

Ce rapport présente les principaux résultats d'une étude comparative entre deux systèmes de transport de capacité intermédiaire, l'autobus en site propre et le métro léger.

Cette étude des performances a été réalisée avec un modèle de simulation développé par L.A. Lindau de l'UFRGS (Université Fédérale de Rio Grande do Sul, Porto Alegre Brésil) : cette étude a été effectuée au titre de la recherche sur les systèmes de transport de capacité intermédiaire en cours à l'INRETS, au TRL et à l'UFRGS - PPGE (Programa de Pos-Graduação em Engenharia de Produção).

Nous remercions M. RIBEIRO J.L. de l'UFRGS qui nous a aidé et conseillé tout au long de l'étude sur l'utilisation des plans d'expériences et des outils statistiques.

Nous remercions M. LINDAU L.A. qui nous a constamment orienté en ce qui concerne l'utilisation du modèle et nous a fait partager son expérience de l'exploitation des autobus en site propre au Brésil.

SOMMAIRE

Chapitre	page
Sommaire	
1. Introduction	1
2. Les autobus en site propre	2
2.1 Les couloirs réservés aux autobus	3
2.2 Les sites propres pour autobus	4
2.3 La capacité d'un système d'autobus en site propre	8
2.4 Priorité aux feux de circulation	9
3. Le métro léger	11
3.1 La capacité d'un système de métro léger	12
3.2 Les conditions d'exploitation	13
3.3 Les sites d'implantation	13
3.4 Priorité aux feux de circulation	18
3.5 Les arrêts ou stations	19
4. Définition des paramètres de performances	21
4.1 Vitesse commerciale	21
4.2 Temps de circulation entre arrêts	21
4.3 La fréquence d'exploitation	22
4.4 Distance entre arrêts, et entre arrêts et feux	22
4.5 Conditions de trafic	23
4.6 Temps d'arrêt	23
4.7 Conception des véhicules	23
5. Le modèle Busway	25
5.1 Historique de BUSWAY	25
5.2 Approche de la simulation	26
5.3 Caractéristiques du modèle BUSWAY	26

5.4 Paramètres nécessaires pour la simulation	27
5.5 Sorties et résultats de BUSWAY	29
5.6 Calibrage du modèle BUSWAY	33
6. Plans d'expériences	35
7. Etude des performances d'exploitation d'un couloir existant	40
7.1 Etude du cas du métro léger	40
7.2 Etude du cas de l'autobus en site propre	59
8. Etude des performances d'exploitation sur un couloir fictif	69
8.1 Recherche d'un couloir	69
8.2 Etude du cas du métro léger	76
8.3 Etude du cas de l'autobus en site propre	83
9. Conclusion générale	100
Bibliographie	102
Annexes	106

LE METRO LEGER ET L'AUTOBUS EN SITE PROPRE

COMPARAISON DES PERFORMANCES D'EXPLOITATION DE DEUX SYSTEMES DE TRANSPORT URBAIN DE CAPACITE INTERMEDIAIRE

1. Introduction.

Le problème de transport de masse se pose avec de plus en plus d'acuité dans un grand nombre de villes multimillionnaires, mais aussi dans de nombreuses villes de taille moyenne, tant dans les pays industrialisés que dans les pays en développement.

En effet, pour l'ensemble des aménageurs, l'organisation des déplacements s'est confondue depuis une trentaine d'années avec les mesures tendant à accroître les possibilités de circulation et de stationnement des voitures particulières. La politique d'accroissement des espaces publics affectés à l'automobile s'est trouvée progressivement contrariée par la saturation des espaces disponibles et les réactions de l'opinion contre la dégradation de l'environnement et les contraintes financières croissantes des collectivités locales.

A défaut de pouvoir accroître le domaine affecté à la circulation, les efforts se sont orientés vers une meilleure utilisation de la voirie par la mise en place de plans de circulation, une gestion plus sophistiquée des feux de carrefours et une réglementation et une tarification du stationnement payant. Pour accroître la capacité de la voirie on a encouragé les personnes à utiliser les transports collectifs: c'est la rationalisation du domaine circulaire grâce au métro léger ou aux couloirs d'autobus.

Sur les principaux axes des plus grandes agglomérations, le métro et les trains de banlieue sont seuls capables de transporter de gros débits de passagers (plus de 30 000 pas./h/sens); dans des agglomérations de moindre importance où les débits sont plus modestes, différents systèmes de transport sont utilisés.

Parmi ces agglomérations, il y a un large créneau d'axes sur lesquels les débits de transport nécessaires à l'heure de pointe se situent entre 10 000 pas./h/sens et 30 000 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, aussi nous nous proposons d'explorer plus avant les possibilités qu'offrent ces deux types de systèmes.

Dans la présente étude nous analysons les performances d'exploitation possibles pour comparer les avantages et inconvénients de chacun des deux systèmes du point de vue de la capacité avant d'étudier ultérieurement les aspects coûts d'investissement, d'exploitation, la qualité de service, le confort et les nuisances de chacun des deux systèmes.

La méthodologie de cette étude repose principalement sur l'utilisation de modèles informatiques alimentés par des données existantes ou obtenues auprès d'exploitants. Une partie des données concernant les sites propres pour autobus ont été fournies par le département Outre-mer du "Transport Research Laboratory" (TRL), une autre par l'Université Fédérale du Rio Grande do Sul (UFRGS, Porto Alegre). En ce qui concerne les données du métro léger, une

enquête effectuée par le TRL et l'INRETS à Prague, Leipzig et Tunis puis par le TRL à Alexandrie, Le Caire, Budapest, Manille, Calcutta et Dalian (Gardner G. & al.,93) et enfin une étude des performances d'exploitation du métro léger de Tunis effectuée par l'INRETS nous ont permis d'alimenter les différentes simulations.

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 de l'est (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. Les autobus en site propre

L'autobus est, dans la plupart des réseaux de transport du monde, le moyen de transport public urbain le plus répandu; de mise en oeuvre souple, il s'adapte au mieux aux modifications des structures de la demande. L'autobus présente l'avantage particulier de ne pas nécessiter de voie propre mais de pouvoir au contraire utiliser la voirie générale. Cet avantage s'est toutefois transformé en un inconvénient majeur au fil des temps. En effet l'espace viaire ne suit pas le développement de la motorisation, de sorte que la capacité de la voirie est dépassée principalement dans les zones denses, non seulement aux heures de pointes mais de plus en plus toute la journée.

Cette évolution a fortement diminué l'attrait des transports publics et a entraîné une diminution du nombre de passagers et une augmentation du nombre d'utilisateurs de voitures individuelles.

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 (par exemple: la possibilité d'effectuer par les autobus un dépassement devant un arrêt où se trouvent d'autres autobus, parcours des autobus en convoi dans l'ordre de suite des lignes, etc.), on obtient pour l'autobus sur voie réservée des performances proches de celles des tramways et même du métro. (Henneman & al.,1993).

L'offre de places la plus élevée, par exemple à Porto Alegre, sur la ligne de Farrapos, voie réservée aux autobus, s'élève à 44 500 places à l'H.P. pour un flux de 378 autobus à l'heure (Gardner & al., 1991).

Parmi ces réseaux d'autobus, il y a plusieurs exemples de systèmes d'autobus circulant sur voies réservées, exploités en Amérique du Sud tels que ceux de Lima, Bogota, Curitiba, Porto Alegre, Recife, Belo Horizonte et Sao Paulo, en Amérique du Nord ceux d'Ottawa et de Pittsburg, en Europe ceux d'Essen, de Hamburg, de Wiesbaden et de Runcorn, en Afrique celui d'Abidjan, en Asie celui de Nagoya et en Océanie celui d'Adélaïde. Dans les villes brésiliennes de Porto Alegre et de Sao Paulo, ont été introduits des systèmes d'autobus exploités en convois, circulant en site séparé, transportant des volumes élevés de voyageurs avec des vitesses commerciales élevées par rapport à celles qui sont atteintes par l'autobus qui circule dans la circulation générale (Lindau, 1992).

