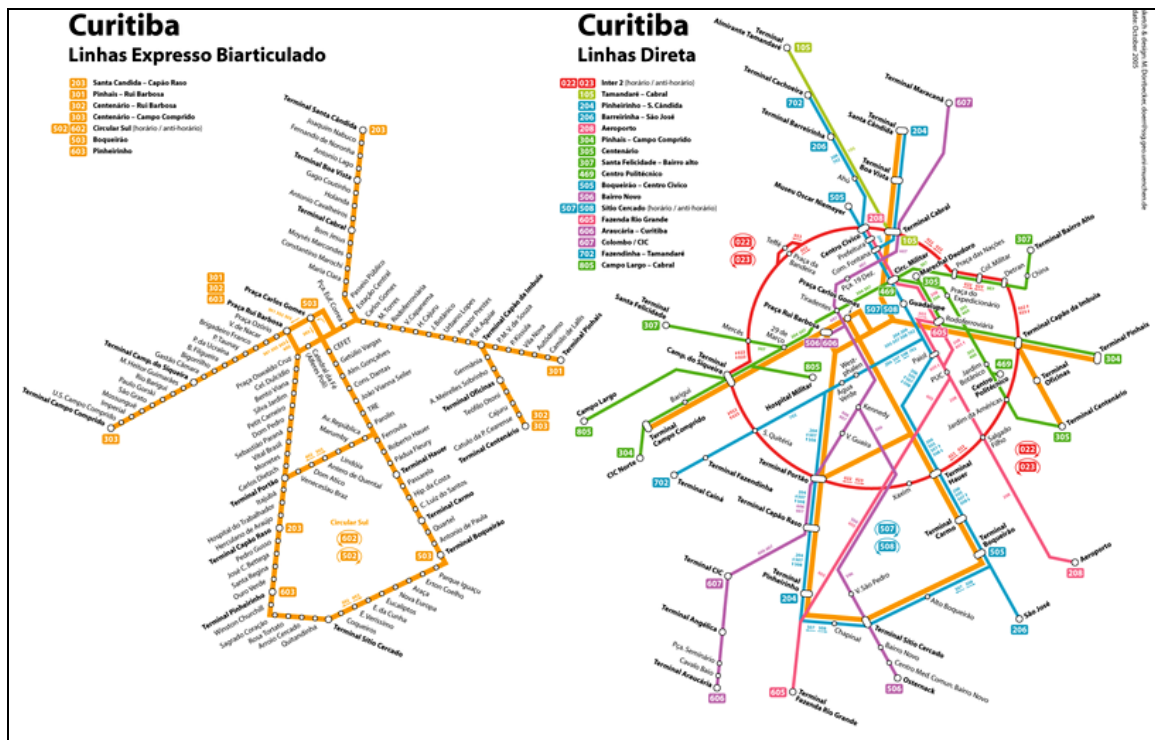


Figure 4-16 : Schéma de présentation du réseau BHNS de CURITIBA

Le réseau d'autobus se présente comme une toile d'araignée. Le Système intégré de transports comprend 221 stations -tubes dont 25 de correspondance, réparties sur 340 lignes, longues au total de 1100 km dont 60 km de voies réservées utilisées par 1902 bus parcourant 316 000 km et transportant 1,9 million de passagers par jour. Plus de 85 % des habitants utilisent les transports en commun. Le Système intégré utilise également 28 lignes scolaires, avec des bus dédiés. Une enquête de satisfaction de URBS donne plus de 89 % de taux de satisfaction. Le réseau est organisé en lignes express de couleur orangée sur la carte réseau, lignes principales en rouges sur la carte réseau et lignes inter- districts pour les autres couleurs. Le remplacement fréquent des vieux bus, qui fonctionnent au diesel, limite les émissions de dioxyde de carbone. On note que les lignes de Bus à Haut Niveau de Service, ont permis le passage d'un réseau presque maillé au départ, à un réseau basé sur des lignes structurantes à Curitiba.

Plusieurs facteurs ont contribué à rendre l'utilisation du bus particulièrement attrayant. D'abord, l'implantation de commerces et de services publics à proximité de chaque terminal, dans ce que l'on appelle les rues de la citoyenneté. Les promoteurs du projet ont aussi veillé à la qualité du service pour les utilisateurs : des abribus élégants, où l'on se procure le ticket (cela réduit le temps d'attente du bus). Le prix du ticket couvre l'ensemble des coûts, à l'exception des infrastructures, que la municipalité prend en charge. Cela a engendré un fort accroissement du nombre d'utilisateurs des autobus : 1,2 voyage par jour et par habitant, contre 0,7 auparavant. Cependant, le trafic automobile s'étant fortement développé, la circulation des autobus est maintenant ralentie. Des solutions sont recherchées pour améliorer la vitesse de déplacement des autobus et inciter un plus grand nombre d'habitants à utiliser les transports publics.

La Ville a engagé des actions dans d'autres domaines : développement des espaces verts et création de rues piétonnes. Par ailleurs, pour contribuer à la formation continue de différents publics, la municipalité a créé l'Université libre de l'Environnement. L'objectif visé est de diffuser les connaissances et les pratiques environnementales et faciliter des comportements plus respectueux de l'environnement. Les actions engagées à Curitiba peuvent aider les autres villes d'Amérique latine, mais aussi du reste du monde, à dégager des pistes d'actions pour contribuer à un développement plus durable.

#### **4.1.3.1.2 Planification depuis trente ans**

En 1971 il y eut la création des premières rues piétonnes du Brésil, mais le point central était bien entendu le succès du réseau de transports en commun : un service offert satisfaisant pousserait les habitants, les commerces et les entreprises à s'installer le long des axes prévus ; l'étalement urbain serait limité ; le développement de la ville contrôlé.

Dans les transports urbains, plusieurs tâtonnements ont été nécessaires afin de parvenir à un système de transport en commun comparable à un métro de surface. Tout d'abord, un seul ticket permet à quiconque de se rendre n'importe où dans l'agglomération. Les correspondances sont donc illimitées. Au départ, la municipalité avait mis en place un système visant à diminuer les retards dus aux paiements lors des correspondances, et introduit une contre marque de correspondance. Mais au bout de 7 mois, la fraude se révélant importante sur ces marques en papier, la municipalité introduisit un double tarif, un pour les lignes express, et un pour les lignes reliant ces lignes express à la périphérie. Ce tarif fut abandonné au bout de 18 mois, car il favorisait les plus riches, vivant près du centre et ne payant qu'un ticket un peu plus cher, contre deux pour les plus pauvres vivant plus loin. Les bus reliant la périphérie au centre sont donc devenus gratuits, ce qui transforma les bus en *dortoirs à clochards*, et suscita donc des plaintes. Le retour au tarif unique, avec une séparation entre les bus de périphérie et bus express, fut un succès. Mais ce succès plus la popularité des nouvelles lignes express, provoqua une croissance extraordinaire de la fréquentation et les bus devinrent rapidement très sales. Les chauffeurs de bus étaient également tentés de faire des excès de vitesse afin de rattraper le temps perdu aux arrêts.

Les compagnies desservant les quartiers éloignés se retrouvaient de fait à transporter des clients qui avaient payé leur ticket à une compagnie parfois concurrente. En 1987, la municipalité a dû mettre en place un système de compensation basé sur le nombre de kilomètres parcourus par les véhicules et leur type.

#### **4.1.3.1.3 L'invention du métro de surface**

En 1980, après avoir essayé toutes les formules de tarif, la municipalité conclut que le problème ne venait pas des tarifs, mais de la formule même du bus classique. Elle créa donc les stations de correspondance, avec l'intention d'en faire des stations de métro de surface. Ces



stations furent équipés de cabines de téléphone et pourvus de kiosques à journaux et de boutiques de fleuristes.

Un nouveau système de paiement fut introduit à cette occasion. Les passagers purent acheter leurs titres en métal dans les boutiques et les kiosques à journaux, ou les payer en monnaie dans les stations avant de monter dans le bus. Ce système permit de gagner tout le temps passé par les chauffeurs de bus à encaisser les paiements. Cela permit également aux chauffeurs de mieux gérer leur vitesse, aidés en cela par des systèmes de contrôle de vitesse.

Le point final de la réalisation des stations fut l'invention des tubes d'embarquement. Au départ, la municipalité cherchait à limiter la fraude. Les bus furent tous construits avec deux portes pour la descente et une porte d'embarquement à l'avant. Pour augmenter le confort, la rapidité du temps d'embarquement et limiter la fraude, des tubes d'embarquement furent conçus par la ville : ils possèdent un plancher de plein pied avec le plancher des bus et des portes automatiques actionnées par un gardien de tube situées en face des portes des bus. Les passagers montants paient avant d'entrer dans le tube, les passagers descendants passent par une sortie directe.

Le réseau comprend des lignes de centre ville, périphériques, de quartier, inter -districts, express, de nuit, scolaires. Chaque bus est peint aux couleurs de la ligne, qui est la même sur les plans disponibles dans les stations. Les bus desservant les quartiers périphériques sont peints en orange, quel que soit le quartier ou la compagnie. Les bus sont parfois dotés d'une ou de deux articulations, ce qui leur permet d'emporter de 170 à 270 passagers. De plus leur design extérieur et les aménagements intérieurs sont loin des clichés que l'on connaît des bus d'Amérique du Sud.

## 4.2 Conclusion du chapitre 4

L'appréhension de la difficulté d'appliquer convenablement notre modèle varie d'un site à un autre. Au premier chef de ces difficultés existe le maillage (plan) de la ville dont une lecture visible se fait à travers le réseau de transports en commun urbains.

Dans ce chapitre, l'exemple du réseau de Lille en Y impose deux intervalles de passages différents avec une condition posée sur le tronçon commun à pouvoir alimenter les différentes branches.

Le réseau de Nantes se présente comme un cas assez classique ne présentant pas trop d'inconvénients, tandis que celui du T3 de Paris montre toute la difficulté liée à une insertion des nouveaux modes de transports en commun dans le trafic existant. Le cas de Valenciennes est également particulier pour son coût de réalisation relativement faible en raison des choix technologiques très économiques. Enfin l'exemple de Curitiba nous a permis de montrer qu'il existe des solutions économiques et efficaces applicables plus volontiers immédiatement dans les pays en voies de développement.

# APPLICATION DU MODELE ET RESULTATS

## DEMARCHE

- Description du phénomène étudié
  - Modèle de représentation du fonctionnement d'une ligne de transport en commun en site propre
- Intérêt pour la satisfaction des trois acteurs
  - Le décideur
  - L'opérateur
  - L'utilisateur
- Analyse selon les contraintes du système

## I - DESCRIPTION DU PHENOMENE ETUDIE

### PRESENTATION DES DONNEES DU PROBLEME

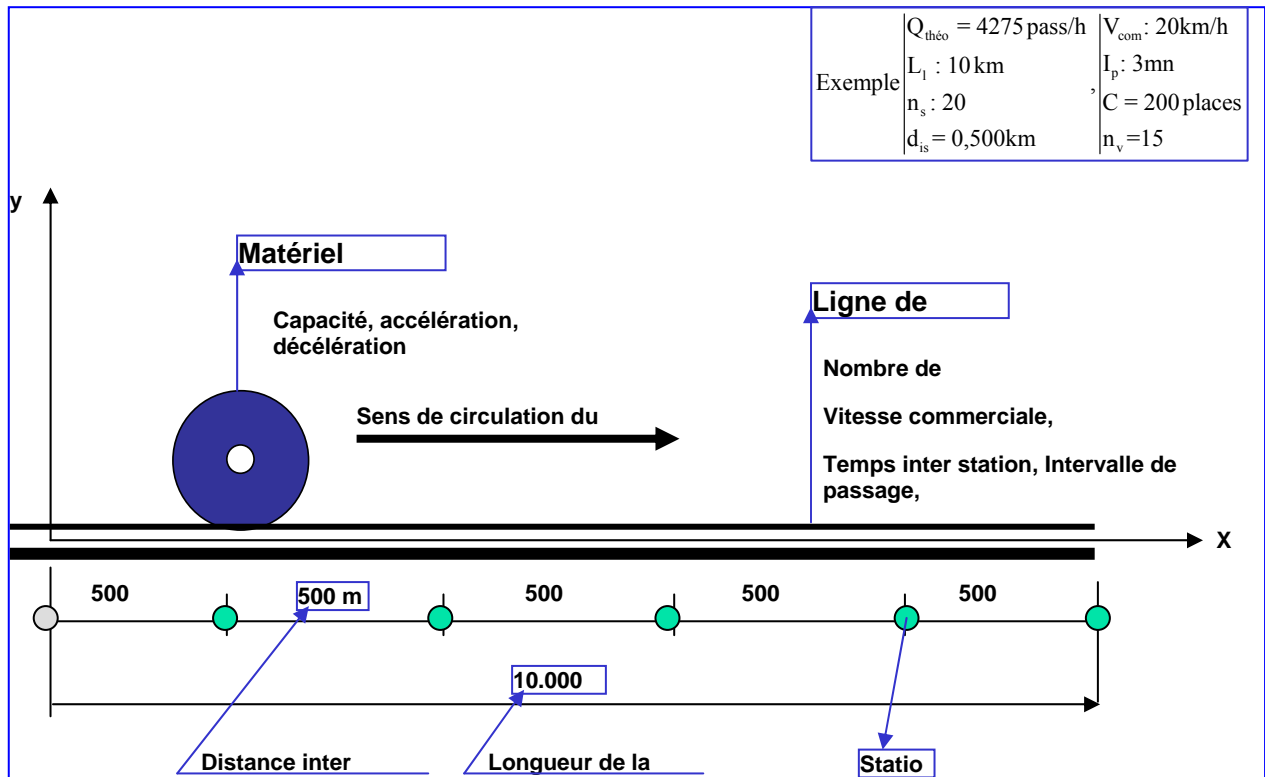
Les différentes données sont :

