

**SIMULATION DES PERFORMANCES D'EXPLOITATION
D'AUTOBUS ET DE TRAMWAYS EN SITE PROPRE
A GROS DEBIT : une étude de cas d'après des systèmes
exploités au Brésil et en Tunisie**

F. Kuhn, Rs.Ing. (*)

F.D. Michel, M.Sc (**)

L.A. Lindau, Ph.D. (**)

(*) Evaluation des Systèmes de Transport Automatisés et de leur Sécurité
(INRETS/ESTAS)
20, rue Elisée Reclus
59650, Villeneuve d'Ascq, France
Fax: 33 20 438359

(**) Escola de Engenharia (EE/UFRGS)
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Praça Argentina, s/n, 3 andar
90035-190, Porto Alegre, Brasil
Fax: 55 51 2271807

1. INTRODUCTION

Le problème du transport de masse se pose avec de plus en plus d'acuité aussi bien dans les grandes métropoles que dans les villes de taille moyenne. Les systèmes de capacité intermédiaire peuvent être complémentaires d'un réseau de métro lourd dans les grandes métropoles et bien adaptés aux axes lourds de réseaux de T.C. dans les villes de taille moyenne. Parmi ces agglomérations, il y a un large créneau d'axes sur lesquels la demande se situe entre 10000 et 30000 pas./h./sens. On trouve pour transporter ces débits deux types de systèmes capables de répondre à ce niveau de demande : le métro léger et l'autobus en site propre. Il y a encore peu de systèmes d'autobus en site propre et encore moins de métros légers à travers le monde qui sont utilisés pour transporter de tels débits malgré le regain d'intérêt pour le métro léger à travers le monde. En 1975, il y avait 300 réseaux de tramways, en 1993 ce nombre s'est élevé à 330 et les prévisions pour l'an 2000 sont estimées à 400 réseaux (Kühn, 1994). De nombreux avantages découlent de l'adoption d'une technologie autobus ou tramway, la souplesse et le coût pour l'autobus et l'assurance. Nous nous proposons dans cette communication d'explorer plus avant les possibilités qu'offrent les deux systèmes, autobus en site propre et métro léger., d'analyser les performances d'exploitation possibles pour comparer les avantages et inconvénients de chacun des deux systèmes du point de vue de la capacité. La méthodologie de cette étude repose principalement sur l'utilisation de modèles informatiques alimentés par des données mesurées sur site ou obtenues auprès d'exploitants par le Département Outre-mer du "Transport Research Laboratory" (TRL, UK), par l'Université Fédérale du Rio Grande do Sul (UFRGS, Porto Alegre) et par l'INRETS.

Les différentes étapes de l'étude ont été :

- rassembler les données relatives aux systèmes d'autobus en site propre pour calibrer le modèle existant Busway : les données du TRL et les données recueillies par l'UFRGS sur les convois d'autobus de Porto Alegre nous ont permis de calibrer le modèle.
- rassembler les données relatives aux systèmes de métro léger qui ont un trafic élevé c'est à dire en PED (Tunis, Alexandrie, Le Caire, etc.) ou en Europe orientale (Leipzig, Prague, Budapest), pour permettre de calibrer et valider le modèle Busway.
- adapter le modèle Busway, écrit initialement pour évaluer les systèmes d'autobus, en établissant des sous-programmes qui sont incorporés dans le modèle Busway pour évaluer les performances des métros légers.
- définir un corridor type pour la simulation, c'est à dire constituer les bases sur lesquelles ont été testés les systèmes d'autobus et de métro léger.
- calibrer et valider le modèle Busway pour les systèmes de métro léger.
- calibrer le modèle Busway pour les systèmes d'autobus.
- évaluer les performances d'exploitation en utilisant les plans d'expériences.
- analyser les résultats.

2. DEUX SYSTEMES DE CAPACITE INTERMEDIAIRE

2.1. L' autobus en site propre

De nombreuses villes ont déployé des efforts croissants pour accorder aux autobus la priorité sur le trafic individuel afin de rendre à ce type de système de transport ponctualité, fiabilité et rapidité. Grâce à des voies réservées, à la priorité aux feux de circulation et à des techniques perfectionnées pour la minimisation des temps d'immobilisation aux arrêts on obtient pour l'autobus sur voie réservée des performances proches de celles des tramways et même du métro. (Heunemann *et al.*, 1993). Les critères pour l'adoption de l'une ou l'autre des mesures de priorité varient normalement selon le volume horaire d'autobus et de voyageurs.