Les performances extrêmes des réseaux d'autobus dans quelques villes du monde exigent un personnel nombreux : du point de vue économique la comparaison avec un système de transport sur rail est très défavorable en raison des coûts salariaux, tout au moins dans les pays développés. Par ailleurs le préjudice causé à l'environnement du fait de la densité élevée d'autobus vient s'ajouter aux coûts d'exploitation et ne milite pas en faveur d'un projet d'autobus en site propre de forte capacité pour une grande ville souvent déjà très polluée. Par contre le coût d'investissement (infrastructures et matériel roulant) est beaucoup plus important pour un système de transport sur rail.

Les mesures de priorité ayant les effets les plus favorables sur la circulation des autobus sont les couloirs réservés par rapport à la circulation générale, les sites propres ainsi que la priorité aux carrefours à feux.

2.1 Les couloirs réservés aux autobus

Les couloirs réservés aux autobus sont aménagés dans la largeur des chaussées existantes, en position axiale ou latérale (dans le même sens que la circulation générale ou à contresens), par la séparation d'une ou plusieurs voies de circulation : cette délimitation est effectuée à l'aide de signalisations horizontales (marquage à la peinture) généralement franchissables. Une utilisation minimale des couloirs réservés est nécessaire sinon les autres usagers de la voirie ne le respectent pas et avant de mettre en place un projet de couloir on doit toujours tenir compte de la situation locale.

Les couloirs longs et ininterrompus traversant plusieurs carrefours sont particulièrement efficaces. Des couloirs courts orientés dans le sens de la circulation générale sont très fréquemment aménagés devant les feux de circulation, permettant aux autobus de tourner au carrefour dès qu'il obtient le vert sans perte de temps.

La signalisation par feux aux carrefours

Une signalisation séparée pour les autobus leur permet de franchir, avant le départ de la circulation générale, le carrefour. Dans le cycle de signalisation, il y a une phase en général très courte pendant laquelle l'autobus peut franchir le carrefour, cette phase réduit la capacité du carrefour.

Un système de sas permet également à un autobus circulant dans un couloir central de tourner à droite, ou à un autobus circulant dans un couloir situé à droite de tourner à gauche : le sas constitue ainsi une alternative aux signaux spéciaux.

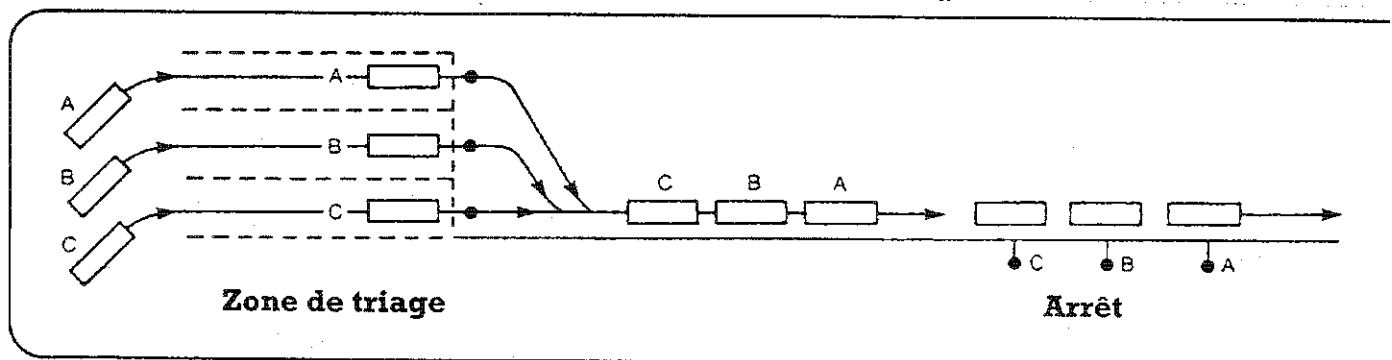
La configuration des arrêts

Outre la capacité des carrefours, la capacité des arrêts détermine également celle d'un couloir d'autobus. Lorsqu'il y a superposition de lignes d'autobus express et normales, la

possibilité de dépassement à proximité des arrêts à fréquentation élevée est indispensable s'il n'y a pas d'arrêt commun.

Il devient inévitable pour réduire le temps d'arrêt dans les stations à fréquentation élevée de prévoir plusieurs positions d'arrêt.

A Porto Alegre, on pratique le système d'ordonnancement des autobus à l'entrée des couloirs d'autobus partant du centre et desservant la banlieue. Lors de leur entrée dans le couloir, les autobus des différentes lignes sont ordonnés conformément à la disposition des points d'arrêt des différentes lignes. Les usagers se répartissent selon les différentes positions d'arrêt, on parvient ainsi à des temps de stationnement minimaux aux arrêts. Une aire de manoeuvre est aménagée à l'entrée du couloir d'autobus pour permettre le tri des autobus dans l'ordre des différentes positions d'arrêts. L'ordre de départ est donné par des signaux à commande manuelle dans chaque couloir. La mise en oeuvre de ce système permet d'atteindre 18300 pas./h/sens (sens montant l'après midi) à 26100 pas./h/sens (sens descendant le matin) sur le couloir Assis Brasil. Ce système est très efficace lorsque les usagers sont très nombreux à vouloir monter aux arrêts du centre-ville.



Source : COMONOR, 1979.

Ordonnancement des autobus pour augmenter la capacité des couloirs d'autobus fortement chargés.

Une autre possibilité de pré-triage des passagers est l'indication de l'ordre d'arrivée des bus aux arrêts principaux. Des détecteurs sont installés en amont de l'arrêt (boucles dans le couloir ou balises infrarouges en bord de chaussée). On doit alors installer des émetteurs dans les autobus ce qui entraîne des coûts importants pour les parcs d'autobus des grands réseaux de pays en développement (Henneman & al., 1993).

2.2 Les sites propres pour autobus.

Des routes conçues et construites spécialement pour les autobus (busways) sont exploitées dans quelques villes à travers le monde : ainsi à Ottawa (Canada, 31 km), Pittsburgh (USA, 18 km), Port d'Espagne (Trinidad, 16 km), Redditch (GB, 13 km), Runcorn (GB, 21 km), Istanbul (Turquie, 6 km), Adélaïde (Australie, 12 km), etc.. Certains de ces sites propres sont conçus pour pouvoir recevoir ultérieurement une plateforme de métro léger.

Les différents types de site utilisés

Les critères pour l'adoption d'une ou l'autre des mesures de priorité varient normalement selon le volume horaire/jour d'autobus et de voyageurs.



Photo 1 : Un site propre pour autobus situé au centre d'un boulevard à Porto Alegre.