Données physiques de la ligne:  $\left. \begin{array}{l} L_1 \\ n_s \end{array} \right\} \rightarrow d_{is}$

Données du matériel roulant :  $\left. \begin{array}{l} \text{géométriques} \\ \text{mécaniques} \end{array} \right\} \begin{array}{l} L_v \rightarrow S(C) \\ l_v \\ a \text{ accélération} \\ d \text{ décélération} \\ V_n \text{ vitesse normale} \end{array}$

Données d'exploitation :  $\left. \begin{array}{l} \text{physiques} : n_v \\ \text{mécaniques} : V_{com}, f \\ \text{temporelles} : T_{is}, I_p, T_s \end{array} \right\}$

## ILLUSTRATION DU FONCTIONNEMENT D'UNE LIGNE DE TRANSPORT EN COMMUN



## INTERET POUR LA SATISFACTION DES TROIS ACTEURS

### DEFINITION FORMELLE

Traduction physique du problème = conflit d'intérêt

Acteur N°1= l'opérateur → minimiser l'exploitation

Acteur N°2= l'utilisateur → se déplacer le plus rapidement possible

Acteur N°3= le décideur → trouver le juste équilibre

## II - MODELISATION MATHEMATIQUE

### ENGAGEMENT DE L'OPERATEUR

L'opérateur doit assurer un débit contractuel dont l'expression mathématique est:

$$Q_{\text{théo}} = C \cdot f$$

C = capacité du véhicule  
f = fréquence de passage

### IMPERATIF DE L'USAGER

La préoccupation de l'usager à avoir une vitesse élevée est prise en compte dans la relation :

$$Q_{\text{théo}} = C \cdot n_v \cdot \frac{V_{\text{com}}}{L_1}$$

C = capacité du véhicule  
 $n_v$  = nombre de véhicules  
 $V_{\text{com}}$  = vitesse commerciale  
 $L_1$  = longueur de la ligne

### Décomposition du temps porte à porte

$$T_{\text{pp}} = T_{\text{md}} + T_{\text{a}} + T_{\text{p}} + T_{\text{ma}}$$

$T_{\text{pp}}$  = Temps porte à porte  
 $T_{\text{md}}$  = Temps de marche au départ  
 $T_{\text{a}}$  = Temps d'attente à l'arrêt  
 $T_{\text{p}}$  = Temps de parcours dans les TC  
 $T_{\text{ma}}$  = Temps de marche à l'arrivée

$T_{\text{md}}$  et  $T_{\text{ma}}$  sont directement liés | la topographie du site  
| la densité de la population  
 $T_{\text{a}}$  est directement lié à la fréquence de passage  
 $T_{\text{p}}$  est directement lié à la vitesse commerciale

## ARBITRAGE

L'arbitrage à trouver le juste équilibre entre l'opérateur et l'utilisateur est traduit par l'équation :

$$Q_{\text{théo}} = C \cdot n_v \cdot \frac{1}{n_s (T_{is} + T_s)}$$

C = capacité du véhicule  
 $n_v$  = nombre de véhicules  
 $n_s$  = nombre de stations  
 $T_{is}$  = le temps inter station  
 $T_s$  = le temps d'arrêt en station

### III - ANALYSE SELON LES CONTRAINTES DU SITE

Recherche d'équilibre → 

- comparaison des paramètres
- analyse avec plusieurs possibilités

### DIFFERENTES POSSIBILITES

#### POSSIBILITE N° 1

Analyse du produit $C \cdot n_v$ Pour $Q_{\text{théo}}$ donné	$Q_{\text{théo}} = C \cdot n_v \cdot \frac{1}{n_s (T_{is} + T_s)}$
<div style="margin-left: 40px;">Si C augmente → <ul style="list-style-type: none"><li><math>n_v</math> diminue</li><li>f diminue</li></ul></div> <div style="margin-left: 80px;">Sur le terrain → <ul style="list-style-type: none"><li><math>T_a</math> augmente</li><li>des stations plus longues</li><li><math>T_s</math> risque d'augmenter</li></ul></div> <div style="margin-left: 80px;">Conclusion → <ul style="list-style-type: none"><li>l'opérateur est satisfait</li><li>l'utilisateur est moins content</li></ul></div>	

## POSSIBILITE N° 2

Analyse du terme $1/n_s$ Pour $Q_{théo}$ donné	$Q_{théo} = C.n_v \cdot \frac{1}{n_s (T_{is} + T_s)}$
<p>Si <math>n_s</math> diminue <math>\rightarrow</math> <math>\left\{ \begin{array}{l} V_{com} \text{ augmente} \\ f \text{ diminue} \end{array} \right.</math></p> <p>Sur le terrain <math>\rightarrow</math> <math>\left\{ \begin{array}{l} d_{is} \text{ augmente} \\ T_{md} \text{ augmente,} \\ T_a \text{ augmente} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} T_{ma} \text{ augmente} \\ T_p \text{ diminue} \\ \text{moins des stations} \end{array} \right.</math></p> <p>Conclusion <math>\rightarrow</math> <math>\left\{ \begin{array}{l} \text{l'opérateur est satisfait} \\ \text{la satisfaction de l'utilisateur est à nuancer selon} \\ \quad \bullet \text{ la distance par rapport aux stations} \\ \quad \bullet \text{ l'homogénéité de la densité de la population} \end{array} \right.</math></p>	

## POSSIBILITE N° 3

Analyse du rapport $1/(T_{is} + T_s)$ Pour $Q_{théo}$ donné, $T_{is}$ supposé constant	$Q_{théo} = C.n_v \cdot \frac{1}{n_s (T_{is} + T_s)}$
<p>Si <math>T_s</math> augmente <math>\rightarrow</math> <math>\left\{ \begin{array}{l} V_{com} \text{ diminue} \\ f \text{ augmente} \end{array} \right.</math></p> <p>Sur le terrain <math>\rightarrow</math> <math>\left\{ \begin{array}{l} T_p \text{ augmente} \\ T_a \text{ diminue} \\ \text{confort de l'utilisateur est amélioré} \end{array} \right.</math></p> <p>Conclusion <math>\rightarrow</math> <math>\left\{ \begin{array}{l} \text{relative satisfaction de l'utilisateur} \\ \text{l'opérateur a intérêt à diminuer } T_s, \text{ mais il doit alors équiper les stations} \end{array} \right.</math></p>	

## DECOMPOSITION DU TEMPS INTER STATION

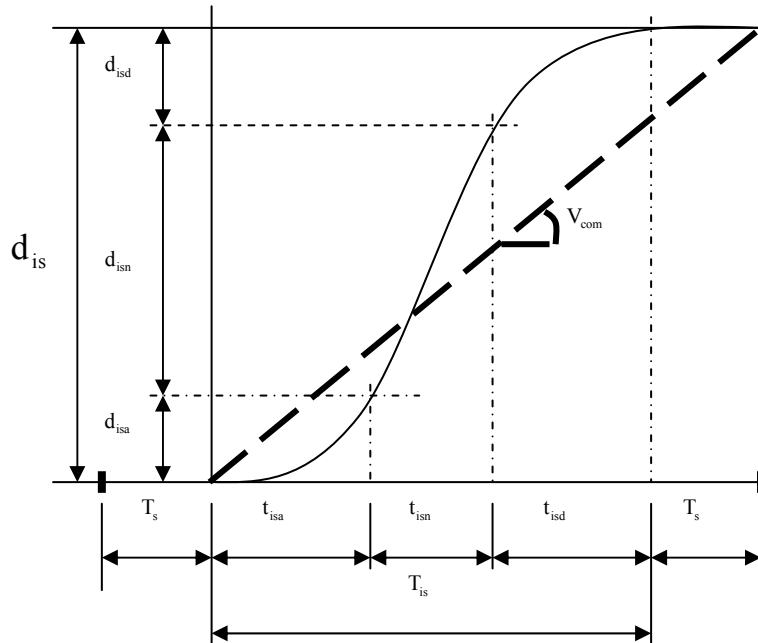
$$Q_{\text{théo}} = C \cdot n_v \cdot \frac{1}{n_s (T_{is} + T_s)}$$

Analyse du rapport  $1/(T_{is} + T_s)$   
 Pour  $Q_{\text{théo}}$  donné,  
 $T_s$  supposé constant