Différents types de sites permettent de donner une certaine priorité à la circulation des autobus, absolue dans le cas d'un site propre intégral et non prioritaire dans le cas d'un site banalisé, on trouve ainsi une grande variation de niveaux de service.

Une étude (Gardner *et al.*, 1991) concernant 8 Busways parmi 40 identifiés à travers le monde montre qu'un axe de site propre pour autobus "Busway" comportant 2 couloirs par sens et desservant des stations très fréquentées mais sans mesures d'exploitation spéciales peut transporter 11 à 15 000 pas./h/sens selon les conditions locales. 5 sur les 8 busways étudiés transportaient des flux de 15 000 pas./h/sens ou plus dans la direction de montée critique et 3 transportaient 18 000 pas./h/sens. Le record du nombre de passagers a été de 26 000 pas./h/sens à Porto Alegre. Pour atteindre ces capacités, il est nécessaire d'avoir des conditions particulières dans les stations : ainsi à Sao Paulo, les autobus peuvent doubler dans diverses stations, mais par contre à Porto Alegre non, mais l'ordonnancement des convois d'autobus permet de réduire le temps de montée des voyageurs dans les stations de la ligne Assis Brasil. La technique des autobus organisés en convois appelée COMONOR (COMbois de ONibus ORdenados, autobus ordonnés en convois) nécessite que les autobus soient ordonnés à l'entrée du "busway", selon la fréquence des lignes, une organisation des arrêts selon la destination des usagers, chaque bus venant se placer au droit de l'arrêt qui le concerne, la position du bus dans le convoi en mouvement étant la même que celle dans la station. Le principe est de minimiser les temps d'arrêts en ayant des autobus qui démarrent et s'arrêtent presque simultanément. Par exemple, chaque ligne et chaque autobus sont placés dans un des 3 groupes A-B-C et les autobus sont rangés autant que possible dans l'ordre correct au début du "busway" où se trouve un feu de signalisation donnant le départ. Cette organisation couplée à la possibilité de doubler au droit des arrêts permet d'accroître la capacité de la ligne et la vitesse commerciale des systèmes de transport par autobus. Cette organisation garde une certaine souplesse et permet de choisir différentes longueurs de convois (jusqu'à 9 autobus), convois complets ou incomplets en fonction de l'arrivée des autobus à l'entrée du couloir.

2.2. Le métro léger

On observe, depuis quelques années, un intérêt grandissant pour le tramway ou le métro léger. Les réalisations et mises en exploitation récentes présentent un bilan positif en terme de trafic, de résultats d'exploitation et en terme d'impact sur l'agglomération desservie. Le métro léger, ou tramway moderne en site propre, constitue aujourd'hui, par delà les innovations techniques concernant le matériel roulant, un véritable système de transport avec ses infrastructures propres et ses méthodes d'exploitation. Il apparaît, à ce titre, comme axe lourd de réseaux hiérarchisés de transport collectif, dont il constitue, soit l'axe principal, soit un axe secondaire en site propre, entre métros et chemins de fer, d'une part, et les réseaux d'autobus d'autre part. La fluidité de la circulation des véhicules d'un système de métro léger est très importante et notamment l'incidence du nombre de conflits entre le métro léger, la circulation générale et les piétons. Aussi la tendance des réseaux existants et des lignes nouvelles est d'accroître les tronçons en site propre ou séparé de leurs lignes de métro. Le niveau de priorité accordé aux véhicules doit être modulé en fonction du débit sur la ligne, inférieurs à 30 véh./h/sens, le franchissement des carrefours s'effectue à niveau avec un bon degré de priorité donné au tramway : régularité et vitesse sont maximales; compris entre 30 et 60 véh./h/sens, le fonctionnement des feux de circulation ne peut plus accorder une priorité élevée. Des débits supérieurs à 60 véh./h/sens sont parfois observés en marche à vue sur une voie réservée mais très rarement car ils conduisent à des difficultés d'échanges aux stations, à des pertes de capacité et à une diminution sensible de la vitesse commerciale. La prise en compte des métros légers dans les stratégies de régulation des feux permet de donner à ces véhicules une importance particulière en rapport avec les flux de déplacements de personnes qu'ils permettent.