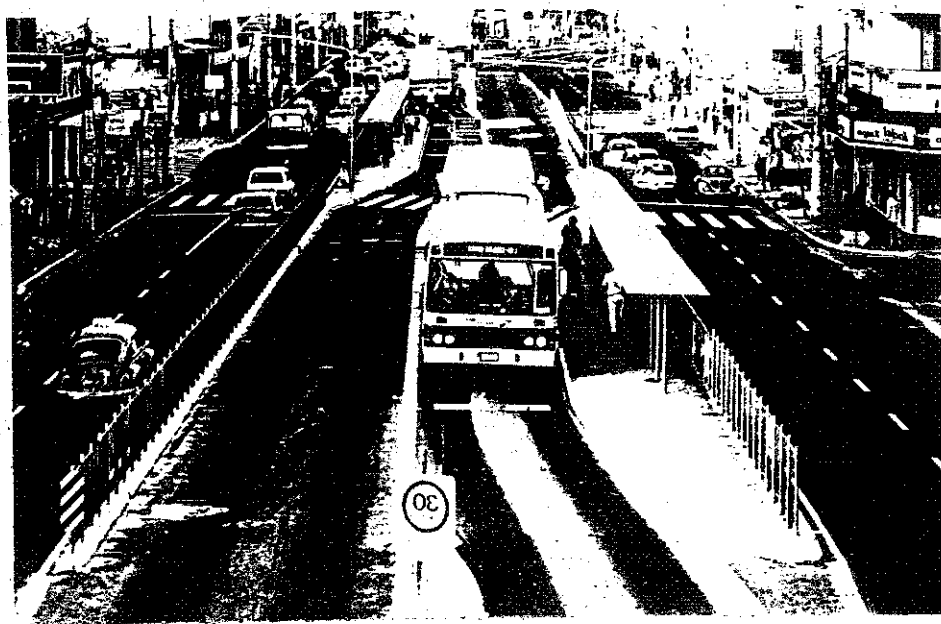


Photo 2 : Un arrêt d'autobus avec 3 places pour autobus à Porto Alegre.



Photo 3 : Entrée du couloir organisé avec des places sur lesquelles les bus attendent le feu vert d'entrée dans le couloir à Porto Alegre.

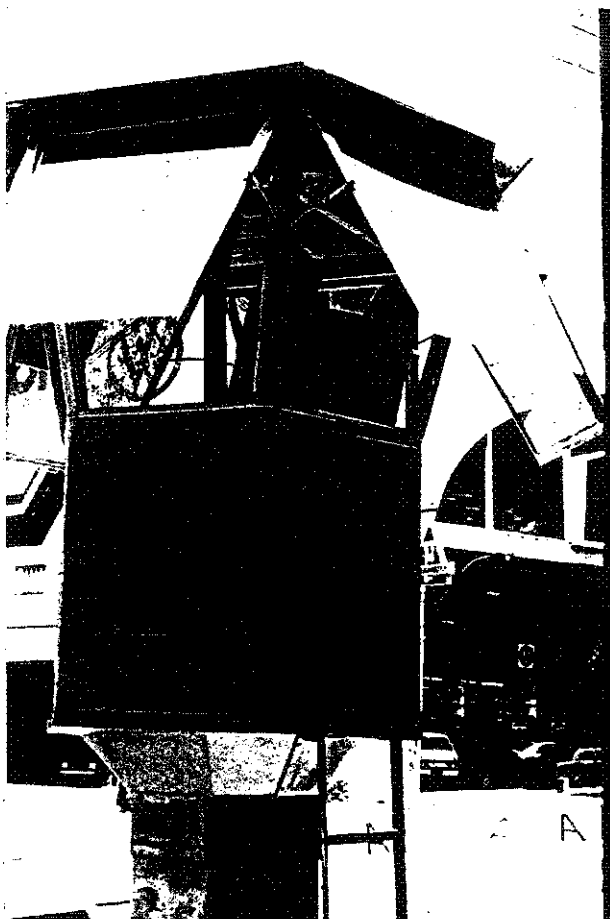


Photo 4 : Mirador à l'entrée d'un couloir permettant de contrôler l'arrivée des bus et de donner le signal d'entrée dans le couloir à Porto Alegre au moyen de feux.

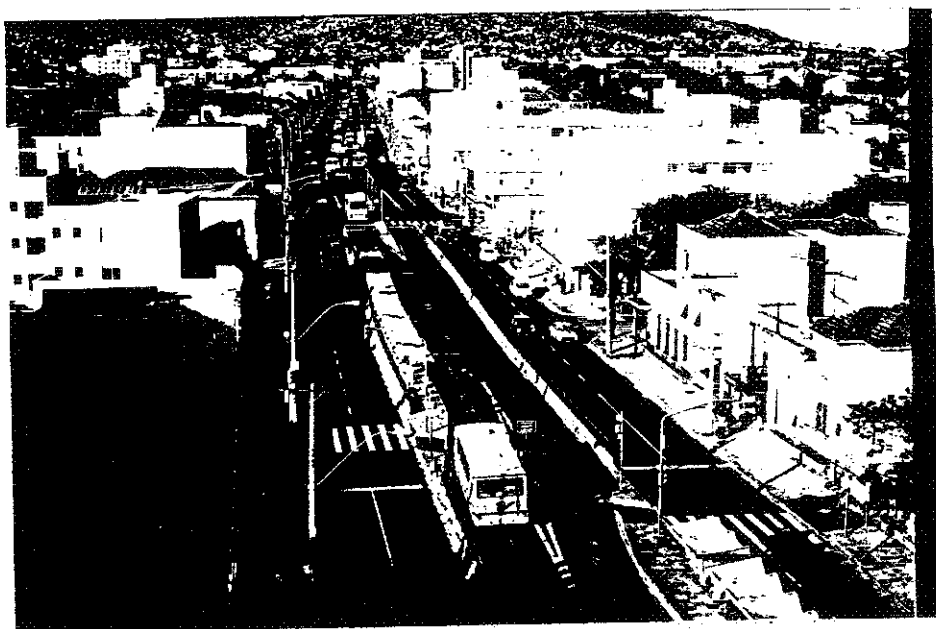


Photo 5 : Un couloir d'autobus dans l'axe du boulevard à Porto Alegre avec un arrêt .



Photo 6 : La station d'Obirici sur l'axe de Farrapos avec 6 places pour autobus.

Différents types de sites permettent de donner la priorité à la circulation des autobus :

1. L' autobus en site propre intégral c'est à dire une séparation totale, obtenue par dénivellation (en tunnel ou sur viaduc), ce site est seulement utilisé pour la circulation des autobus et éventuellement les services de sécurité.

2. L'autobus en circulation séparée, obtenue avec l'introduction des tronçons en site propre dans le terre-plein central des avenues, comme dans le cas des villes de : Curitiba, Sao Paulo, Porto Alegre, Salvador et Goiânia. La circulation des autobus reste longitudinalement séparée des autres véhicules, mais les carrefours sont à niveau et il n'existe pas de séparations physiques infranchissables pour les piétons qui traversent les avenues.

3. L' autobus circulant en site réservé ou couloir réservé (cf le § 2.1) obtenu en réservant une partie de la voie urbaine au moyen de la signalisation horizontale (peinture) délimitant le couloir sur la chaussée, ce qui n'empêche pas la séparation physique des autobus du restant du trafic. Tous les carrefours sont au niveau de la voie, et dans plusieurs cas, les tronçons délimités sont interrompus avant les intersections.

4. L' autobus circulant en site banalisé où le flux des autobus se trouve dans les conditions de trafic mixte, se partageant ainsi l'espace de circulation avec les autres véhicules sur pneus.

2.3 La capacité d'un système d'autobus en site propre

De l'autobus conventionnel au convoi d'autobus sur "busway"

Cette description est effectuée à partir de Lindau (1992), où l'auteur fait une analyse entre l'autobus en site propre et le métro léger. Chacun des types de site décrits ci-dessus donne des niveaux de service très différents. Dans des conditions de trafic mixte, les systèmes exploités avec l'autobus conventionnel (d'une capacité unitaire égale à 80 voyageurs), peuvent transporter une demande de l'ordre de 10 000 voy/h/sens. Les systèmes qui utilisent les autobus articulés avec une capacité unitaire de 120 voyageurs ou plus, et qui sont exploités avec des conditions similaires, peuvent transporter une charge maximum de 15 000 voy/h/sens. Les vitesses commerciales sont de l'ordre de 12 km/h.