$$T_{is} = t_{isa} + t_{isn} + t_{isd}$$

$$T_{is} + T_s = T_{pis}$$

$$\rightarrow V_{com} = \frac{d_{is}}{T_{pis}}$$



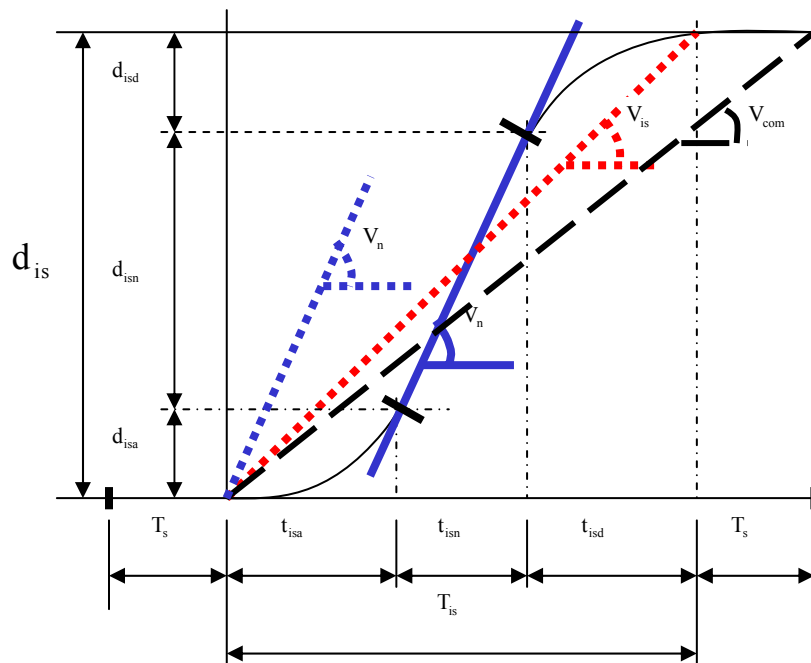
## DIAGRAMME DES VITESSES

$$V_{is} = \frac{d_{is}}{t_{isa} + t_{isn} + t_{isd}}$$

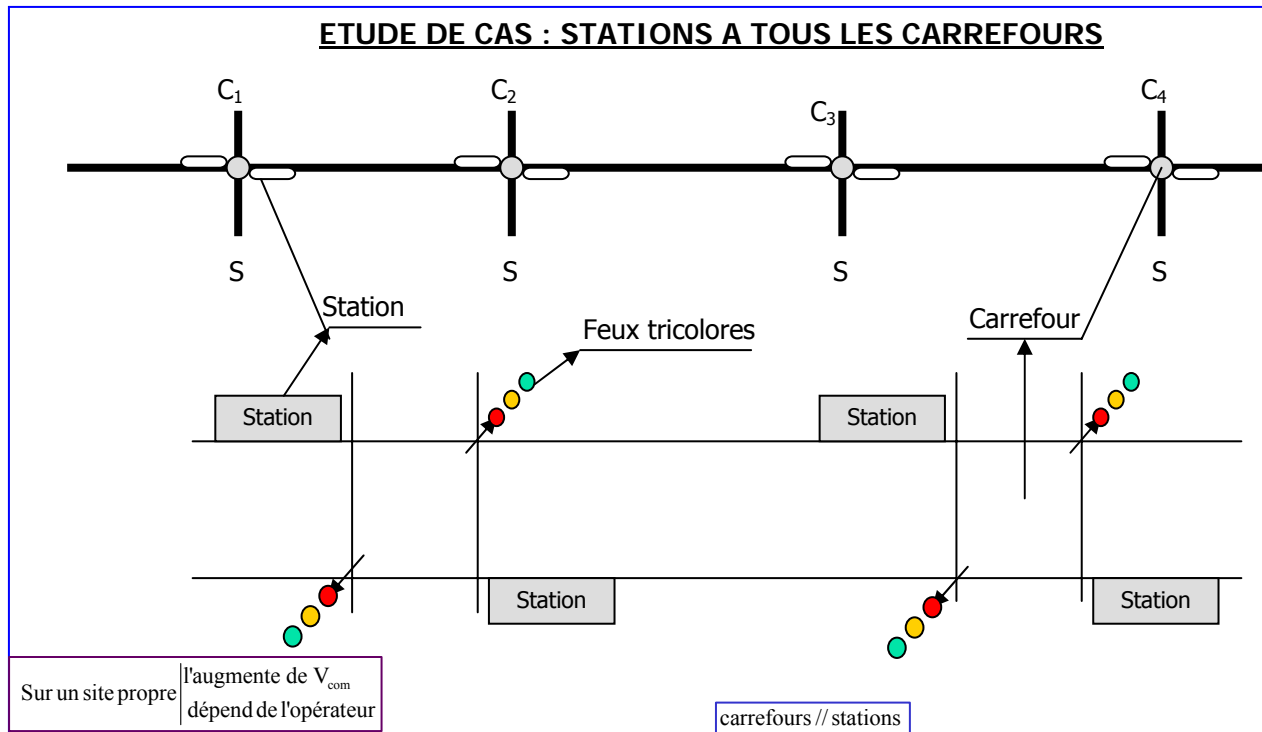
1er cas: site propre

$$V_{com} < V_{is} < V_n$$

$$t_{isn} = T_{is} - (t_{isa} + t_{isd})$$







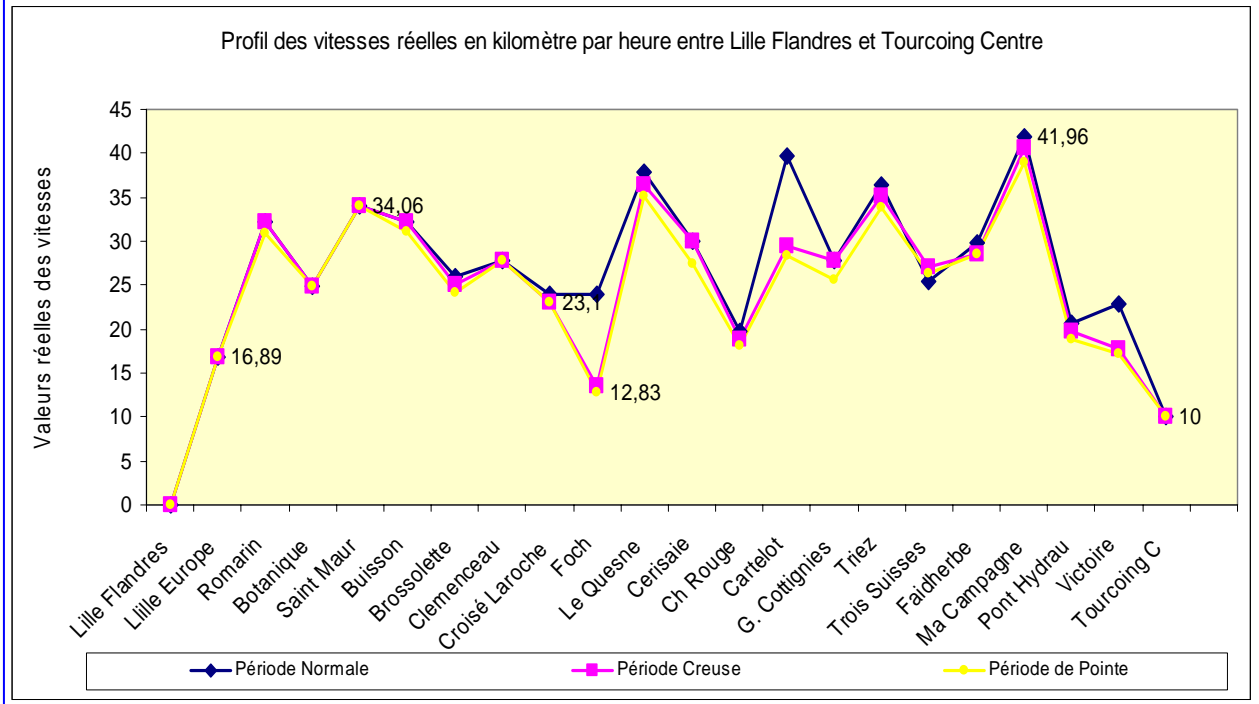
**COMMENTAIRES : CAS D'UN SITE PROPRE**

∇ la nature du site  $V_{com} < V_{is} < V_n$

Or si  $|d_{is}$  élevée et  $\begin{cases} t_{isa} < t_{isn} \\ t_{isd} < t_{isn} \end{cases} \rightarrow t_{isa} + t_{isd} < t_{isn}$

Conclusion  $V_{is} \approx V_n$

## DIAGRAMME DES VITESSES : CAS DU TRAMWAY DE LILLE T



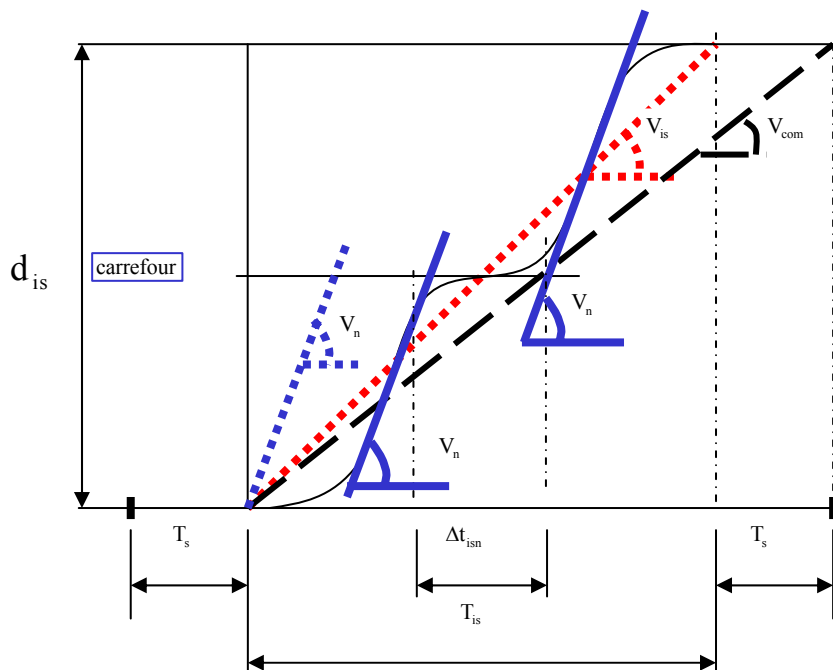
## DIAGRAMME DES VITESSES

$$V_{is} = \frac{d_{is}}{t_{isn} + t_{isn} + \Delta t_{isn} + t_{isd}}$$

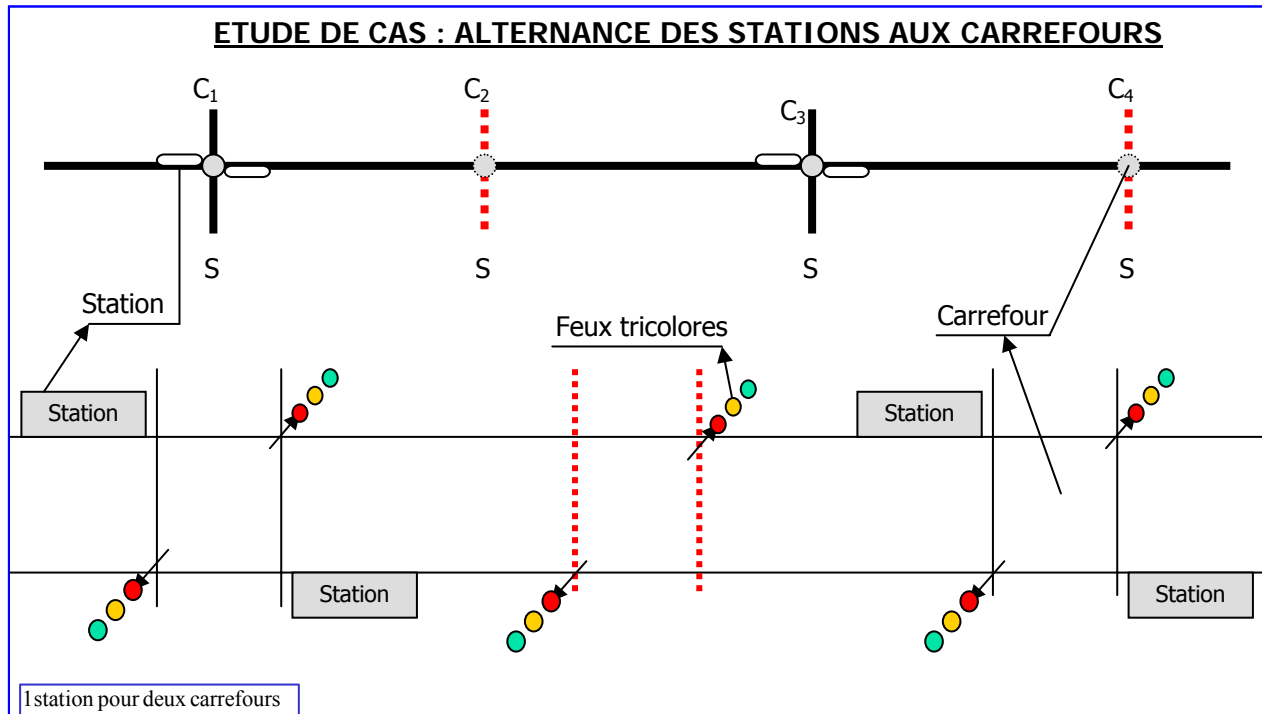
2ème cas: site partagé

$$V_{com} < V_{is} < V_n$$

$$t_{isn} + \Delta t_{isn} = T_s - (t_{isa} + t_{isd})$$



### ETUDE DE CAS : ALTERNANCE DES STATIONS AUX CARREFOURS



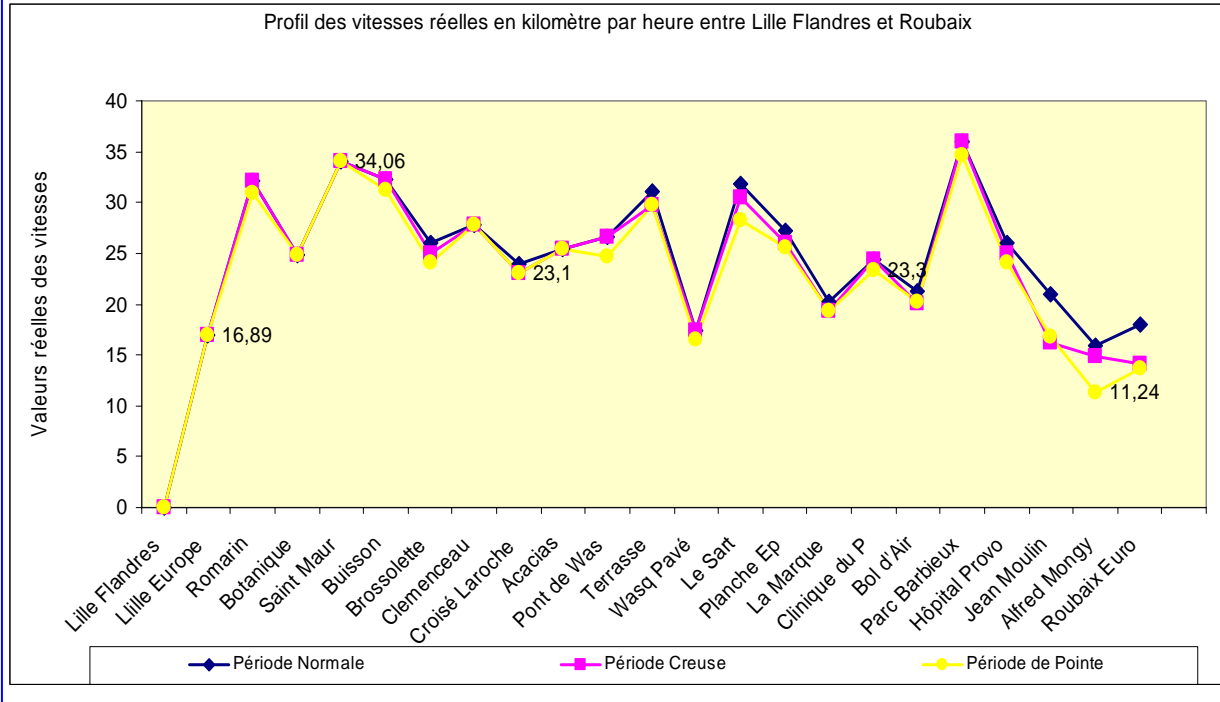
### COMMENTAIRES : CAS D'UN SITE PARTAGE