Les systèmes de métro léger des pays en développement se différencient de ceux des pays développés par les conditions de leur exploitation : en effet, la charge des véhicules et des stations, le respect de la séparation des sites utilisés par la circulation générale et le métro léger, la prise en compte ou non des véhicules aux feux, etc., constituent différentes contraintes qui font qu'un système fonctionne bien en Europe avec une charge moyenne et fonctionne mal en PED avec une très forte charge en atteignant très rapidement ses limites bien en dessous des objectifs théoriques prévus lors de la mise en place du projet.

Le métro léger avec des capacités unitaires de 340 à 900 places, offre des capacités qui se situent entre 5000 et 45000 pas./h/sens. Pour des capacités maximum, au delà de 30 passages/heures, le métro léger doit être entièrement isolé des autres circulations urbaines et doté d'une signalisation de régulation et de protection.

3. LE MODELE BUSWAY

Busway a été développé pour effectuer la simulation de couloirs d'autobus pour un flux plus ou moins important de véhicules (Lindau, 1983), puis a été adapté pour simuler l'exploitation de lignes de métro léger. Ce modèle permet l'évaluation des effets de l'adoption de diverses configurations telles que les caractéristiques géométriques de la voie, les contraintes de contrôle de feux, de montée/descente et de trafic.

La méthode de simulation consiste à engendrer individuellement des véhicules en leur attribuant les caractéristiques de distribution de trafic tenant compte des caractéristiques géométriques du tronçon : le modèle réévalue à chaque seconde toutes les caractéristiques cinématiques des véhicules, pour une période d'exploitation d'une heure et détermine, à partir de fonctions probabilistiques, leurs caractéristiques de dégagement (comme la vitesse d'insertion, la vitesse maximum désirée, l'accélération, la désaccélération) puis les procédures basées sur le comportement du véhicule qui suit sont utilisées pour réévaluer la position de chaque véhicule à chaque seconde. Le modèle Busway peut donc évaluer, par exemple, pour chaque véhicule, toutes les modifications du contrôle des feux, toutes les influences provenant d'un autre véhicule et aussi, toutes les conditions de montée/descente de voyageurs dans les stations, représentant des trajectoires sensibles à ces modifications.

Le modèle est constitué par 3 modules différents, le premier relatif aux caractéristiques géométriques du trafic et à l'introduction des véhicules, le deuxième exécutant les calculs répétitifs chaque fois que le temps s'accroît et gérant toutes les données de sortie, le troisième étant responsable de l'interface entre l'utilisateur et le modèle. Le deuxième module ou "simulateur" commande trois fonctions de base pour la simulation qui se rapportent à la modélisation de l'arrêt du véhicule dans les stations, au passage des véhicules aux feux et à la détermination des différentes vitesses avec lesquelles les véhicules roulent pendant le déroulement de la simulation.

Dans le cas d'un arrêt, Busway calcule pour chaque station le temps pendant lequel chaque véhicule s'arrête en attendant les montées et les descentes des voyageurs plus un temps mort (ouverture et fermeture des portes, attente du voyageur, etc.). Ce temps est calculé en fonction d'une distribution de volume de voyageurs qui montent dans chaque véhicule, du temps moyen de montée d'un voyageur (ou une relation entre montée et descente) et en fonction d'une distribution des temps morts en station.

En ce qui concerne les vitesses, Busway effectue une évaluation de l'itération entre 2 véhicules. Pour cela il calcule, pour chaque seconde, la vitesse de chaque véhicule en fonction d'une distribution pour l'ensemble du tronçon ou d'une distribution pour chaque interstation de vitesse de consigne, de l'accélération, et d'autres paramètres qui sont utilisés dans les équations du modèle "des véhicules qui se suivent". Tous les calculs prennent aussi en compte, au delà des caractéristiques cinématiques de chaque véhicule, la position de celui-ci par rapport à la station la plus proche, par rapport au premier feu où le véhicule doit s'arrêter (feu rouge) et la position du véhicule qui est devant lui.