Les vitesses de consigne des autobus comme la vitesse commerciale du système peuvent être augmentées dès lors qu'il y a l'introduction d'un traitement prioritaire pour les autobus. Selon le point de vue de la Banque Mondiale (Armstrong-Wright, 1986), les tronçons qui assurent le droit réservé de circulation aux autobus, sont favorables à l'augmentation des vitesses commerciales et à leur capacité, de l'ordre de 15 000 voy/h/sens pour les autobus standards et 20 000/voy/h/sens pour les autobus de dimensions supérieures. Outre la réduction des temps de parcours des voyageurs, l'augmentation de la vitesse commerciale due à l'introduction de systèmes de priorité permet l'utilisation de parcs de matériels roulants moins importants et réduit le coût d'exploitation des véhicules.

Des capacités supérieures, avec des vitesses commerciales plus élevées, peuvent être atteintes en faisant circuler l'autobus/mégabus sur site séparé et en exploitant ces autobus en convois (Szasz, 1978). L'expérience brésilienne donne des exemples des possibilités de ces systèmes. Les idées retenues à Curitiba ont été adoptées par d'autres villes. Dans le cas de Porto Alegre, et plus particulièrement sur les axes de Farrapos et d'Assis Brasil, outre l'adoption de sites séparés, l'exploitation se fait en convois d'autobus ordonnés, type d'exploitation initialement adopté à Sao Paulo.

Gardner et al. (1991), dans une récente étude concernant 8 Busways parmi 40 identifiés à travers le monde qui fait référence à l'exploitation de systèmes en site propre d'autobus dans divers pays en développement, ont indiqué que la capacité des tronçons en site séparé près du centre peut avoisiner 20 000 voy/h/sens pendant l'heure de pointe de l'après midi, durant laquelle le mouvement prépondérant est la montée des voyageurs. 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.

Cette étude 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.

Les systèmes en site en propre pour l'autobus qui ont été l'objet de la recherche à travers le monde n'étaient pas exploités dans les meilleures conditions, font remarquer les auteurs. Par ailleurs, afin d'atteindre ces capacités, une proportion significative d'autobus (40 à 60%) ont besoin d'être exploités en surcharge : de telles conditions ne peuvent pas être considérées comme compatibles avec un service de transport public de qualité.

En ce qui concerne les vitesses commerciales, les systèmes en site séparé pour les autobus implantés au Brésil, présentent généralement des valeurs situées entre 17 et 22 km/h, bien que dans quelques situations, la vitesse commerciale peut atteindre 29 km/h.

Entre les extrêmes définis d'un côté par l'exploitation en trafic mixte et de l'autre côté par l'exploitation dans les sites séparés de la circulation, on trouve une grande variation de niveaux de service.

Avec un système de transport par autobus, on évite une grande concentration de voyageurs en un seul point du centre car ils peuvent se disperser vers différentes stations du centre-ville.

De la même façon, les autobus pénètrent dans la banlieue après avoir parcouru la ligne, les voyageurs arrivent ainsi près de leurs points "extrêmes d'origine et de destination" sans avoir à changer d'autobus.

L'exploitation en convois

On a vu dans le § 2.1 "Configuration des arrêts" que sur certains réseaux outre l'adoption de site propre pour autobus, on exploite ces autobus organisés en convois de manière à réduire le temps d'arrêt en station. Cette technique appelée COMONOR (COMbois de ONibus ORdenados, autobus ordonnés en convois) a été adoptée au Brésil sur des lignes d'autobus en site propre à Sao Paulo et à Porto Alegre. Cette forme d'exploitation 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 (comme les voitures d'une rame de métro). 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.

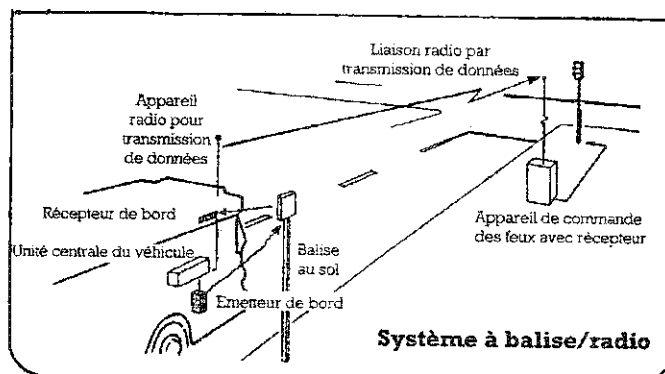
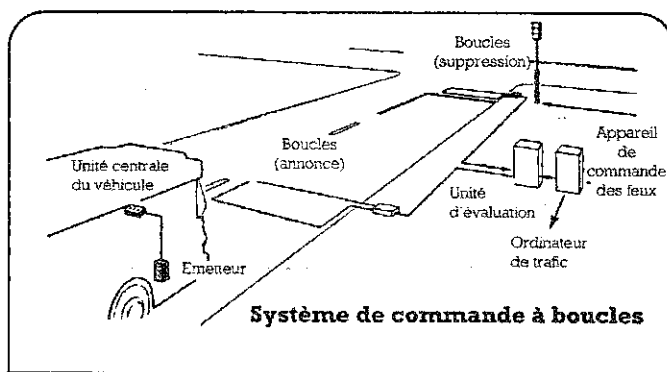
2.4 Priorité aux feux de circulation

Une condition fondamentale pour accroître la vitesse commerciale des autobus est de ne faire emprunter aux lignes de bus que des axes prioritaires.

Les cycles de feux peuvent entraîner des pertes de temps importantes pour les transports collectifs. On trouve des temps de cycle de 120 secondes et davantage et s'il est vrai qu'ils accroissent la capacité du carrefour, ils allongent également les temps d'attente pour les autobus. Des cycles plus brefs 60-70 secondes sont dès lors mieux indiqués pour augmenter la vitesse des transports publics. Des pertes de temps pour les transports publics se produisent aussi avec les feux à enclenchement progressif (onde verte) malgré le calage de l'onde verte sur la vitesse moyenne des autobus (tenant compte des arrêts en station).

La priorité aux feux pour les autobus se traduit par la possibilité d'allonger la durée du feu vert ou de réduire la durée du feu rouge pour pouvoir traverser le carrefour sans perte de temps. La durée maximale de l'augmentation du temps de vert est fonction de la durée de cycle et du temps minimal de vert pour la direction transversale. L'augmentation du temps de vert (ou réduction du temps de rouge) grâce à une signalisation particulière se fait au détriment du trafic, tandis que la simple augmentation du temps de vert général (ou réduction du temps de rouge général) ne touchent que le trafic transversal. Le trafic circulant dans la même direction profite comme les autobus de l'augmentation du temps de vert. Dans le cas où des autobus approchent d'un carrefour équipé de commande de priorité sur les deux axes, c'est en général la première commande exprimée qui est prise en compte. La demande d'un traitement prioritaire aux feux de circulation est supprimée lors du franchissement du carrefour (boucles noyées ou dispositifs infrarouges).

Il existe deux systèmes de commande de priorité qui se distinguent par leur mode de transmission de données entre le point de demande et le système de feux de circulation. Un principe consiste à intégrer des boucles de réception, dans la chaussée aux points de demande, reliées à l'appareil de commande des feux de circulation par un câble : l'autobus émet un signal caractéristique en passant sur la boucle. Pour éviter les coûts de construction dans la chaussée, une autre solution consiste à transmettre par ondes radio à un récepteur intégré dans l'appareillage de commande de feux du carrefour la demande de priorité de l'autobus. Le signal émis après la traversée du carrefour est transmis soit par une boucle noyée pour le premier principe, soit par transmission hertzienne pour le second principe.