$\forall$  la nature du site  $V_{com} < V_{is} < V_n$

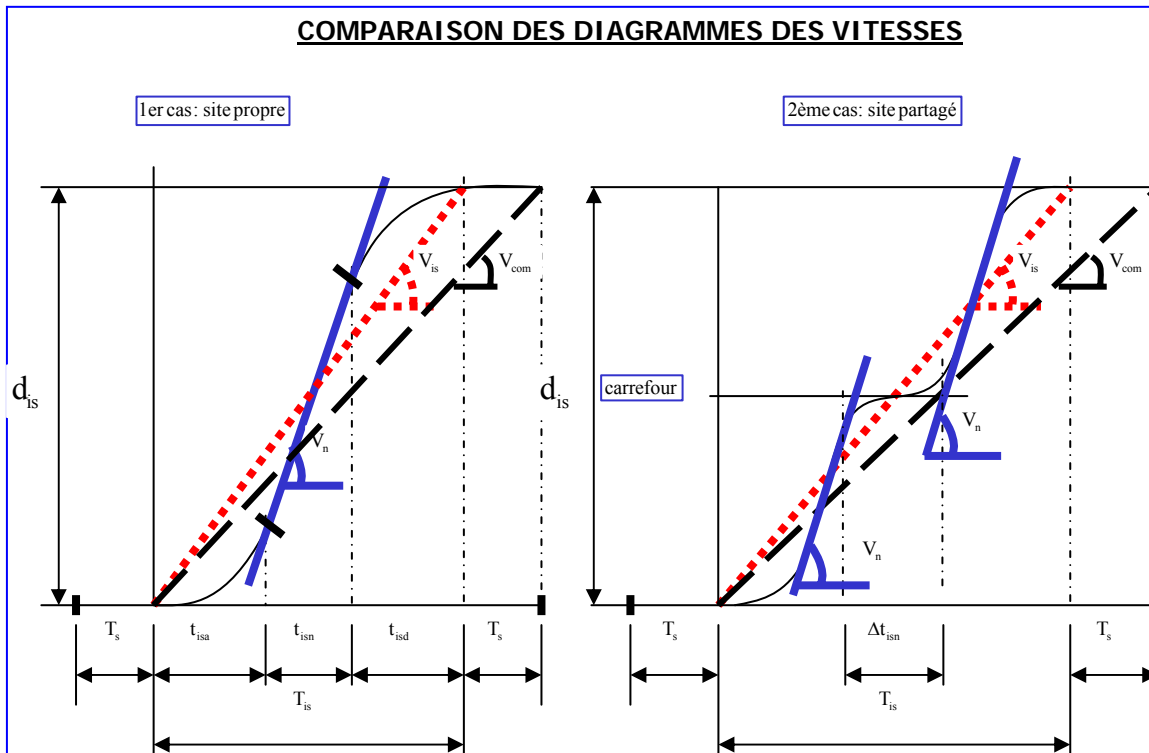
Mais si  $|d_{is}$  faible  $\rightarrow \begin{cases} t_{isa} < t_{isn} \\ t_{isd} < t_{isn} \end{cases} \rightarrow t_{isa} + t_{isd} < t_{isn} + \Delta t_{isn}$

Conclusion  $V_{com} \approx V_{is}$

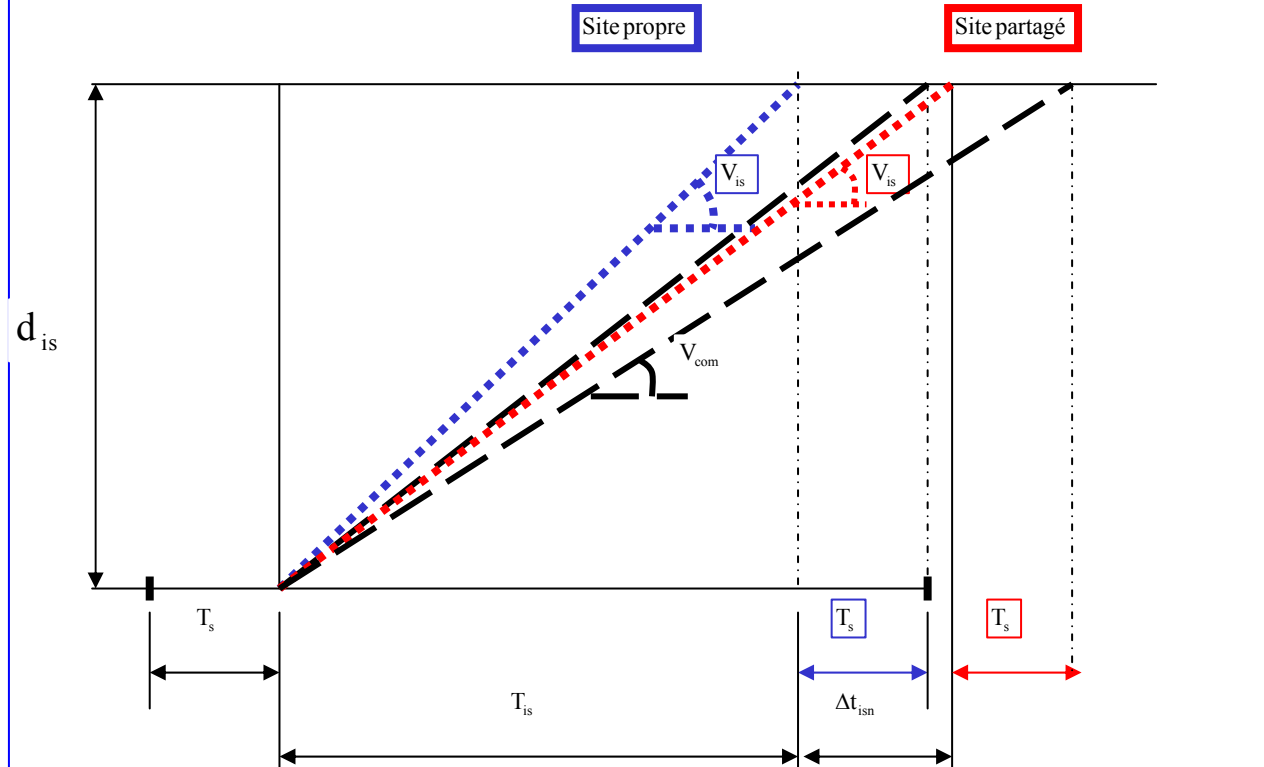
## DIAGRAMME DES VITESSES : CAS DU TRAMWAY DE LILLE R



## COMPARAISON DES DIAGRAMMES DES VITESSES



# COMPARAISON DES DIAGRAMMES DES VITESSES



## Conclusion générale

Ce travail est une contribution à l'amélioration du rendement des transports en commun urbains. En ce sens, on propose la mise au point d'un outil d'analyse permettant de faire une optimisation technique et économique basée sur les différentes performances techniques des véhicules de modes utilisés, capable de s'appliquer à tout type de ville quelque soit son histoire, son époque et à tout type de réseau de transport en commun quelque soit le contexte urbain

En effet, si la plupart des instances nationales et internationales préconisent pourtant une politique volontariste en faveur des transports en commun alors que la croissance du parc automobile se poursuit dans tous les pays, c'est que de fait, les avantages qu'apporte l'automobile ne sont pas encore réellement éclipsés par ceux des transports en commun. Ainsi en témoignent les statistiques établies au chapitre 1. Les raisons évoquées pour justifier l'usage préférentiel du véhicule sont toutes à la fois économiques, sociales et environnementales mais les solutions providentielles que proposent les transports en commun sont partielles et souvent incompatibles entre elles en raison de leurs coûts élevés.

Pourtant de nombreux experts considèrent même que la pérennité de leur financement public pose problème (le financement des transports en commun urbains a atteint 12,7 milliards d'euros en 2004 en France), mais aucune étude n'a été réalisée à ce jour pour optimiser leur efficacité. En effet, il n'existe pas à l'heure actuelle des études abordant l'insertion efficace des transports en commun dans un tissu urbain figé afin de mettre en relief les retombés technico-économiques.

Pour ce faire, il nous a été nécessaire de considérer trois aspects. Le premier est l'aspect urbanistique afin de montrer la difficulté ; qui peut être liée à la nature du site, au plan de la ville, au type de réseau de transport, au trafic, d'insérer un mode de transport en commun dans un espace urbain figé dans lequel les exigences de déplacements imposent une mobilité de plus en plus fluide. Le deuxième aspect est technique et concerne essentiellement le matériel roulant. Cet aspect nous a conduit à choisir les différents modes de transport en commun en raison de leurs performances techniques notamment la vitesse, la capacité. Le troisième enfin est l'aspect économique. Ce dernier aspect constitue le trait d'union qui assure un équilibre harmonieux entre une solution technique et sa réalisation en ce sens qu'il est ou non le garant de la durée de vie d'une solution donnée.

Tout mode de transport en commun urbain dont le principe de création ou de fonctionnement réside essentiellement sur une logique de choix politique ne peut pas être rationnel et ne peut donc qu'effleurer superficiellement le problème de l'efficacité des transports en commun au point qu'il est aujourd'hui très difficile d'atteindre un niveau de performances équivalentes entre les avantages qu'offriraient les transports en commun et ceux qu'offre en réalité l'automobile face aux exigences modernes des usagers, dans la mesure où il met en porte à faux l'équilibre entre l'offre et la demande.

La recherche d'une base relationnelle à ce qui est systématiquement décidé de façon politique a consisté à se baser sur notre modèle d'optimisation en l'appliquant à plusieurs réseaux, puis à l'étendre à une dimension plus pratique par le traitement des données réelles.

Pratiquement, notre modèle permet de déterminer les différents profils de la vitesse commerciale soit sur toute la longueur de la ligne de transport en commun dans ces conditions, on parle de profil de vitesse commerciale moyenne ou successivement entre les stations lorsqu'il s'agit de la vitesse commerciale réelle inter station à partir des fiches horaires et en tenant compte des distances inter station réelles.

Une fois notre modèle appliqué, chacun des exemples présentés dans notre travail de thèse a permis de mettre en relief le caractère unique et particulier de chaque réseau de transport concerné dont l'identité se rapporte à l'histoire et au plan de la ville. Ainsi, le réseau nantais se place dans un contexte historique de premier réseau de transport en commun du monde à voir vu le jour lorsqu'en 1875, la municipalité opte pour le tramway dont la réalisation est confiée à la Société des moteurs à air comprimé. S'en est suivie ensuite, l'exploitation d'une ligne de tramway reliant **Doulon** à la **gare maritime**, via la place du Commerce de Nantes. A cette épopée, l'exigence de confort et de sécurité n'est pas d'actualité et le seul objectif clairement affiché est le déplacement des passagers.

Le tramway de Lille qui date en réalité de 1968 s'inscrit dans un système de transport en commun mixte à la fois urbain parce qu'il se limitait à l'époque dans le périmètre de la ville du vieux Lille actuel et interurbain en reliant Lille, aux villes de Roubaix et de Tourcoing. Le modèle de ville convenable pour décrire la géographie de l'ensemble de ces trois villes est la

conurbation et le tracé actuel des lignes de tramway suit les voies de communication qui permettaient à l'époque de relier les trois villes.

Le réseau de tramway de Paris notamment la ligne T3, s'intègre dans une problématique contextuelle où l'insertion d'un mode de transport en commun dans le tissu urbain doit obligatoirement tenir compte du trafic existant. Les différences fondamentales entre ce type de réseau nouvellement construit et les plus anciens précédemment cités se situent à trois niveaux : l'importance du trafic, l'obligation, les exigences de fluidité dans les déplacements, de sécurité et de confort.

En effet, les exigences de confort et de sécurité y compris la facilité et surtout la rapidité de se déplacer ou de changer de modes de transports en commun s'invitent dorénavant aux critères actuels de choix d'un moyen de transport en commun urbain, sans oublier l'aspect économique dont l'illustration la plus parlante est le tramway de Valenciennes qui se rapproche à la fois de celui de Lille par la mixité du système de transport à la fois urbain pour le centre de Valenciennes et interurbain une fois qu'il sort du centre ville, circulant à cet effet sur une voie unique.. .

L'objectif fixé au début de ce travail de thèse est parfaitement atteint en théorie à savoir :

montrer l'importance de valoriser les transports en commun en assurant

- le confort des usagers
- la sécurité des usagers
- la performance des matériels utilisés
- la vitesse de déplacement en réduisant les temps de parcours.

De plus, les transports en commun mis en concurrence avec la voiture personnelle, ne subissent plus le développement de la ville, mais au contraire l'impulsent et le structurent.

Toutefois, le modèle élaboré ne traduit plus fidèlement la réalité lorsqu'on intègre plusieurs paramètres. En effet, notre modèle ne reste valable que dans l'hypothèse d'une ligne unique supposée ne pas être confondue avec une autre. En attendant d'approfondir des recherches pour l'améliorer, nous suggérons que les transports en commun ne se contentent plus d'accompagner le développement des villes, mais qu'ils le fassent bien au contraire au moyen des schémas directeurs d'aménagement qui doivent être créés autour des axes lourds applicables surtout dans les pays en voie de développement comme le Gabon.