4. LE CALIBRAGE DU MODELE

La procédure de calibrage permet d'ajuster les paramètres ou constantes du modèle afin qu'il puisse représenter autant que possible la réalité. Pour cela il est important de collecter des données sur les caractéristiques du système qui vont être modélisées. Dans notre cas, les données ont été recueillies sur le site du busway de Farrapos à Porto Alegre (Brésil) pour les autobus et sur la ligne 1 du métro léger de Tunis pour les tramways. Le métro léger de Tunis est un système moderne réalisé dans un pays en développement dont le réseau est en

progression constante depuis la première mise en service en 1985. Il en est de même pour l'exploitation des autobus sur l'axe lourd de Farrapos. Les procédures de calibrage et les chronométrages effectués sur les deux sites ont fait l'objet de la même procédure (Kühn et Michel, 1993).

Les résultats de la simulation obtenus sur un tronçon de 6123 m comportant 8 stations et 3 carrefours à feux avec détection de la ligne 1 du Métro léger de Tunis sont résumés dans le tableau 1 ci dessous, ils sont représentatifs de la réalité de l'exploitation non seulement pour la moyenne de la vitesse commerciale obtenue mais aussi pour l'écart type.

Paramètres	Réalisation		Simulation	
	moyenne	écart type	moyenne	écart type
Vitesse Commerciale en km/h	17,01	2,59	17,36	1,51
Temps d'arrêt par station en sec.	52,13	36,02	46,77	20,82

Tableau 1 : Comparaison des valeurs réelles et simulées de la Vc.

5. LES PARAMETRES DE LA SIMULATION

La définition de conditions équivalentes d'expérimentation pour deux technologies différentes à comparer reste difficile. Nous avons retenu un site commun incorporant les caractéristiques moyennes des bus en site propre et des tramways. Les paramètres pour les bus proviennent d'une étude conduite par le TRL (Gardner *et al*, 1991) et de l'expérience brésilienne (Szasz, 1978; Lindau, 1983). Les paramètres de tramways ont été définis à partir de données recueillies à Tunis (Kühn et Michel, 1993) et en Europe (Gardner *et al*, 1993). Le tronçon simulé de 7 km reliant le centre ville à une banlieue de forte densité essaie de garder, autant que possible, des conditions de base similaires pour l'exploitation des bus ou des tramways. La période de simulation correspond à l'heure la plus chargée de l'après midi, lorsque les montées sont concentrées dans les stations du centre ville. De manière à comparer les performances des autobus et des tramways, un plan d'expériences a été établi (Nanni et Ribeiro, 1992; Simoes, 1993). Cette méthodologie permet d'étudier l'influence de plusieurs facteurs sur une variable dépendante choisie dans ce cas comme la vitesse commerciale, Vco. Les facteurs concernés par l'expérimentation sont :

Facteur 1 : vitesse moyenne désirée	(Vde) m/s
Facteur 2 : le temps mort dans les stations	(Tmor) s
Facteur 3 : le temps moyen de montée par voy.	(Tmont) s/pas
Facteur 4 : la demande max. en pas/h	(Dem) pas./h
Facteur 5 : le flux de véhicules à l'heure	(Flux) veh/h
Facteur 6 : distance moyenne entre stations	(Dst) m
Facteur 7 : distance moyenne entre feux	(Dfeu) m
Facteur 8 : utilisation de convois; longueur veh.	(Lgv) - ; m
Facteur 9 : type de feux; durée du cycle	(Tfeu) - ; s