Source : UITP, Sydney 93.

Systèmes de priorité aux feux de signalisation pour autobus.

Avec un système d'aide à l'exploitation assisté par ordinateur (SAE), les points de demande sont intégrés dans les données de l'ordinateur, la position des autobus étant connue, l'ordinateur peut déclencher la demande aux feux lorsque l'autobus approche du carrefour. Il n'est pas nécessaire d'installer des détecteurs en amont des carrefours mais le suivi de la localisation des autobus se fait par des balises locales.

Lorsqu'il y a des fréquences élevées d'autobus, on atteint les limites du système lorsque tous les autobus sont équipés de commande de priorité aux feux et on doit alors limiter les possibilités de demande à certaines lignes par exemple. On peut limiter la prise en compte de demande de priorité aux feux aux seuls autobus présentant un retard minimal sur leur horaire quand la commande de priorité aux feux est combinée avec un système d'aide à l'exploitation.

3. Le métro léger

On observe, depuis quelques années, un intérêt grandissant pour une technologie intermédiaire de transport de masse: le métro léger et, en particulier le tramway.

Actuellement, plus d'une soixantaine de projets d'axes lourds tramways, partiellement ou intégralement en site protégé, au sol ou en viaduc, ont fait l'objet d'études approfondies, dont un tiers pour les pays en développement (Amérique latine, Asie, Pays du Maghreb), un tiers pour les pays d'Europe et approximativement un autre tiers pour les pays d'Amérique du nord.

Les réalisations et mises en exploitation récentes dans les pays développés, notamment en France, présentent un bilan positif en terme de trafic, de résultats d'exploitation et en terme d'impact sur l'agglomération.

Dans les Pays en développement, les mises en exploitation récentes sont rares. Les cas de Manille, et surtout celui du métro léger de Tunis, constituent des expériences permettant d'éclairer le choix des responsables de transport, qui s'est porté sur le métro léger pour résoudre les problèmes de déplacements et de structuration de l'espace urbain. Les projets de Casablanca, Curitiba, Guadalajara, Monterrey, Mexico au stade des études pour les deux premiers et de l'exploitation depuis respectivement 1989 pour le troisième, et 1991 pour les deux dernières lignes sont également de bonnes références.

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.

Dans les pays développés, le métro léger se trouve confronté aujourd'hui à la "concurrence" d'autres systèmes de transports collectifs: d'abord avec les systèmes d'autobus en site propre, soit conventionnels, soit guidés (Adelaïde, Essen.), puis avec le métro automatique de type VAL, les monorails ou autres systèmes à câble ou à sustentation magnétique.

Dans les pays en développement, le métro léger, souvent encore en l'état de projet, est concurrencé par des systèmes d'autobus en site propre.

Même si la plupart des réalisations récentes concernent les pays développés, le métro léger paraît bien aujourd'hui s'ouvrir, aux pays en développement, avec un champ très large d'application : 220 km de projet et 100 km d'extension en cours en PED, contre 300 km de projet et 330 km d'extension en cours dans les Pays développés en 1990 (Barbieux C., Kuhn F., 1990).

Les conditions dans lesquelles se déroule l'exploitation, différencient les systèmes de métro léger des pays en développement des systèmes de métro léger des pays développés : 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.

3.1 La capacité d'un système de métro léger

Du tramway au métro léger

La souplesse d'adaptation du système de métro léger permet lorsque les budgets sont modestes de garder les caractéristiques du tramway ou bien si l'on veut un système plus développé, d'avoir un métro léger qui se rapproche, lorsque le système est sophistiqué, d'un métro.

Lorsqu'on a un tramway mêlé à la circulation générale, ceci engendre une dégradation inacceptable des conditions de transport, faible vitesse commerciale de 10 à 14 km/h et une grande irrégularité dans la marche des tramways avec une augmentation corrélative des coûts d'exploitation, ce qui devient insupportable pour les responsables des entreprises de transport collectif.

La tendance générale qui se dégage dans les pays développés, en ce qui concerne ces réseaux de tramways, est de favoriser une infrastructure en situation protégée : la création de sites propres partiels avec franchissement à niveau des carrefours entraîne une amélioration très sensible de la régularité et de la vitesse commerciale qui atteint alors 18 à 25 km/h selon la longueur moyenne des interstations (en général 350 à 500 mètres), le niveau de protection et le débit.

Le niveau de priorité accordé au tramway doit être modulé en fonction du débit de véhicules sur la ligne



- pour les débits 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;

- pour les débits compris entre 30 et 60 véh./h/sens, le fonctionnement des feux de circulation ne peut plus accorder une priorité élevée car la capacité des routes transversales serait trop réduite, le site séparé procure néanmoins un gain de vitesse commerciale;

- des débits supérieurs à 60 véh./h/sens sont parfois observés en marche à vue sur une voie réservée (sur certains troncs communs de lignes de réseaux suisses) 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 tendance est à l'augmentation des capacités unitaires des véhicules modernes, on admet qu'un système de tramway peut transporter jusqu'à 10 000 pas./h./sens dans de bonnes conditions de vitesse et de régularité.

Au delà de cette capacité le système doit se rapprocher du métro léger c'est à dire avoir une emprise propre au sol ou dénivelée tout le long de son itinéraire: sur certains tronçons l'infrastructure se trouve en site propre intégral comme pour le métro, cette disposition est généralement retenue dans les centres des villes ou la plateforme du métro léger est mise en souterrain, pour d'autres tronçons situés en périphérie par exemple, l'infrastructure est en site séparé au sol, comme pour le tramway, avec des carrefours à niveau. Les stations disposent d'installations simples. Le matériel roulant est comparable au métro avec toutefois des longueurs de rames inférieures.

Ainsi, avec une capacité unitaire de 340 à 900 places, le métro léger offre des capacités qui se situent entre 5000 et 45000 pas./h./sens. Pour des capacités maximum c'est à dire des fréquences de passage de 15 à 50 par heure: au delà de 30 passages/heure, le métro léger doit être entièrement isolé des autres circulations urbaines et il doit être doté d'une signalisation de régulation et de protection.

Le système de métro léger peut avoir une infrastructure adaptée au tissu urbain, utiliser une diversité de types de véhicules permettant de répondre à de nombreux critères d'exploitation,

offrir une capacité de transport élevée et faire l'objet d'un programme de réalisations permettant une mise en exploitation plus rapide et des investissements progressifs.

3.2. Les conditions d'exploitation

La fluidité des circulations revêt, pour le métro léger, la même importance que pour les autres systèmes de transport. Si les lignes comportent certains tronçons séparés du reste du trafic notamment au droit des carrefours et d'autres tronçons séparés mais avec des carrefours à niveau, générateurs de perturbations, la fluidité de circulation des convois du métro léger n'est rendue que plus impérative encore. En effet, les perturbations provoquées par le trafic de surface peuvent se répercuter sur les tronçons équipés de dispositifs de signalisation.

Etant donné que le système de signalisation implique la régulation des espacements entre véhicules, ces perturbations se traduisent rapidement par l'immobilisation de rames devant des signaux à l'arrêt ou par la formation de longs convois à l'entrée des tronçons équipés des dispositifs de signalisation. Aussi, afin d'une part d'assurer la sécurité des circulations sur les zones en site propre, et d'autre part d'améliorer la régularité des lignes en site banalisé, de nombreux réseaux ont été amenés à introduire des aides à l'exploitation par ordinateur sur leurs lignes de tramways.