# Bibliographie

## Chapitre 1

- 1- **[CHO]** : Françoise Choay, l'urbanisme, utopies et réalités, Paris, le Seuil, 1965
- 2 - **[MER]** : Pierre Merlin et Françoise Choay, Morphologie urbaine et parcellaire. Espaces, Presse universitaire de Vincennes, 1988.
- 3 - **[LAC]** : Jean-Paul Lacaze, La ville et l'Urbanisme, Dominos Flammarion, 1995
- 4 - **[ALL]** : Rémy Allain, Morphologie Urbaine, Armand Colin, Paris, 2005
- 5 - **[PEL]** : Pelletier P. & Delfante Ch, Ville et Urbanisme dans le monde, Armand Colin, Paris, 1989
- 6 - **[BAR]** : Veillard-Baron H, Les banlieues : des singularités françaises aux réalités mondiales, Hachette Coll. « carré géographique » 2001.
- 7 - **[CAR]**: Carter H. The Study of Urban Geography, London, E Arnold, 1981.
- 8 - **[M.R.G]**: M.R.G. Conzen, The making of the American Landscape, Boston, Unwin Hyman, 1990
- 9 - **[BLA]** : Francis LE BLANC. Six classes d'aires urbaines du point de vue des migrations domicile-travail. Notes de synthèses du SES. Ministère de l'Equipement. Janvier-février 2003.  
[http://www.statistiques.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/NS\\_145-13-20\\_cle72756f-1.pdf](http://www.statistiques.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/NS_145-13-20_cle72756f-1.pdf)
- 10 - **[HAL]**: Peter Hall et Pfeiffer U., Urban Future 21. A Global Agenda for Twenty-Fist Century Cities, Urban 21, E & FN Spon, 2000.
- 11 - **[MER & al]**: Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement, P. MERLIN, F. CHOAY (éd), PUF, PARIS, 2000, 3e éd

**12 - [PAQ]:** Paquot T., Le monde des villes. Panorama urbain de la planète, La Découverte, Paris, 1997.

**13 - [GEO]:** Pierre Georges, Précis de Géographie Urbaine, PUF, 1964.

**14 - [BRA]:** Fernand Braudel, Civilisation matérielle, économie et capitalisme, XV<sup>e</sup> – XVIII<sup>e</sup> siècle, Armand Colin, 1980

**15 - [DEL & al]:** DELFANTE, C., Grande histoire de la ville. De la Mésopotamie aux Etats-Unis, Armand Colin, Paris, 1997

**16 - [PEL & al]:** PELLETIER, J., DELFANTE, C., Villes et urbanisme dans le monde, Masson, Paris, 1994, 2e éd.

**17 - [GHO]:** GHORRA-GOBIN, C., La ville américaine, Nathan, Paris, 1998.

**18 - [BOD]:** BODY-GENDROT, S., Les villes américaines, les politiques urbaines, Hachette, Paris, 1998.

**19 - [BAS]:** BASTIE, J., DEZERT, B., La ville, Masson, Paris, 1991.

**20 - [ROU]:** ROUX, S., La ville au moyen âge, Hachette, Paris, 1994.

**21 - [PIT]:** PITTE, J.-R., Histoire du paysage français, Tallandier, Paris, 1983.

**22 - [BUR]:** BURGEL, G., La ville aujourd'hui, Hachette, Paris, 1995, 2ème éd.

**23 - [ALL & al]:** Rémy Allain, P. Signoles, SEDES, 2001.

**24 - [BAE]:** Baervald, Evolution de la structure interne des métropoles nord-américaines, 1984

**25 - [KNO]:** P. Knox, Urban Social Geography, 1987, p. 38.

**26 - [HUB]:** Hubert Louis, 1936, Cité in J.W.R. Whitehand, The Changing Face of the Cities, Oxford, IBG, Basil Blackwell, 1987.

27 - **[HAG]**: P. Haggett, l'Analyse spatiale en géographie urbaine, A. Colin, U, 1973.

28 - **[LEV]**: Jacques Lévy

29 - **[IAURIF]**: La pollution atmosphérique et les transports franciliens. IAURIF. Octobre 2004.  
[http://www.iaurif.org/fr/savoirfaire/etudesenligne/pollution\\_transports/Pollution\\_transportsIdF.pdf](http://www.iaurif.org/fr/savoirfaire/etudesenligne/pollution_transports/Pollution_transportsIdF.pdf)

30 - **[COU]**: Jérémy COUREL, Alain MEYERE, Dany NGUYEN-LUONG. L'impact des modes de vie sur les déplacements. Les cahiers de l'Enquête Globale de Transport. IAURIF. Avril 2005.  
[http://www.iaurif.org/fr/savoirfaire/etudesenligne/enquete\\_globale\\_transport4/impact\\_mode\\_vie.pdf](http://www.iaurif.org/fr/savoirfaire/etudesenligne/enquete_globale_transport4/impact_mode_vie.pdf)

31 - **[BUR]**: Carine BURRICAND, Mireille RESPLANDY. L'impact des changements démographiques sur la mobilité régionale. Les cahiers de l'Enquête Globale de Transport. IAURIF. Janvier 2005.  
<http://www.ile-de-france.equipement.gouv.fr/notesconjonctures/transportvoyageurs/cahiers/cahier1.pdf>

32 - **[BER]**: François BERTRAND. Motorisation et usage de l'automobile en Ile-de-France. Les cahiers de l'Enquête Globale de Transport. IAURIF. Juillet 2005.  
<http://www.ile-de-france.equipement.gouv.fr/notesconjonctures/transportvoyageurs/cahiers/cahier6.pdf>

33 - **[DRE]**: Joëlle DREYFUS. Le profil des déplacements journaliers en transports en commun et voiture particulière. Les cahiers de l'Enquête Globale de Transport. IAURIF. Janvier 2005. <http://www.ile-de-france.equipement.gouv.fr/notesconjonctures/transportvoyageurs/cahiers/cahier2.pdf>

34 - **[NIE]**: Xavier NIEL. Pourquoi se passer de sa voiture ? INSEE Première n° 607. Septembre 1998.  
[http://www.insee.fr/FR/FFC/DOCS\\_FFC/ip607.pdf](http://www.insee.fr/FR/FFC/DOCS_FFC/ip607.pdf)

## **Chapitre 2**

**35 - [BOUR]** : Alain BOURDIN, Des coopérations transversales pour satisfaire les objectifs de service et d'impact sur les territoires. CERTU dossiers N° 176.

**36 - [ANN]** : Anne Grillet-Aubert, Renouvellement urbain et TCSP : question d'échelle. CERTU dossiers N° 176.

**37 - [PAN]** : Panorama transports publics urbains des villes à TCSP, CERTU, CETE Lyon, CETE Nord Picardie, situation en 2001.

**38 - [BIG]** : Bigey M. & al. "Le tramway nantais", SEMITAN CID éditions, Nantes 1986.

**39 - [BRI]** : BRISOU F, Fiche technique du rail 21, avril 2003.

**40 - [DID<sup>1</sup>]** : DIDIER G., Aménagement intérieur du TFS vu depuis le compartiment d'extrémité sur la rame 205, dossiers techniques RATP, Etat du parc Métro et Tramway, 27 février 2003.

**41 - [DID<sup>2</sup>]** : DIDIER G., Motorisation et conduite du TFS, dossiers techniques RATP, Etat du parc Métro et Tramway, 10 avril 2003.

**42 - [DID<sup>3</sup>]** : DIDIER G., Décoration extérieure, dossiers techniques RATP, Etat du parc Métro et Tramway, juin 2003.

**43 - [CUB]** : Les transports urbains de Bordeaux, Communauté Urbaine de Bordeaux en 2006

**44 - [REV<sup>1</sup>]** : Revue Générale des Chemins de Fer - Juin 1985,  
[perso.orange.fr/florent.brisou/Fiche%20Nantes.htm](http://perso.orange.fr/florent.brisou/Fiche%20Nantes.htm)

**45 - [INR]** : INRETS : Recherches et Synthèses N° 8 Nouvelle collection – Avril 2004.

**46 - [REV<sup>2</sup>]** : Revue Générale des Chemins de Fer - Juin 1985,  
<http://perso.orange.fr/florent.brisou/Fiche%20Bordeaux302.htm>

- 47 - [DID<sup>4</sup>]** : Didier G., Citadis 302/402, dossiers techniques RATP, 10 décembre 2003.  
<http://www.metro-pole.net/expl/materiel/citadis/citadis.html>
- 48 - [ATE]** : Journée d'études ATEC 3 juin 2004
- 49 - [CER<sup>1</sup>]** : CERTU-LROP, Plates-formes de tramway pathologie et conception, Tome 1, dossiers 156.
- 50 - [CER<sup>2</sup>]** : CERTU, Rénovation urbaine et offre de mobilité – mieux intégrer les transports en commun en site propre aux projets de rénovation urbaine – dossiers 176.
- 51 - [KUH<sup>1</sup>]** : Francis KUHN, le tramway moderne ou le métro automatique, Rencontre franco-coréenne sur les transports urbains, Séoul 16 et 17 avril 2003.
- 52 - [REV<sup>3</sup>]** : Revue Générale des Chemins de Fer - Juin 1985, VAL  
<http://perso.orange.fr/florent.brisou/Fiche%20VAL206.htm>
- 53 - [REV<sup>4</sup>]** : Revue Générale des Chemins de Fer - Juin 1985, AUTOBUS
- 54 - [CER<sup>3</sup>]** : L'offre française en matière de transports publics» - CERTU – août 2000
- 55 - [REV<sup>5</sup>]** : Revue Générale des Chemins de Fer - Juin 1985
- 56 - [CER<sup>4</sup>]** : Les modes de transports collectifs urbains» - CERTU/DTT/INRETS - mai 2004
- 57 - [TRA]** : Transport urbain - l'essentiel – Les systèmes techniques des transports collectifs, avril 2005
- 58 - [REV<sup>6</sup>]** : Revue Générale des Chemins de Fer - Juin 1985
- 59 - [CER<sup>5</sup>]** : Nouveaux systèmes de transports guidés urbains» - CERTU/INRETS - mars 1999
- 60 - [PEN]** : PENY André, Mission transports RECHERCHES ET SYNTHÈSES DU PREDIT
- 61 - [ORS]** : ORSELLI J, Les nouveaux tramways, janvier 2004, Edition Paradigme

www.alstom.com ; www.transport.bombardier.com ; www.irisbus.com ; www.lohr.fr ;  
www.siemens-ts.com ; www.poma -otis.com ; www.transbus.org ;

**62 - [[DSD<sup>1</sup>]** : Rapport sur les transports urbains en France, Sciences et Décisions, octobre 2006

<http://www.scienes-decision.fr>

**63 - [IAURIF<sup>1</sup>]** : Les premiers résultats de la 2<sup>e</sup> enquête de victimation en Ile-de-France. IAURIF. Juillet 2003.

[http://www.iaurif.org/fr/ressources\\_doc/publications/publicationsrecentes/notesrapides/pdf/securite\\_comport/nr341.pdf](http://www.iaurif.org/fr/ressources_doc/publications/publicationsrecentes/notesrapides/pdf/securite_comport/nr341.pdf)

**64 - [IAURIF<sup>2</sup>]** : Victimation et insécurité dans les transports en commun et les espaces publics d'Ile-de-France. IAURIF. Avril 2004.

[http://www.iaurif.org/fr/ressources\\_doc/publications/publicationsrecentes/notesrapides/pdf/securite\\_comport/nr\\_354.pdf](http://www.iaurif.org/fr/ressources_doc/publications/publicationsrecentes/notesrapides/pdf/securite_comport/nr_354.pdf)

**65 - [IAURIF<sup>3</sup>]** : Victimation et insécurité en Ile-de-France, une réalité diversement partagée. IAURIF. Mai 2004.

[http://www.iaurif.org/fr/ressources\\_doc/publications/publicationsrecentes/notesrapides/pdf/securite\\_comport/nr\\_355.pdf](http://www.iaurif.org/fr/ressources_doc/publications/publicationsrecentes/notesrapides/pdf/securite_comport/nr_355.pdf)

**66 - [CER<sup>6</sup>]** : L'offre française en matière de transports publics. CERTU – Ministère de l'équipement. Juillet 2000. ISSN 0247-1159.

**67 - [STIF<sup>1</sup>]** : Compte déplacements de voyageurs en Ile-de-France pour l'année 2003 – édition 2005. STIF. Décembre 2005.