Vde représente la vitesse de consigne qu'adopte le conducteur en l'absence de conflit; des valeurs limites ont été déterminées à partir de données recueillies à Tunis et à Grenoble pour le tramway et Porto Alegre pour l'autobus. **Tmor** représente le temps perdu avant et après la montée/descente des passagers aux stations; des valeurs ont été définies à partir d'études du TRL (bus) et d'après les relevés à Tunis (Tram). **Tmont** définit le temps moyen de montée pour un passager; l'intervalle est estimé à la fois pour le bus et le tram à partir des courbes du TRL et TRB (National Research Council, 1985). **Dem** représente le volume total de passagers montants dans les stations pendant l'heure de pointe dans la direction la plus chargée; la valeur maximum a été fixée au dessus de celle trouvée par le TRL pour un système de tramway, c'est à dire 16500 pass./h/dir. à Leipzig; la valeur limite pour les bus se

base sur la demande observée sur les sites propres brésiliens. **Flux** indique le débit horaire de véhicules nécessaires pour transporter la demande; la gamme de valeurs prend en compte les débits constatés au Brésil pour le bus, et un intervalle minimum de 1 minute pour le tramway. **Dst** caractérise l'espacement entre stations; l'intervalle pour l'étude a été défini en fonction des observations de l'INRETS et du TRL sur plusieurs sites propres. **Dfeu** définit l'espacement entre les carrefours à feux; de la même façon que pour les stations, il a été défini à partir des systèmes existants. **Lgv** indique le type de véhicules utilisé, dans le cas des bus l'utilisation ou non de convois, dans le cas des trams l'utilisation d'unité multiple ou non; la longueur des bus a été spécifiée à partir des données de l'UITP (1978). **Tfeu** s'applique aux autobus lorsque les durées de temps de feux sont fixes et que les décalages entre feux sont déterminés avec ou sans onde verte.

Site Propre	Niveau	Vde m/s	Tmor sec.	Tmon sec.	Dem pas/h/ dir	Flux véh/h/ dir	Dst m	Dfeu m	Lgv typ conv	Tfeu régul.
	-2	6	5,00	1,50	7500	150	300	200		
	-1	8,65	11,25	2,13	11875	200	375	400	11sco	90sov
Bus	0	11,30	17,50	2,75	16250	250	450	600	11acc	60aov
	1	13,95	23,75	3,38	20625	300	525	800	11aci	90aov
	2	16,60	30,00	4,00	25000	350	600	1000		
	-2	7,00	4,0	1,50	7500	10	400	200		
	-1	9,25	10,5	2,13	10625	22	550	400	30	
Tram	0	11,50	17,0	2,75	13750	35	700	600		
	1	13,75	23,05	3,38	16875	47	850	800	60	
	2	16,00	30,00	4,00	20000	60	1000	1000		

Tableau 2 : Valeurs des paramètres pour les différents niveaux

Nota : sco = sans convoi

acc = avec convoi complet

aci = avec convoi incomplet

sov = sans onde verte

aov = avec onde verte

90 = cycle de 90 sec.

6. COMPARAISON DES PERFORMANCES DES 2 SYSTEMES

Nous avons décidé d'utiliser un plan factoriel fractionné connu comme "Second order composite design" (SOCD) project (Box and Draper, 1987). En effet, avec un plan factoriel complet on aurait dû réaliser plus de 50000 simulations avec Busway et certaines combinaisons n'apparaissent certainement pas dans les conditions réelles d'exploitation. Pour chaque configuration, 3 simulations ont été répétées en choisissant de façon aléatoire les données ce qui représente mieux la nature stochastique des événements. L'utilisation du plan factoriel fractionné nous a permis de réduire le nombre total de configurations ainsi pour le tramways 64 configurations soit 192 simulations ont été effectuées; pour l'autobus 48 configurations soit 144 simulations ont été effectuées.

Les résultats obtenus avec Busway ont été évalués à partir de l'analyse de la variance et des techniques de régression multiple. L'analyse de variance permet d'identifier les facteurs significatifs, les termes quadratiques et les interactions qui influencent la variable dépendante c'est à dire la vitesse commerciale. La technique de la régression multiple permet d'exprimer la variable dépendante comme fonction des facteurs exprimés dans le tableau 2.