Ces aides peuvent être classées en 3 catégories :

- cantonnement de la voie par les circuits de voie et signalisation d'espacement sur les parties de ligne en site propre, notamment en tunnel;
- priorité aux feux de carrefours : on obtient une amélioration sensible de l'exploitation du métro léger lorsqu'une grande partie du réseau se trouve en site séparé et si les temps d'arrêts sont supprimés au droit des carrefours à niveau avec la circulation générale; la majeure partie des pertes de temps imputables aux causes extérieures à l'exploitation proviennent en effet de la signalisation par feux et elles peuvent, dans certaines villes, représenter 10 à 20 % du temps de rotation.
- systèmes de surveillance et de régulation centralisée : de tels systèmes sont particulièrement utiles pour l'intégration des services assurés par les autobus, trolleybus et métro léger d'une agglomération, car ils peuvent surveiller l'ensemble de l'exploitation, détecter les incidents, permettre le respect des horaires pour que les correspondances soient assurées en souplesse.

L'ordinateur localise les véhicules et compare les situations théoriques avec les situations réelles en ligne: c'est le suivi de l'exploitation en temps réel.

L'analyse des informations recueillies permet d'établir les comptes rendus d'incidents et les statistiques, ce qui permet d'améliorer l'exploitation : c'est le suivi de l'exploitation en temps différé.

La suppression des entraves grâce à une bonne délimitation de l'infrastructure présente également des avantages pour l'exploitation. Son aménagement permet, non seulement d'améliorer les temps de parcours et de réduire les réserves de temps prévues pour les retards, mais aussi d'allonger les battements aux terminus ou d'économiser des courses. La délimitation de l'infrastructure du métro léger permet d'améliorer la sécurité des usagers des transports collectifs, des piétons et des automobilistes.

3.3. Les sites d'implantation.

Dans le paragraphe précédent nous avons vu que la fluidité de la circulation était très importante pour le métro léger et notamment l'incidence du nombre de conflits entre le métro léger, la circulation générale et les piétons.

En effet, les conflits avec les piétons revêtent un caractère aléatoire et répétitif, engageant la sécurité des piétons et des personnes transportées, ce qui perturbe l'exploitation (régularité) et fait baisser la vitesse commerciale du métro.

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.

Les voies du métro léger se répartissent selon 4 types de sites:

- le site propre intégral qui correspond généralement aux réalisations nouvelles en centre-ville en situation dénivelée: tunnel ou viaduc;
- le site séparé qui correspond aux plateformes indépendantes au milieu ou le long d'un boulevard ou sur une ancienne plateforme de chemin de fer;
- le site réservé qui correspond à des voies situées sur la chaussée et délimitées par un marquage, mais non séparées physiquement du trafic général;
- le site banalisé constitué par des voies posées sur la chaussée utilisée par la circulation générale : ces sites se trouvent plutôt dans des réseaux anciens, sur des chaussées à trafic faible, ou des chaussées trop étroites sur lesquelles il n'est pas possible de réserver une emprise appropriée pour le tramway.

3.3.1 Le site propre intégral

Dans de nombreuses villes des Pays développés, la configuration des rues dans le centre ne permet pas d'implanter les voies du métro léger en site séparé de surface, ce qui conduit à mettre en souterrain la plateforme de métro léger. Le tunnel suit généralement l'alignement du tracé des rues et il a les caractéristiques d'un ouvrage pouvant recevoir un véhicule de métropolitain avec les vitesses commerciales correspondantes (Bruxelles, Stuttgart, Hanovre, Cologne, Zürich).

En périphérie, le tunnel peut être remplacé par un viaduc, implanté dans le terre plein central d'un boulevard par exemple, et passant au dessus des carrefours, voies de chemin de fer, etc...

Le linéaire des ouvrages souterrains ou en viaduc est limité par le coût d'investissement et les problèmes de construction. Ainsi dans les Pays en développement, on limite les longueurs d'ouvrages souterrains (Le Caire, Tunis, Guadalaraja, Monterrey, etc.) excepté la ligne de métro léger de Manille qui est entièrement en aérien ce qui supprime totalement les conflits avec la circulation et les piétons.

En effet l'avantage du site propre intégral est de supprimer les conflits avec la circulation générale et les piétons, d'améliorer la vitesse commerciale, d'avoir une bonne connaissance des temps de parcours, d'offrir aux usagers une bonne régularité et ponctualité.

Les ouvrages et les équipements sont construits selon les normes de métropolitain : intersections dénivelées, grands rayons de courbure, quais au niveau du plancher des véhicules et escaliers mécaniques en stations, les équipements de signalisation, les dispositifs de protection des rames et de régulation. Les conditions pour l'écoulement d'un trafic très important sont réunies, il est alors possible de passer du métro léger au métropolitain.

3.3.2 Le site séparé

Il s'agit d'un site de surface implanté soit sur la chaussée, soit sur des emprises récupérées généralement sur le domaine ferroviaire et protégé de la circulation générale par des obstacles physiques tels que terre - pleins, bordures, clôtures, etc ...



Photo 7 : Le métro léger de Tunis sur la boucle centrale en voie unique, l'emprise est protégée de la circulation par une bordure en dehors des carrefours.



Photo 8 : Une station du métro léger protégée par une grille, évitant les traversées des piétons à cet endroit.



Photo 9 : Le métro léger de St Denis Bobigny, le site propre protégé par des bordures et des plots.



Photo 10 : Un arrêt du métro léger de St Denis - Bobigny.

Avec cette protection, le métro léger échappe aux inconvénients de la circulation générale, sauf au droit des carrefours qu'il passe au niveau de la chaussée; il est alors protégé par les feux de signalisation et peut obtenir la priorité avec les équipements de régulation.

Dans la plupart des villes qui avaient initialement un réseau de tramways, la mise en site séparé d'une partie des voies a permis d'augmenter la vitesse commerciale et l'attractivité des transports collectifs.

3.3.3 Les sites banalisés et protégés

Le site banalisé est le type de site le plus généralement rencontré il y a une vingtaine d'années sur les réseaux de tramways qui, y étant soumis à tous les aléas de la circulation générale, souffraient de performances de plus en plus médiocres.

C'est pourquoi dans certaines villes, notamment en Suisse, on a introduit différents modes de protection en utilisant la signalisation horizontale, méthode qui fait appel au sens civique des usagers de l'automobile: ainsi à Zürich, où l'on a pas pu mettre en souterrain dans le centre ville la plateforme de tramway, utilise-t-on la signalisation horizontale avec des bandes continues protégeant une ou deux voies selon les conditions de la circulation automobile et la largeur de la chaussée; c'est le principe des "voies réservées" utilisé pour d'autres transports collectifs: les autobus et trolleybus.

A un degré moindre de protection, on trouve les lignes discontinues qui rappellent aux automobilistes le gabarit des véhicules de métro léger sur la chaussée, ce qui doit les rendre vigilants, notamment au stationnement.

Pour une même ligne d'un réseau donné, on trouve les types de sites décrits ci dessus avec, dans les réseaux les mieux organisés, une hiérarchie partant du site propre intégral dans le centre ville où l'urbanisation est généralement très dense pour arriver au site séparé en périphérie où l'espace viaire le permet, un certain nombre de tronçons restant cependant en site banalisé.

La disposition et l'emprise des sites séparés sont très variées; leur faible développement dans les zones denses (centre-ville) montre qu'il est difficile de libérer un espace au profit des seuls transports collectifs.