[http://www.stif-idf.fr/present/publi/img/cpte\\_transp/compte%20deplacement%202005.pdf](http://www.stif-idf.fr/present/publi/img/cpte_transp/compte%20deplacement%202005.pdf)

**68 - [CAB & al]** : Christian CABAL et Claude GATIGNOL. Rapport sur la définition et les implications du concept de voiture propre. Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques. 14 décembre 2005. <http://senat.fr/rap/r05-125/r05-1251.pdf>

**69 - [BOI]** : Marcel BOITEUX, Luc BAUMSTARK. Transports choix des investissements et coût des nuisances. Commissariat général du Plan. Juin 2001.

<http://lesrapports.ladocumentationfrancaise.fr/BRP/014000434/0000.pdf>

**70 - [INS]** : INSTRUCTION CADRE relative aux méthodes d'évaluation économique des grands projets d'infrastructures de transport. Ministère de l'Équipement. 25 mars 2004.

[http://www.statistiques.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/instruction-cadre\\_evaluation\\_projets\\_transport\\_cle1ed732.pdf](http://www.statistiques.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/instruction-cadre_evaluation_projets_transport_cle1ed732.pdf)

**71 - [ROU]** : Didier ROUCHAUD, Alain SAUVANT. Prix des logements et coûts de transports : un modèle global d'équilibre en Ile-de-France. Notes de synthèses du SES. Ministère de l'Équipement. Juillet août 2004. [http://www.statistiques.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/NS154-11-20\\_cle6b77bb.pdf](http://www.statistiques.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/NS154-11-20_cle6b77bb.pdf)

**72 - [IAURIF<sup>4</sup>]** : La consommation énergétique des transports franciliens. IAURIF. Novembre 2005.

[http://www.iaurif.org/fr/ressources\\_doc/publications/publicationsrecentes/notesrapides/pdf/transports/nr\\_400.pdf](http://www.iaurif.org/fr/ressources_doc/publications/publicationsrecentes/notesrapides/pdf/transports/nr_400.pdf)

**73 - [MOB]** : Mobilité et vie quotidienne : synthèse et questions de recherche. 2001 Plus n° 48. Centre de Prospective et de Veille Scientifique de la Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques. Ministère de l'Équipement. Juin 1999.

[http://www2.equipement.gouv.fr/recherche/publications/publi\\_drast/2001\\_48.htm#telecharge](http://www2.equipement.gouv.fr/recherche/publications/publi_drast/2001_48.htm#telecharge)

**74 - [REF]** : Les transports dans les grandes métropoles – Réflexions actuelles, tome 2. Les cahiers de l'IAURIF, n° 128. 2000. ISSN 0153-6184. [18] LOI no 2000-1208 du 13 décembre 2000 relative à la solidarité et au renouvellement urbains. Journal officiel.

<http://www.legifrance.gouv.fr/WAspad/UnTexteDeJorf?numjo=EQUX9900145L>

**75 - [BLA]** : Livre blanc - La politique européenne des transports à l'horizon 2010. Commission européenne. 2001. ISBN 92-894-0342-X.

[http://europa.eu.int/comm/energy\\_transport/library/lb\\_texte\\_complet\\_fr.pdf](http://europa.eu.int/comm/energy_transport/library/lb_texte_complet_fr.pdf)

**76 - [IAURIF<sup>5</sup>]** : La pollution atmosphérique et les transports franciliens. IAURIF. Octobre 2004.  
[http://www.iaurif.org/fr/savoirfaire/etudesenligne/pollution\\_transports/Pollution\\_transportsIdF.pdf](http://www.iaurif.org/fr/savoirfaire/etudesenligne/pollution_transports/Pollution_transportsIdF.pdf)

**77 - [ROL<sup>1</sup>]**: Olivier ROLIN. La demande de transport en 2025 - Eléments d'évaluation environnementale. Notes de synthèses du SES. Ministère de l'Équipement. Janvier-février 2005.  
[http://www.statistiques.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/NS157-19-26\\_cle6232b1.pdf](http://www.statistiques.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/NS157-19-26_cle6232b1.pdf)

**78 - [LEP]**: Serge LEPELTIER. Rapport d'information fait au nom de la délégation du Sénat pour la planification sur les nuisances environnementales de l'automobile. Sénat. 4 décembre 2001. <http://www.senat.fr/rap/r01-113/r01-1131.pdf>

**79 - [ROL<sup>2</sup>]**: Olivier ROLIN. Achat de voiture particulière : les incitations de l'Etat pour un choix écologique. Notes de synthèses du SES. Ministère de l'Équipement. Janvier-février 2005.  
[http://www.statistiques.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/NS157-3-12\\_cle791cfe.pdf](http://www.statistiques.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/NS157-3-12_cle791cfe.pdf)

**80 - [CCF]**: Bruit et transports. Les dossiers du CCFA. Comité des constructeurs français d'automobiles. Octobre 2001. <http://www.ccfa.fr/dossiers/bruit.zip>

**81 - [ROL<sup>2</sup>]**: Olivier ROLIN. Achat de voiture particulière : les incitations de l'Etat pour un choix écologique. Notes de synthèses du SES. Ministère de l'Équipement. Janvier-février 2005.  
[http://www.statistiques.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/NS157-3-12\\_cle791cfe.pdf](http://www.statistiques.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/NS157-3-12_cle791cfe.pdf)

**82 - [STIF<sup>2</sup>]** : Les comptes des transports en 2004 - 42e rapport de la Commission des comptes des transports de la Nation. Juillet 2005.  
[http://www.statistiques.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/CCTN2003\\_cle5975b7.pdf](http://www.statistiques.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/CCTN2003_cle5975b7.pdf)

**83 - [IAURIF<sup>6</sup>]** : Les transports dans les grandes métropoles – Réflexions actuelles, tome 1. Les cahiers de l'IAURIF, n° 127. 2000. ISSN 0153-6184.

**84 - [IAURIF<sup>7</sup>]** : Les transports dans les grandes métropoles – Réflexions actuelles, tome 2. Les cahiers de l'IAURIF, n° 128. 2000. ISSN 0153-6184.

**85 - [GWI]** : Ken GWILLIAM. Villes en mouvement, la stratégie de transport urbain de la Banque Mondiale. Banque Mondiale. Août 2002.



[http://siteresources.worldbank.org/INTURBANTRANSPORT/Resources/french\\_cities\\_on\\_the\\_move.pdf](http://siteresources.worldbank.org/INTURBANTRANSPORT/Resources/french_cities_on_the_move.pdf)

**86 - [PHI]** : Christian PHILIP, Nicolas GAUTHIER. Le Financement des déplacements urbains. Rapport au Premier Ministre. 9 décembre 2003.

<http://lesrapports.ladocumentationfrancaise.fr/BRP/034000723/0000.pdf>

**87 - [TCU]** : Le transport collectif urbain : transports en site propre. Ministère de l'équipement. 3 mai 2005. <http://www.transports.equipement.gouv.fr/frontoffice/visupdoc.jsp?id=300&t=2>

**88 - [SCH]** : Bruce SCHALLER. A Regression Model of the Number of Taxicabs in US Cities. Journal of Public Transportation, Vol. 8, No. 5, 2005.

<http://www.nctr.usf.edu/jpt/pdf/JPT%208-5%20Schaller.pdf>

**89 - [SCH]** : Les transports en commun en chiffres en Ile-de-France. STIF. Juin 2005.

<http://www.stif-idf.fr/present/publi/img/memento/leschiffres2005.pdf>

**90 - [LAM]** : Clive LAMMING. Le Larousse des trains et des chemins de fer. Editions Larousse. Octobre 2005. ISBN 2-03-505493-1.

**91 - [GART]** : L'année 2004 des transports urbains. XXe rencontres nationales du transport public. Groupement des autorités responsables de transport. Octobre 2005.

<http://www.gart.org/tele/chiffresdereferences/chiffresreferences2005.pdf>

**92 - [HGT]** : Histoire générale des transports urbains : les trolleybus. Site officiel du Musée des Transports Urbains, Interurbains et Ruraux.

[http://www.amtuir.org/dossiers/transports\\_urbains/htu\\_6\\_trolleybus/htu\\_trolleybus.htm](http://www.amtuir.org/dossiers/transports_urbains/htu_6_trolleybus/htu_trolleybus.htm)

**93 - [BOU]** : Walter BOUVAIS. La gratuité des transports en commun est-elle une utopie ? Novethic.fr, Le media en ligne du développement durable. 23 janvier 2004.

<http://www.novethic.fr/novethic/site/article/index.jsp?id=73456>

**94 - [TPU]** : Les transports publics urbains : rapport au Président de la République suivi des réponses des administrations et des organismes intéressés. Cour des Comptes. Avril 2005.  
<http://lesrapports.ladocumentationfrancaise.fr/BRP/054000270/0000.pdf>

**95 - [STP]** : Génération Carte orange. La lettre du STP. Mars 2000.  
[http://www.stif-idf.fr/present/publi/img/lettres\\_stif/lettrestp2.pdf](http://www.stif-idf.fr/present/publi/img/lettres_stif/lettrestp2.pdf)

**96 - [GER]** : Christian GERONDEAU. La saga du RER et le maillon manquant. Presses de l'Ecole des ponts et chaussées. Avril 2003. ISBN 2-85978-368-7.

**97 - [GCP]** : Guide des contrats de partenariat : Principes et méthodes. Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie. Mai 2005.  
[http://www.ppp.minefi.gouv.fr/guide\\_contrat\\_partenariat.pdf](http://www.ppp.minefi.gouv.fr/guide_contrat_partenariat.pdf)

**98 - [DCE]** : Dialogue compétitif, fiche explicative. Commission européenne. 5 octobre 2005.  
[http://www.ppp.minefi.gouv.fr/fiche-dialogue\\_fr.pdf](http://www.ppp.minefi.gouv.fr/fiche-dialogue_fr.pdf)

**99 - [LJO]** : LOI n° 2006-10 du 5 janvier 2006 relative à la sécurité et au développement des transports. Journal officiel. 5 janvier 2006.  
<http://www.legifrance.gouv.fr/WAspad/UnTexteDeJorf?numjo=EQUX0500211L>

**100 - [PPP]** : Le PPP en France. Ministère de l'équipement.  
[http://www.europe-international.equipement.gouv.fr/rubrique.php3?id\\_rubrique=232](http://www.europe-international.equipement.gouv.fr/rubrique.php3?id_rubrique=232)

**101 - [E.PPP]** : Exemples de PPP en Europe. Ministère de l'équipement.  
[http://www.europe-international.equipement.gouv.fr/rubrique.php3?id\\_rubrique=231](http://www.europe-international.equipement.gouv.fr/rubrique.php3?id_rubrique=231)

**102 - [LAR]** : Dominique LARROQUE, Michel MARGAIRAZ, Pierre ZEMBRI. Paris et ses transports XIX<sup>e</sup>-XX<sup>e</sup> siècles – deux siècles de décisions pour la ville et sa région. Editions Recherches. Juin 2002. ISBN 2-86222-042-6.

**103 - [CAR<sup>1</sup>]** : Bruno CARRIERE. Les trains de banlieue, tome 2 : de 1938 à 1999. Editions La vie du rail. Juillet 1999. ISBN 2-902 808-76-3.

**104 - [TRAN]** : Lancement du « ticket t » en Ile-de-France. TRANS'BUS – Actualité. Janvier 2003. [http://www.transbus.org/actualite/actu\\_2003\\_01.html#actu2](http://www.transbus.org/actualite/actu_2003_01.html#actu2)

**105 - [BER & al]**: Serge BERNARD, Laurence DEBRINCAT, Thierry SIMEON.  
Les déplacements en transports en commun en Ile-de-France. Enquête Globale de Transport. IAURIF. Juin 2005.  
<http://www.ile-de-france.equipement.gouv.fr/notesconjonctures/transportvoyageurs/cahiers/cahier5.pdf>

**106 - [AUT]**: Propositions d'évolutions tarifaires pour les transports en Ile-de-France. AUT – Association des Usagers des Transports. FNAUT Ile-de-France. Octobre 2005.  
<http://www.aut-idf.org/Positions-tarifification.pdf>

**107 - [STIF<sup>3</sup>]** : Histoire du Syndicat des transports parisiens. STIF – Autorité organisatrice des transports d'Ile-de-France.  
<http://www.stif-idf.fr/present/histoire/main.htm>

**108 - [CAR<sup>2</sup>]**: Bruno CARRIERE. Les trains de banlieue, tome 1 : de 1837 à 1938. Editions La vie du rail. Avril 1998. ISBN 2-902 808-66-6.