Dans le plan d'expérience, le nombre de stations et de feux est plus important dans le centre de l'agglomération, les stations sont aussi plus fréquentées dans le centre qu'en périphérie. Le modèle complet obtenu dans le cas du tramway s'écrit :

$$Vco = 21,75 + 2,14 Vde - 1,30 Tmor + 0,40 Tmor^2 + 1,45 Dst + 0,99 Lgv - 0,61 Tmont + 0,22 Tmon^2 + 0,93 Flux - 0,24 Flux^2 - 0,46 Dem + 0,19 Dem^2 + 0,27 Dfeu - 0,80 Tmor * Dem + 0,71 Flux * Dfeu + 0,45 Dfeu * Tmor + 0,38 Lgv * Tmor + 0,34 Lgv * Vde + 0,32 Tmor * Tmont$$

avec un coefficient de détermination, $R^2 = 0,97$

Le modèle complet dans le cas de l'autobus, s'écrit :

$$V_{co} = 14,81 + 1,23 V_{de} - 0,23 V_{de}^2 - 0,95 T_{mor} - 0,64 T_{mont} - 0,27 Flux - 0,64 Dem + 0,48 Dst + 0,80 Dfeu - 0,65 Lgv - 0,10 T_{feu} + 0,21 Dst * Dfeu + 0,10 Dst * Lgv + 0,14 Flux * Dem + 0,21 T_{mor} * Dem - 0,20 Flux * V_{de} - 0,14 T_{mont} * Dem - 0,22 T_{mor} * V_{de} - 0,09 T_{mor} * Dst - 0,11 Dem * Dst + 0,10 V_{de} * Dst - 0,17 Dem * Dfeu + 0,16 V_{de} * Dfeu + 0,16 Dem * Lgv - 0,28 V_{de} * Lgv$$

avec un coefficient de détermination , $R^2 = 0,96$

Une bonne estimation de la vitesse commerciale des systèmes autobus et tramway peut être obtenue à partir des expressions ci-dessus, en introduisant les valeurs des niveaux correspondantes à la valeur de chaque facteur "Vde, ..., "Lgv" dans l'équation correspondante au modèle obtenu.

Le tableau 3 présente les valeurs des coefficients associés aux termes linéaires du modèle de régression : l'analyse de ces valeurs permet d'évaluer l'importance de chaque terme sur la vitesse commerciale. Les problèmes d'échelle ont été évités en utilisant des valeurs codées pour chaque variable; ainsi le signe et la grandeur du coefficient indiquent quel est son effet +/- sur la vitesse commerciale. Par exemple dans le cas de l'autobus, le coefficient pour la vitesse de consigne est + 1,23 c'est à dire si la vitesse passe du niveau 0 (11,30 m/s) au niveau +1 (13,95 m/s), la vitesse commerciale augmentera de 1,23 m/s.

Facteurs	Notation	Tramway	Busway
F 1 : vitesse moyenne désirée	Vde en m/s	2,14	1,23
F2 : temps mort dans les stations	Tmor s	- 1,30	- 0,95
F3: tps moy de montée par voy	Tmont s/pas	-0,61	-0,64
F 4: la demande max. en pas/h	Dem pas./h	-0,46	-0,64
F5: flux de véhicules à l'heure	Flux veh/h	0,93	- 0,27
F6: distance moy entre stations	Dst en m	1,45	0,48
F7: distance moyenne entre feux	Dfeu en m	0,27	0,80
F8: utilisation de convois; longueur véhicule.	Lgv - ; m	0,99	- 0,65
F 9 : type de feux; durée du cycle	Tfeu - ; s	n.a.	n.s.

Tableau 3 : Paramètres les plus significatifs à l'égard de la vitesse commerciale
Nota : n.s : n'est pas significatif ; n.a. : ne s'applique pas

7. DISCUSSION

Nous observons d'après simulation les vitesses commerciales de 2 systèmes en site propre exploités le long d'un axe lourd de 7 km. Les résultats doivent être interprétés comme une première approximation dans la comparaison des performances de ces systèmes. Les limites incluent la longueur de la section d'axe simulée; d'autres sections pourraient aussi faire l'objet d'une évaluation. La prise en compte des tramways aux carrefours à feu, lorsqu'il n'y a qu'un passage de rame par cycle de 30 à 60 rames/h , est très efficace. Dans le cas des autobus en site propre nous n'avons pas utilisé de prise en compte aux feux. La dispersion dans le temps perdu aux arrêts pour les autobus rend l'onde verte inefficace pour améliorer la vitesse commerciale des autobus. L'élément principal restrictif dans cette étude préliminaire est le

niveau maximum de la demande auquel ont été soumis l'autobus et le tramway c'est à dire respectivement 25000 et 20000 pas./h/sens. Aussi ces résultats doivent être interprétés avec précaution.