Les tronçons en site séparé que l'on trouve en centre ville relèvent souvent d'opportunités telles que la conservation de très anciens sites séparés du début du siècle (Bruxelles, Lille), l'utilisation d'infrastructures ferroviaires (Bâle, Cologne), la création d'un quartier nouveau (Zürich, Berne, Utrecht), ou d'un projet routier (Zürich).

Dans d'autres cas, les transports en commun partagent un site séparé avec les piétons (cf. Zürich avec la Bahnhofstrasse, Bâle avec Marktplatz, Berne avec Budenbergplatz, etc.), dans la mesure où toute circulation de transit peut être bannie : cette solution apparaît comme la seule réellement possible lorsque la largeur d'emprise est inférieure à 15 mètres, mais peut être également envisagée dans le cadre d'une politique de création de vastes zones piétonnes centrales.

Cette difficulté à effectuer un partage de la voirie au profit des transports en commun incite les Autorités à proposer la mise en souterrain des lignes en centre ville : c'est le cas à Bruxelles (prémétro), à Stuttgart (métro, puis métro léger), à Hanovre, à Cologne etc... ou en viaduc à Manille.

Lorsque la ville refuse le choix du souterrain (Zürich, Bâle), on y développe les sites protégés (avec un degré de protection variable) et les systèmes de priorité aux feux avec contrôle de l'exploitation par ordinateur (Kuhn F., 1987).

3.4 Priorité aux feux de circulation

Les priorités aux feux permettent d'améliorer l'exploitation du métro léger (dimensionnement du parc de véhicules, conditions de travail, réduction des coûts,...), et d'augmenter l'attractivité (régularité, confort pour l'usager, vitesses commerciales, augmentation des recettes,...).

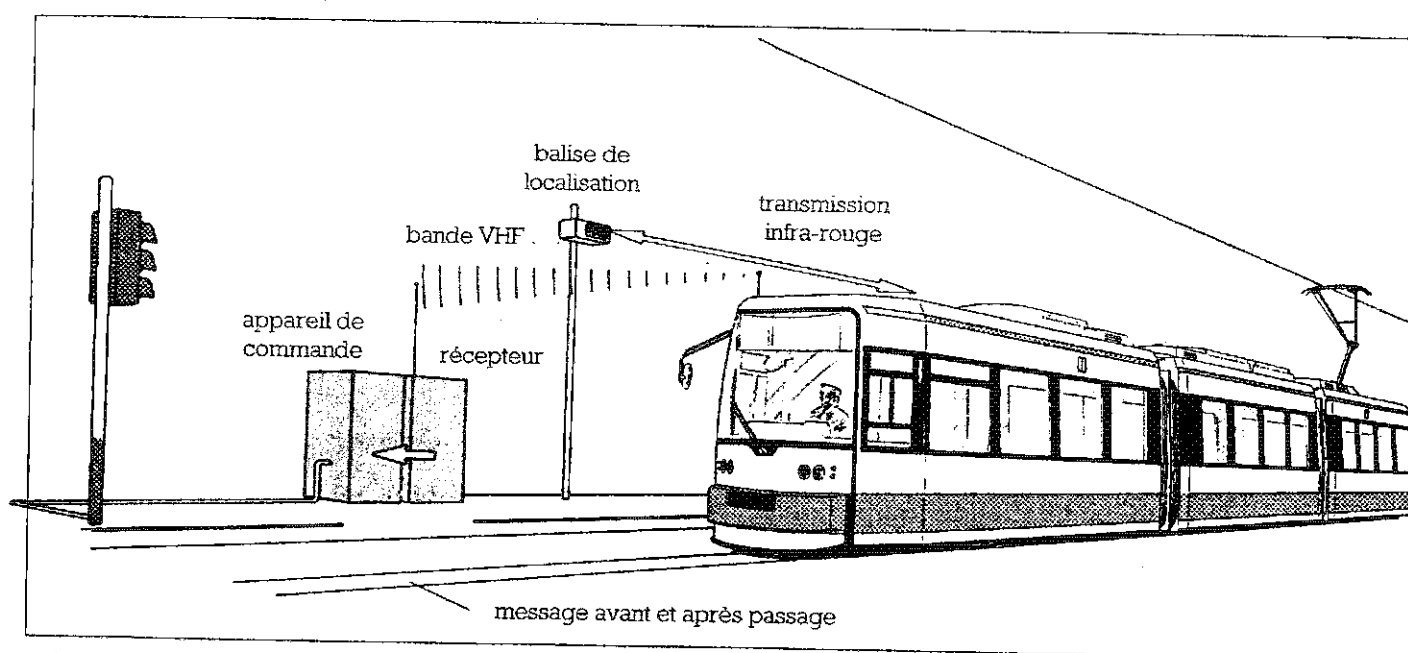
La prise en compte des métros légers, et autres transports en commun de surface, dans les stratégies de régulation des feux permet de donner à ces véhicules une importance particulière en rapport avec les flux de déplacements de personnes qu'ils permettent. La prise en compte des métros légers peut être individuelle ou bien peut s'effectuer dans le cadre d'un système de régulation centralisée.

La prise en compte individuelle

Un système détecte le métro léger en amont du carrefour, modifie le cycle des feux pour lui donner la phase verte et rétablit ensuite le cycle normal ou un cycle compensateur. Trois cas peuvent se produire :

- le métro léger se présente sur la ligne de feux pendant la phase verte normale : pas d'action spécifique.
- le métro léger se présente au feu en fin de phase verte, ou au début de phase rouge: la phase verte est prolongée.
- le métro léger devrait se présenter en fin de phase rouge: celle ci est raccourcie et la phase verte anticipée.

Le gain de temps moyen observé sur les systèmes de priorité des métros légers aux feux est de l'ordre de 10 secondes par rame et par carrefour équipé. Pour obtenir un résultat sensible on doit équiper l'ensemble d'une ligne pour cumuler les gains sur un nombre important de carrefours et de rames. Néanmoins il y a des distorsions importantes selon les sites et les conditions de circulation.



Système de commande des feux de signalisation par balise et radio.
Source : UITP, Sydney 93.

La prise en compte dans une régulation centralisée

Les régulations centralisées des feux agissent de manière homogène et coordonnée sur les différents carrefours d'un axe ou d'une zone. Elles attribuent, souvent, des ondes vertes à des itinéraires définis comme prioritaires. Ces plans de feux à enclenchement progressif ou onde verte, calculés selon la progression moyenne des véhicules particuliers, sont inadaptés aux véhicules de transport collectif, moins rapides et astreints à des arrêts en station.

Le type de système le plus répandu en France comporte:

- la commande des paramètres de fonctionnement des carrefours depuis un poste central ,
- des plans de feux préétablis,
- des mesures de trafic en temps réel,
- le choix d'un plan de feux dans une bibliothèque,
- la possibilité d'actions d'adaptation globale,
- la possibilité d'actions d'adaptation locale.

Dans le cas où le réseau de métro léger est équipé d'un système d'aide à l'exploitation (SAE), le poste de commande du SAE connaît en temps réel la position des rames et leur état avance - retard. Lorsque la rame entre dans la zone d'approche d'un carrefour, un message radio est émis pour demander la prise en compte au PC du SAE qui la transmet au PC Feux.

Choix entre prise en compte individuelle ou centralisée

S'il n'y a qu'un passage de rame par cycle, c'est la solution d'une prise en compte individuelle qui est la plus efficace.

S'il y a plus d'une rame par cycle, la solution passe par un traitement global de l'axe avec une prise en compte dans la gestion centralisée des feux.

3.5. Les arrêts ou stations

Les points d'arrêts du métro léger doivent être pourvus d'accès aisés et sûrs et disposer de moyens d'information des voyageurs, être agréables et fonctionnels; ils sont harmonisés avec le matériel roulant.