**109 - [CAB & al]**: Christian CABAL et Claude GATIGNOL. Rapport sur la définition et les implications du concept de voiture propre. Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques. 14 décembre 2005.  
<http://senat.fr/rap/r05-125/r05-1251.pdf>

**110 - [PREDIT]**: Transport, énergie et contraintes environnementales en France à l'horizon 2030: apports de l'approche « backcasting » à la formulation des stratégies technologiques et organisationnelles. PREDIT. 5 juillet 1999.  
<http://www.innovations-transport.fr/IMG/pdf/066-RADEME3.pdf>

**111 - [HER]**: Jocelyne HERMILLY. Transport et émissions de gaz carbonique : un bilan depuis 1960. Notes de synthèses du SES. Ministère de l'Équipement. Septembre-octobre 2003.  
[http://www.statistiques.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/NS149-27-32\\_cle69521e.pdf](http://www.statistiques.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/NS149-27-32_cle69521e.pdf)

**112 - [WID]:** David WIDORY, Marc JAVOY. The carbon isotope composition of atmospheric CO<sub>2</sub> in Paris. *Earth and Planetary Science Letters* 6778 (2003) 1-10

**113 - [DSD<sup>2</sup>]:** Les économies d'énergie : choix ou nécessité ? Dossier *Science & Décision*. 2004. <http://www.science-decision.net/cgi-bin/topic.php?topic=ECO>

**114 - [IAURIF<sup>8</sup>]:** Pollution atmosphérique, effet de serre et circulation routière en Île-de-France : des améliorations notables, des efforts à poursuivre. Note rapide sur les transports n° 402. IAURIF. Novembre 2005.

[http://www.iaurif.org/fr/ressources\\_doc/publications/publicationsrecentes/notesrapides/pdf/transports/nr\\_402.pdf](http://www.iaurif.org/fr/ressources_doc/publications/publicationsrecentes/notesrapides/pdf/transports/nr_402.pdf)

**115 - [CITEPA<sup>1</sup>]:** Emission dans l'air en France - Métropole : substances impliquées dans le phénomène d'accroissement de l'effet de serre. CITEPA - Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique. 14 avril 2006.

[http://www.citepa.org/emissions/nationale/Ges/Emissions\\_FRmt\\_GES06.pdf](http://www.citepa.org/emissions/nationale/Ges/Emissions_FRmt_GES06.pdf)

**116 - [DSD<sup>3</sup>]:** Energie : production, consommation, où en est-on ? Dossier *Science & Décision*. 2005. <http://www.science-decision.net/cgi-bin/topic.php?topic=ENP>

**117 - [ADEM]:** Produire des biocarburants. ADEME. 2005.

<http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=12475>

**118 - [AGRICE]:** Les biocarburants (biocomposants et additifs de formulation des carburants). AGRICE Agriculture pour la chimie et l'énergie. 2005.

<http://www.ademe.fr/partenaires/agrice/htdocs/action02.asp>

**119 - [RAP]:** Changement climatique : le défi majeur. Rapport parlementaire fait au nom de la mission d'information sur l'effet de serre – tome 2. Mission d'information sur l'effet de serre. 12 avril 2006.

<http://www.effet-de-serre.gouv.fr/fr/etudes/Missionparlementaireffetdeserretome2.pdf>

**120 - [PRE & al]:** Henri PREVOT, Véronique HESPEL, Jean-Yves DUPRE, François BARATIN, Dominique GAGEY. Rapport sur l'optimisation du dispositif de soutien à la filière biocarburants. Conseil Général des Mines, Inspection générale des Finances, Conseil général du Génie rural des eaux et forêts. 20 septembre 2005.

<http://www.industrie.gouv.fr/energie/renou/biomasse/rap-cgm-igf-biocarburants.pdf>

**121 - [SAU] :** Alain SAUVANT. Prévisions des émissions de polluants de véhicules particuliers d'ici 2020. Notes de synthèses du SES. Ministère de l'Équipement. Juillet-août 2001.

[http://www.statistiques.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/NS136-29-36\\_cle631131.pdf](http://www.statistiques.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/NS136-29-36_cle631131.pdf)

**122 - [ECC]:** Current and Future European Community Emission Requirements. European Commission. October 2003.

[http://europa.eu.int/comm/enterprise/automotive/pagesbackground/pollutant\\_emission/pollutant\\_emission.pdf](http://europa.eu.int/comm/enterprise/automotive/pagesbackground/pollutant_emission/pollutant_emission.pdf)

**123 - [AFSSE]:** Impact sanitaire de la pollution atmosphérique urbaine : estimation de l'impact lié à l'exposition chronique aux particules fines sur l'espérance de vie. Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement AFSSE. 21 juillet 2005.

[http://www.afsse.fr/documents/impact\\_sanitaire\\_pollution\\_atmospherique\\_urbaine.pdf](http://www.afsse.fr/documents/impact_sanitaire_pollution_atmospherique_urbaine.pdf)

**124 - [CITEPA<sup>2</sup>]:** Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France - Séries sectorielles et analyses étendues. CITEPA - Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique. 23 février 2006.

[http://www.citepa.org/publications/secten\\_fevrier\\_2006.pdf](http://www.citepa.org/publications/secten_fevrier_2006.pdf)

**125 - [DEM]:** Djibril DEMBELE, Daniel MOURANCHE, Marc PELISSIER. Communication personnelle. AUT – Association des Usagers des Transports. FNAUT Ile-de-France. 7 avril 2006.

<http://www.aut-idf.org/>

**126 - [KUH<sup>2</sup> & al] :** Khün F, Martinet C. Semaly, « Etude comparative des coûts de Génie Civil selon les systèmes de transport adoptés », INRETS-CRESTA Février 1992.

**127 - [KUH<sup>3</sup>]** : Khün Francis “The Val Lille Urban Community Metro’s Experience 1992 – 2001”.  
Presentation to KRRI, 30 July 2001.

**128 - [PIE]** : Pierron M. Les matériels français de transports collectifs urbains CETUR,  
(GIETHLEN JM) DTT – CETUR Mai 1988.

**129 - [GAR & al]** Gardner G., Rutter J., TRL Overseas Unit, Kühn F. INRETS - CRESTA  
(1993), “The performance and potential of Light Rail Transit in Developing Cities”, Project Report  
69 R5596, 25p, 1994

**130 - [ETC]** : European Transport Conference (ETC 2004) Association Européenne des  
transports en commun, 4 – 6 Octobre 2004 Strasbourg France.

**131 - [BIJ]** : Bijl, R. A. J. van der (2003) Light rail & regionale planning. Portland (OR): voorbeeld  
van 'transport oriented development' Hugo Priemus, Robert Kloosterman & Willem Korthals  
Altes (ed.), ICES, Stad & Infrastructuur. Koninklijke Van Gorcum, Assen 2003, 67-74.

**132 - [KUH<sup>4</sup>]** : Khün Francis “Bus rapid or light rail transit for intermediate cities ?, in proceeding  
of CODATU X2002 Urban Mobility For All, Xavier Godard & Innocent Fatonzoun, 2002 Balkema,  
p357 to p365.

**133 - [YAN]** : Yang Tzu-Pao, ENPC, “Bilan financier de l’automatisme intégrale des transports  
collectifs urbains, thèse de doctorat du 7 novembre 1996.

**134 - [MST]** : Metroplanet, SMAT du Métro de Toulouse]

## **SITES WEB**

**1 - [SWC1.P1]:** <http://perso.orange.fr/marc.chanut/MontblancP9.htm>

**2 - [SW C1.P2]:** <http://www.vjoncheray.fr/phototheque/photos-nantes/centre/456.html>

**3 - [SW C1.P3]:** [http://photos.linternaute.com/photo/877574/3070337177/4/sidi\\_bou\\_said](http://photos.linternaute.com/photo/877574/3070337177/4/sidi_bou_said)

**4 - [SW C1.P4]:** <http://www.vjoncheray.fr/phototheque/photos-nantes/centre/6889.html>

**5 - [SW C1.P5]:** <http://www.picsandplaces.com/phoenix-az-2.html>

- 6 - [SW C1.P6]: [http://www.tour-du-monde.net/photo-257570-saopaulo-vue-aerienne2\\_jpg.html](http://www.tour-du-monde.net/photo-257570-saopaulo-vue-aerienne2_jpg.html)
- 7 - [SW C1.P7] : <http://www.honug.free.fr/index.php?page=photos&endroit=libreville&img=9>
- 8 - [SW C1.P8]: <http://www.yunnan.fr/beijing/pekin.html>
- 9 - [SW C1.P9]: [http://www.paris.culture.fr/fr/ville\\_he\\_aqueduc\\_pg1.htm](http://www.paris.culture.fr/fr/ville_he_aqueduc_pg1.htm)
- 10 - [SW C1.P10]: <http://www.fxdeco.com/maquette/provins.htm>
- 11 - [SW C1.P11]: [Source : Croquis de C. Sitte (1889), reproduit par R. Unwin]  
<http://www.1d-hoto.org/?TopicID=0617f0e113f82ffd0422cd2c9f20778c&Etat=arch>
- 13 - [SW C1.P12]: <http://www.sicile.ch/pages/ragusa.htm>
- 14 - [SW C1.P13]: <http://www.visualtravelguide.org/small/Photo-Italie-Milan-2002-07-55.html>
- 15 - [SW C1.P14]: [http://www.photoway.com/fr/dest/NY01\\_06.html](http://www.photoway.com/fr/dest/NY01_06.html)
- 16 - [SW C1.P15]:  
<http://www.apiphoto.net/PBSCCatalog.asp?ActionID=67240448&PBMItemID=1432387>
- 17 - [SW C1.P16]: <http://www.forray.com/chicago/1-8.htm>
- 18 - [SW C1.P16]:  
<http://www.visoterra.com/images/original/visoterra-amsterdam-1585.jpg>
- 19 - [SW C1.P18]: <http://www.pbase.com/bmcmorrow/image/38654221>
- 20 - [SW C1.P19]: <http://www.picsandplaces.com/los-angeles-4.html>
- 21 - [SW C1.P19]: <http://forum.tourdumonde.be/photo-232.html>

22 - [SW C1.P21]: [http://gegelaphoto.free.fr/JAP\\_Japon.htm](http://gegelaphoto.free.fr/JAP_Japon.htm)

23 - [SW C1.P22]:

<http://www.fond-ecran-image.com/photo-espagne/photo-parc-guell/barcelone-08.jpg>

24 - [SW C1.P23]: <http://www.vioncheray.fr/phototheque/photos-nantes/centre/6889.html>

25 - [SW C1.P24]: [http://www.ilotsacre.be/site/fr/default\\_fr.htm](http://www.ilotsacre.be/site/fr/default_fr.htm)

26 - [PUB1]: Document Hachette - Publication Auer Photo]

27 - [SW C1.P27]: [http://www.routard.com/guide\\_carte/code\\_dest/los\\_angeles.htm](http://www.routard.com/guide_carte/code_dest/los_angeles.htm)

28-a- [SW C1.P28-a-]: [http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Egypt\\_Karnak\\_test.png](http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Egypt_Karnak_test.png)

28-b- [SW C1.P28-b-]: [http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Kairo\\_001.jpg](http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Kairo_001.jpg)

29 - [SW C1.P29]:

<http://www.guid.fr/monde.html?mode=detail&iso=us&style=carte&zoom=2&id=50463&docid=762>

30 - [SW C1.P30]:

<http://www.guid.fr/monde.html?mode=detail&iso=sy&style=carte&zoom=2&id=50061&docid=48>

31 - [SW C1.P31]:

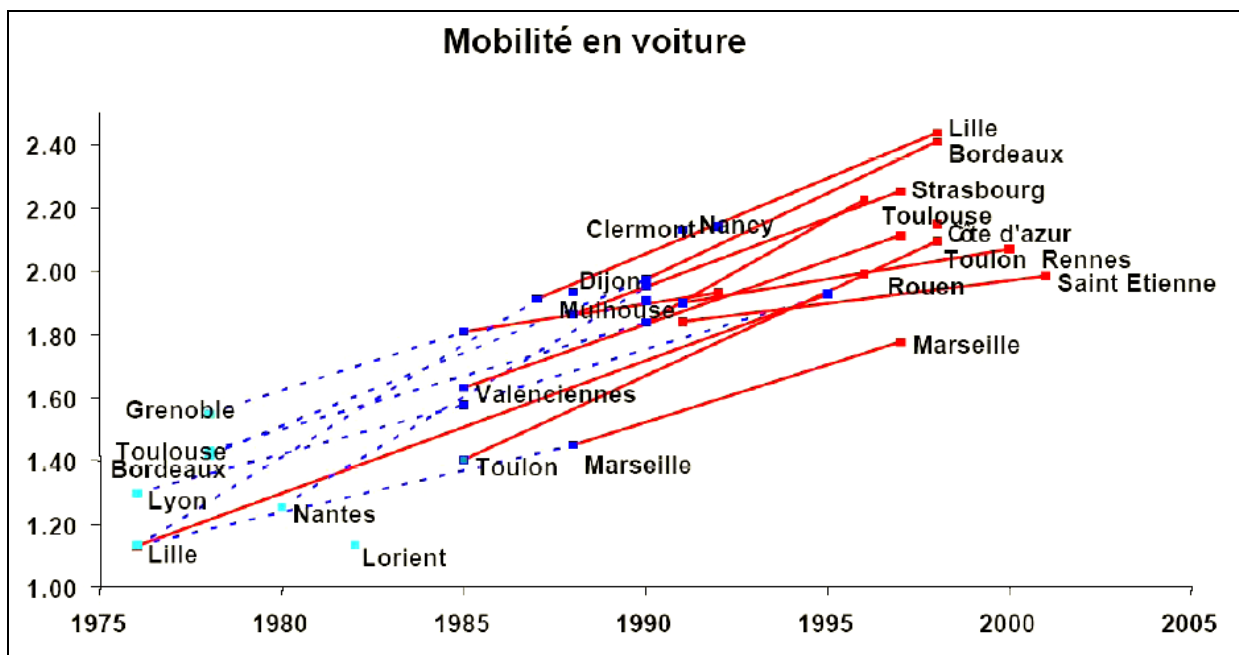
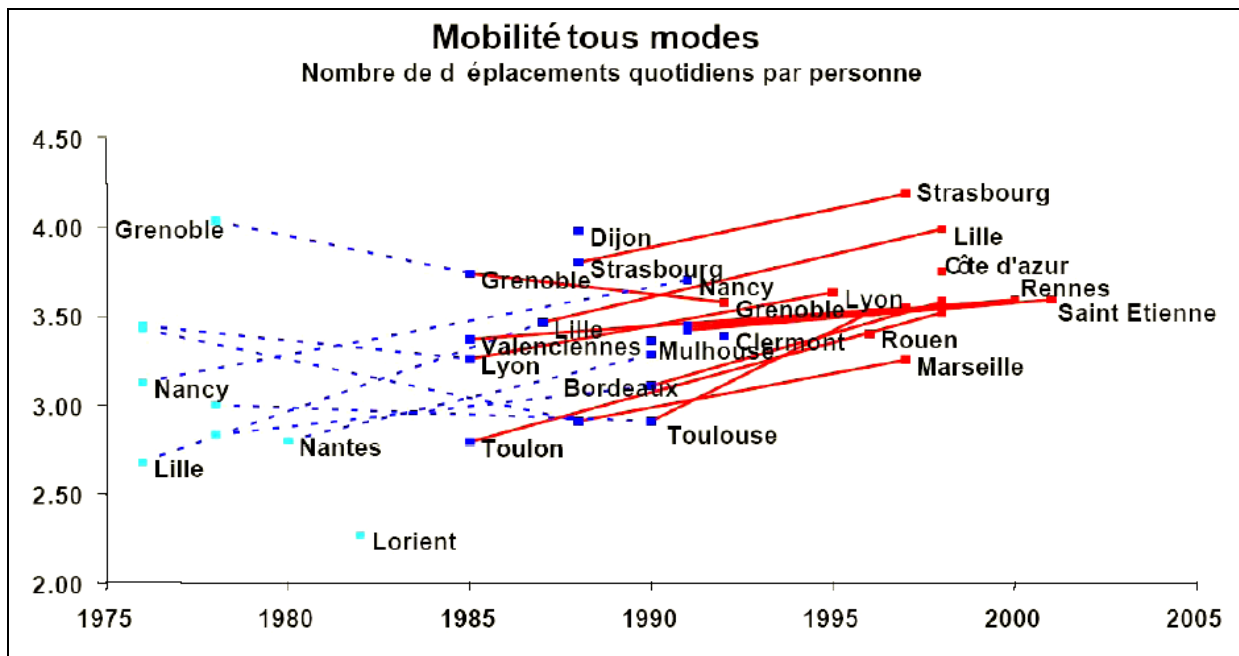
[http://fr.encarta.msn.com/media\\_461538919\\_761562480\\_1\\_1/Moscou\\_\(plan\\_de\\_la\\_ville\).html](http://fr.encarta.msn.com/media_461538919_761562480_1_1/Moscou_(plan_de_la_ville).html)



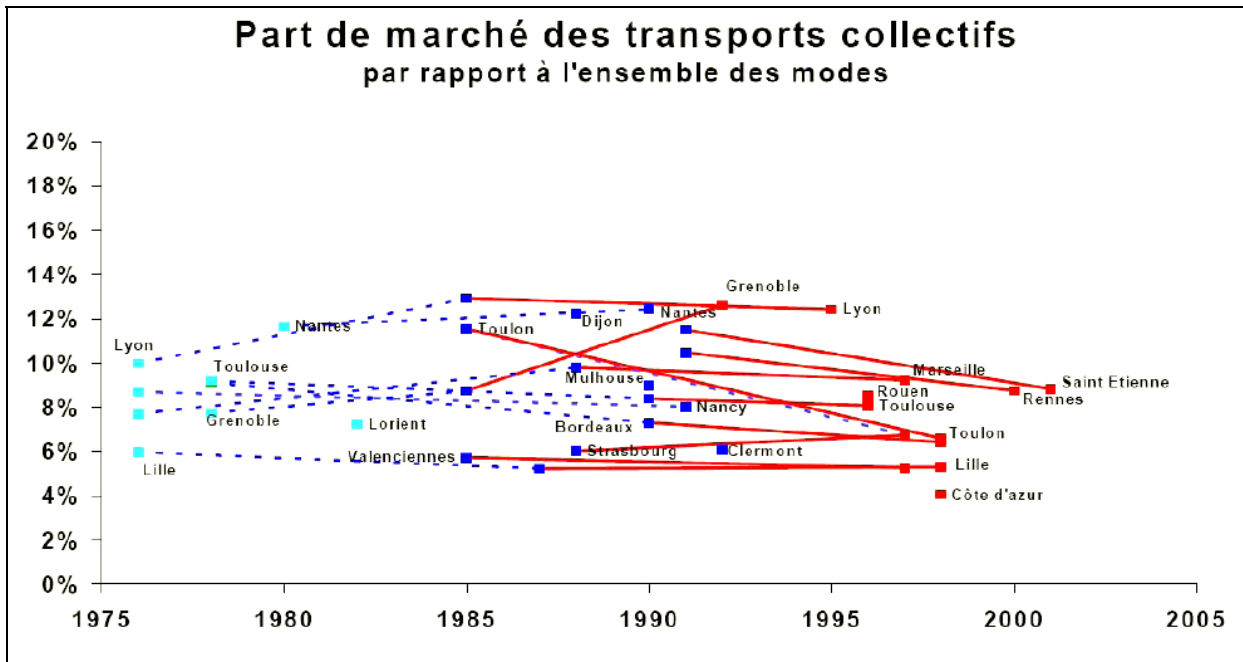
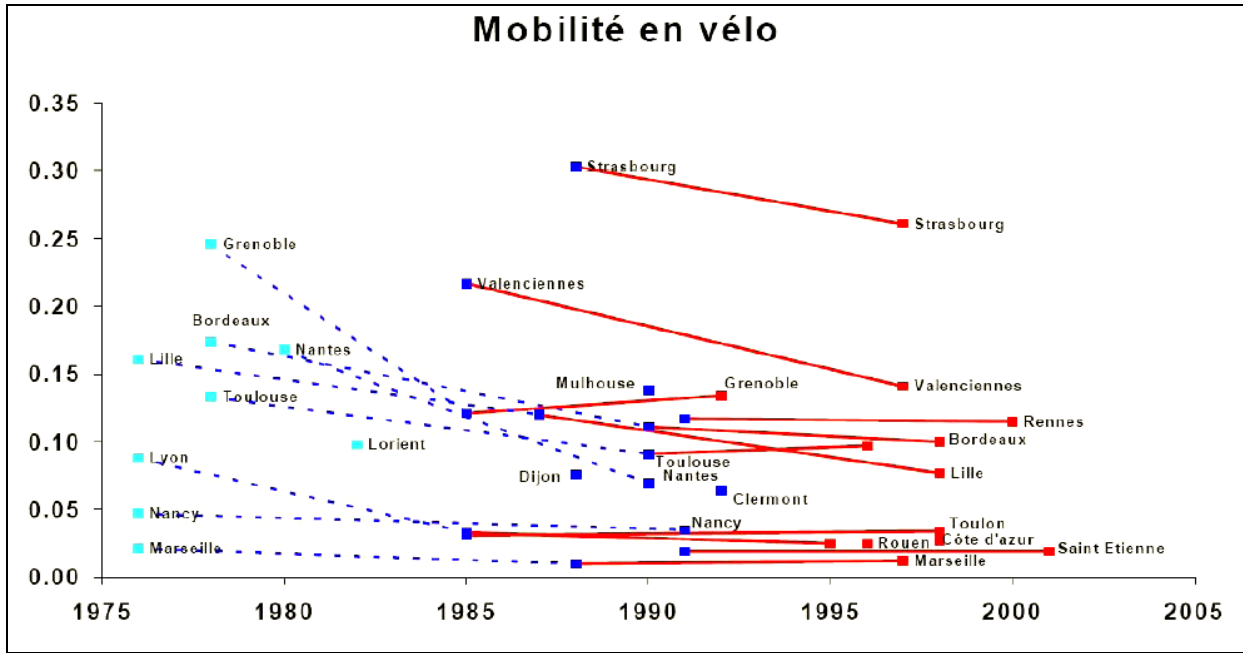
# ANNEXES

## Chapitre 1

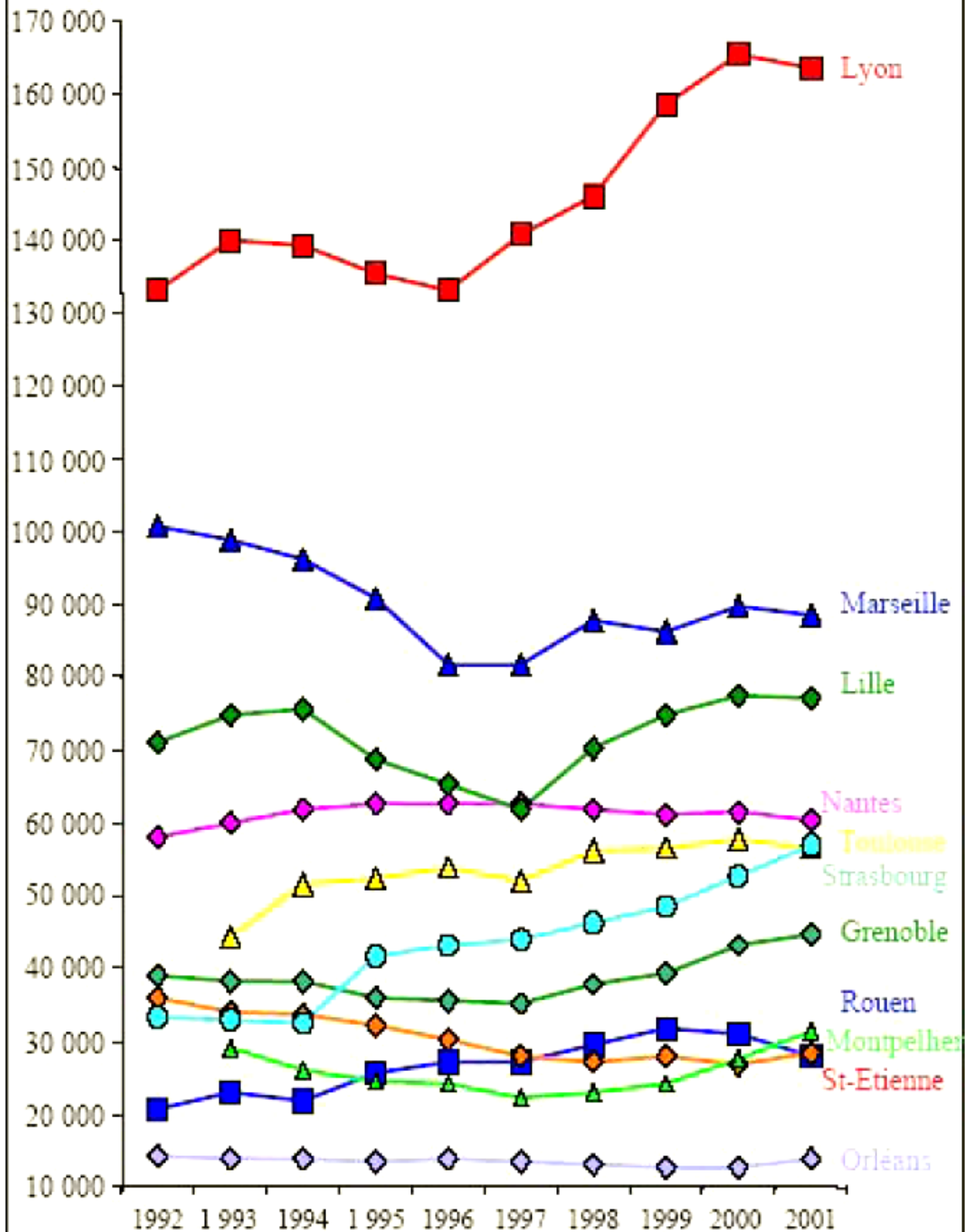
### La mobilité des années 80







## Évolution du trafic des réseaux à TCSP (déplacements en milliers par année)



### Évolution du trafic des autres réseaux (déplacements en milliers par année)