L'impact le plus important sur la vitesse commerciale à la fois pour l'autobus et le tramway vient du changement de vitesse de consigne, Vde. La conduite des véhicules étant manuelle et le site n'étant pas intégralement séparé des conflits avec les piétons et les voitures aux carrefours, les véhicules malgré les progrès techniques ne peuvent augmenter leur vitesse de consigne.

Le plan d'expérience montre aussi que plus les stations (Dst) et les carrefours à feux (Dfeu) sont éloignés, plus la vitesse commerciale augmente. L'impact des carrefours à feux est plus élevé pour les autobus puisqu'il n'y a pas de prise en compte aux feux pour les autobus dans cette étude.

Plus le temps mort (Tmor) et le temps de montée (Tmon) sont grands plus petite est la vitesse commerciale. Ceci renforce l'idée que l'on doit utiliser de meilleurs équipements pour améliorer les échanges ainsi : une ouverture de portes plus rapide, des portes plus larges, un niveau de quai et de plancher identiques, des systèmes de vente de tickets rapides, etc.

Le flux de véhicules (Flux) génère des effets de différent ordre sur la vitesse commerciale des trams et des bus. De gros débits d'autobus entraînent des retards par les queues qui se forment en entrée de stations tandis que le petit nombre de tramway comparativement n'entraînent pas de phénomène de queue. Un gros débit de tramways entraîneraient des retards aux carrefours à feux; La simulation n'a pas limité le temps de vert jusqu'à 60 véhicules/h.

L'augmentation de la demande (Dem) produit comme prévu une réduction de la vitesse commerciale. En relation avec la longueur des véhicules (Lgv) les premiers résultats montrent que plus les tramways sont longs, meilleure est leur vitesse commerciale, le nombre de portes plus grand permettant de réduire le temps d'arrêt en station.

8. BIBLIOGRAPHIE

8.1 Livres

Box, G.E.P. & Draper, N.R. (1987) *Empirical Model Building and Response Surfaces*. John Wiley and Sons, New York, USA.

Gakenheimer, R. (1994). *Role of the new transit in metropolitan transportation system*. Proceedings of the International Conference on the New Transit Systems and systems Presentation. The Korea Transport Institute. Pusan, Korea, 5-22.

Gardner G., P. R. Cornwell et J. A. Cracknell (1991) *Performance of high-capacity bus systems*. TRL Research Report 329, TRL.

Gardner G., Kühn F. (1992) *Appropriate mass transit in developing cities*, Communication 6ième WCTR, Lyon 92.

Gardner G., Kühn F., Rutter J. (1994), *The performance and potential of light rail transit in Developing Cities..* Project Report 69 R5596, TRL.

Heunemann G., and al. (1993), *Priorité aux autobus dans les zones denses*, Rapport 5, 50e Congrès International Sydney 93, UITP.

Kühn F., Michel F.D. (1993) *Les performances d'exploitation du métro léger de Tunis*, Rapport INRETS-SMLT.

Kühn, F. (1994). *Comparison and evaluation of the new transit systems*. Proceedings of the International Conference on the New Transit Systems and systems Presentation. The Korea Transport Institute. Pusan, Korea, 27 - 58.

Lindau, L.A. (1983) *High-flow bus operation on urban arterial roads*. Ph.D. thesis, Faculty of Engineering and Applied Sciences. University of Southampton, England.

Lindau L.A. (1987) Bus priority systems in Brazil : from theory to practice, séminaire annuel d'été du PTRC, Brighton.

Lindau L.A et Willumsen L.G. (1988) *How far can bus capacity be stretched ?* CODATU IV Jakarta.

Lindau L.A. (1992) Sistemas de transporte urbano de média capacidade : uma análise comparativa enfocando as tecnologias VLT e ônibus, ANPET 92.

Michel F.D., Kühn F. Lindau L.A. (1993), *Aplicação do modelo Busway na simulação do V.L.T. da Tunisia*, VII Congresso da ANPET, Escola Politécnica, USP 93.

Nanni L., Ribeiro J.L., (1992) *Planejamento e Avaliação de Experimentos* 2a. edição UFRGS.

Simoes L.O.(1993) *Tramway * Busway*, rapport de stage de DESS d'Ingénierie et numérique Université de Lille I effectué à l'INRETS - CRESTA.

Simoes L.O. (1993) *Application des plans d'expériences aux systèmes d'autobus en site propre*, INRETS-CRESTA.

Szasz P.A. (1978) *COMONOR : Comboio de Onibus ordenado*. Companhia de Engenharia de Tráfego, Boletim Técnico 9, Sao Paulo, Brasil.

TRB (1985), Special Report N°209 Highway Capacity Manual, chapter 12 Transit capacity.

ARMSTRONG-WRIGHT A. (1986), Urban transit systems : guidelines to examining options, World Bank Technical Paper 52, World Bank Washington D.C.

BARBIEUX C., KUHN F. (1990) Les atouts du Métro léger: critères de choix techniques et financiers, in CODATU V Sao Paulo.

BELL M. G.H. (1992) Future directions in traffic signal control, dept. of civil engineering, University in Transportation of Newcastle upon Tyne, vol. 26A N°4 pp303-313.

BENETT R., ELMBERG C.M.(1977) Priorité pour les Transports Publics, commission internationale de la circulation et de l'aménagement urbain, UITP 42ème Congrès International Montréal.

BONZ M. (1983) Insertion et réalisation de l'infrastructure des métros légers dans le tissu urbain, 45e Congrès International Rio de Janeiro commission 7.

CARN, A (1992) Les systèmes de priorité aux feux pour le transport en commun. CETUR, Paris.

COMONOR, Compagnie d'Ingénierie du trafic (1979) *Ordinated Bus Convoy*, PTRC Seminar G, 53,77. Université de Warwick, UK.

DAGNELI P. (1984) Principes d'expérimentation.

DAVID Y., KUHN F. (1986) Les transports guidés de surface : situation actuelle et perspectives, tome 3 Les réseaux de tramways et de métros légers en Amérique du Nord, INRETS-CRESTA.

GHANDRI S. (1993) Un modèle de simulation pour le métro léger de Tunis, rapport de stage effectué à l'INRETS-CRESTA, INRETS-SMLT 93.

GIPPS, P.G. (1981) A behavioural car-following model for computer simulation. Transportation Research, 15B.

GLAYRE P. (1987) Régulation des conflits rail-route sur le métro léger de Tunis, dans TEC N°81, Paris.

GROCHE G. (1984) Les métros légers dans le monde - UITP REVUE, 1984.

ITC, International Transit Compendium, Light Rail Transit, vol.IV, N°2.

RATP (1977) Autobus en site propre.

SAPORTA G. (1978) Théories et méthodes de la statistique.

UITP (1978) Caractéristiques essentielles des principaux types d'autobus urbains rencontrés actuellement sur le marché mondial, revue UITP, 4 annexes 313-9 p.

UITP (1981) Le métro léger moderne, 44° Congrès International, Dublin, Vol 7.

UITP (1983) Problèmes des services de pointe dans les transports régionaux par autobus dans de grandes agglomérations sélectionnées, 45° Congrès International, Rio de Janeiro, Vol 2.

UITP (1985) Attractivité et économie du métro léger de l'avenir, 46° Congrès International, Bruxelles, Vol 7.

UITP (1987) Confort des véhicules de métro léger et adaptation à l'environnement, 47° Congrès International, Lausanne, Vol 7.

UITP (1989) Orientations des Métros Légers, Bruxelles.

UITP (1989) Revitaliser les centres villes par les transports publics, Congrès International.

UITP (1989) Critères pour le choix des systèmes de métro léger, 48° Congrès International, Budapest, Vol 7.

UITP (1993) Transports Publics et Circulation, Orientations, 50° Congrès International Sydney.