Normes et dimensions

Les dimensions et le niveau des quais ou des îlots sont fonction des caractéristiques géométriques des rames et de la densité du trafic de voyageurs; le niveau des quais dépend surtout de la possibilité d'insertion géométrique le long de la plateforme, souvent difficile en centre-ville. Les quais hauts ou le plancher bas du véhicule, outre le confort, participent à une meilleure exploitation car ils permettent une réduction du temps d'arrêt en gagnant sur le temps d'échange de voyageurs.

Capacité de transport

Les temps d'arrêt en station, les temps de montée-descente d'un passager permettent d'estimer la capacité d'une ligne de métro léger ainsi que toute amélioration de capacité qui résulterait d'un changement d'équipement et du type d'exploitation.

Le temps de passage minimum entre deux rames à un arrêt comprend le temps réel noté à partir de l'ouverture des portes pour faire monter/descendre les passagers plus le temps de dégagement de la rame et le temps mort.

Le temps de montée/descente dépend de plusieurs facteurs qui sont:

- Le nombre et la largeur des portes utilisées,
- Le nombre et la hauteur des marches,
- Le type de contrôle d'ouverture de porte,
- Le système de perception du prix du voyage,
- Le nombre de bagages et de colis transportés par les passagers,
- Les procédures et le temps nécessaire pour s'occuper des handicapés,
- La configuration de la disposition des sièges,
- La largeur du couloir,
- Les conflits entre montée/descente,
- La configuration, le type de revêtement, de protection d'une station.

Lorsque le plancher de la rame est au même niveau que le quai de la station, le temps d'arrêt en station est réduit et il y a moins de possibilités d'accidents d'accès dans le métro.

Le temps d'arrêt en station dépend de l'heure de la journée, du lieu de la station et du nombre de lignes rabattues sur cette station. La durée du temps d'arrêt est en moyenne pour les systèmes qui fonctionnent bien de 15 à 20 secondes en général, de 30 à 60 secondes dans les stations importantes, de correspondances et les terminus.

Dispositions des arrêts

L'implantation des arrêts en amont ou en aval des carrefours dépend de la régulation du trafic par feux de signalisation : si la signalisation peut être influencée ou s'il y a une onde verte, le métro léger pouvant s'assurer un droit de passage prioritaire, l'arrêt peut être implanté en aval du carrefour.

Les stations de correspondance

Ces stations doivent être particulièrement bien étudiées car il s'agit de mettre en relation différents modes de transport, de les coordonner, de réduire les temps de trajet pour l'usager afin que la rupture de charge ne soit pas dissuasive de l'utilisation des transports en commun.

Quelques équipements spécifiques permettent d'assurer le respect effectif des correspondances:

- . des dispositifs de départ sur ordre pour les autobus en rabattement, liés à l'arrivée des tramways et commandés par le système d'aide à l'exploitation.
- . la télésurveillance des stations par caméras depuis le PCC.
- . la sonorisation des stations pour informer les usagers depuis le PCC.

4. Définition des paramètres de performances

4.1 Vitesse commerciale (Vc)

La vitesse commerciale se calcule en divisant la longueur totale du parcours (D term.) par la somme des temps de circulation (T tc) et des temps aux arrêts (T ta) :

$$V_c = \frac{D \text{ term.}}{T(tc + t_a)}$$

Une augmentation de la vitesse commerciale pour une ligne donnée s'obtient par une diminution soit du temps de parcours soit du temps d'arrêt en station soit des deux. Cette augmentation de la vitesse commerciale permet d'améliorer le coût d'exploitation et les temps de voyage qui se répercutent sur le parc de matériel roulant nécessaire et sur la qualité de service offerte aux usagers.

4.2 Temps de circulation entre arrêts (tc)

Le temps de circulation est influencé par:

- la distance entre arrêts,
- les conditions de trafic pour l'exploitation en site non protégé,
- les performances des véhicules comprenant l'accélération initiale, la vitesse maximum autorisée, le temps de dérive et le taux de freinage.

Le temps de circulation est influencé par la distance entre arrêts : si on examine la courbe "Influence de la distance entre arrêts sur la vitesse commerciale" (cf courbe "Influence de la distance entre arrêts sur la vitesse commerciale au § 4.4 ci-après), on note compte tenu d'une accélération $g = 1 \text{ m/s}^2$, un temps d'arrêt de 20 secondes en station que plus l'interstation est longue, plus la vitesse de consigne peut être élevée et en conséquence le gain sur la vitesse commerciale est plus important. Ainsi sur une interstation de l'ordre de 500 mètres un accroissement de 40 à 50 km/h augmente la Vc de 22 à 24,5 km/h. Le même accroissement de la vitesse de consigne sur une interstation de 900 mètres augmente la Vc de 23 km/h à 30 km/h avec une consommation d'énergie moins élevée du matériel roulant sur une interstation de 900 m que sur une interstation de 500 m.

Les interstations dont la longueur est supérieure à 1000 mètres sont mieux adaptées aux vitesses maxima supérieures à 50 km/h et donc à une meilleure vitesse commerciale avec une augmentation de la consommation d'énergie relativement plus faible: ainsi si on peut encore augmenter la vitesse désirée sur une ligne d'autobus ou de métro léger on devra donc tenir compte des longueurs d'interstation et protéger des conflits en priorité les plus longues interstations.

Le temps de circulation entre arrêts est aussi influencé par les conditions de trafic tout au long de la ligne, les performances des véhicules et la vitesse autorisée soit par le code de la route pour les autobus, soit par le règlement interne de circulation des métros de l'entreprise concernée.

Le niveau de protection le long de la plateforme influe sur le comportement des conducteurs qui sont avant tout soucieux de la sécurité et qui baissent leur vitesse de consigne dès qu'un évènement (piétons et véhicules traversants ou circulants très près de la voie) survient et pourrait perturber l'exploitation du métro.

4.3 La fréquence d'exploitation

La fréquence du service est représentée par le nombre de départs de rames à l'heure: en ce qui concerne notre étude nous retenons l'heure de pointe du matin dans le sens le plus chargé.

4.4 Distance entre arrêts, et entre arrêts et feux

De faibles distances entre arrêts augmentent la consommation d'énergie, le nombre de véhicules et de conducteurs. De grandes distances entre arrêts permettent d'atteindre des vitesses maxima plus élevées et donc de meilleures vitesses commerciales. On a vu précédemment (cf : § 4.2) que ce temps est influencé par la distance entre arrêts: si on examine la courbe "Influence de la distance entre arrêts sur la vitesse commerciale" figure 3 ci-après on note :

- pour une vitesse maximum de 40 km/h, une accélération $g = 1 \text{ m/s}^2$, un temps d'arrêt de 20 secondes en station, la vitesse commerciale croît de 16,5 km/h pour une interstation de 250 mètres à 24 km/h pour une interstation de 750 mètres.

- au delà de cette distance, si la vitesse maximum peut atteindre 50 km/h, la vitesse commerciale passe alors de 28,5 km/h pour une interstation de 750 mètres à 30 km/h pour une interstation de 1000 mètres.

- si la vitesse maximum peut atteindre 60 km/h sur des interstations d'une longueur supérieure à 1000 mètres, la vitesse commerciale passe de 34,5 km/h pour une interstation de 1000 mètres dans les mêmes conditions de temps d'arrêt et d'accélération que précédemment, à 36 km/h pour une interstation de 1250 mètres et atteint un maximum de 36,5 km/h pour une interstation de 1500 mètres, soit une augmentation de 5,8% de la vitesse commerciale pour une augmentation du linéaire d'interstation de 50%.

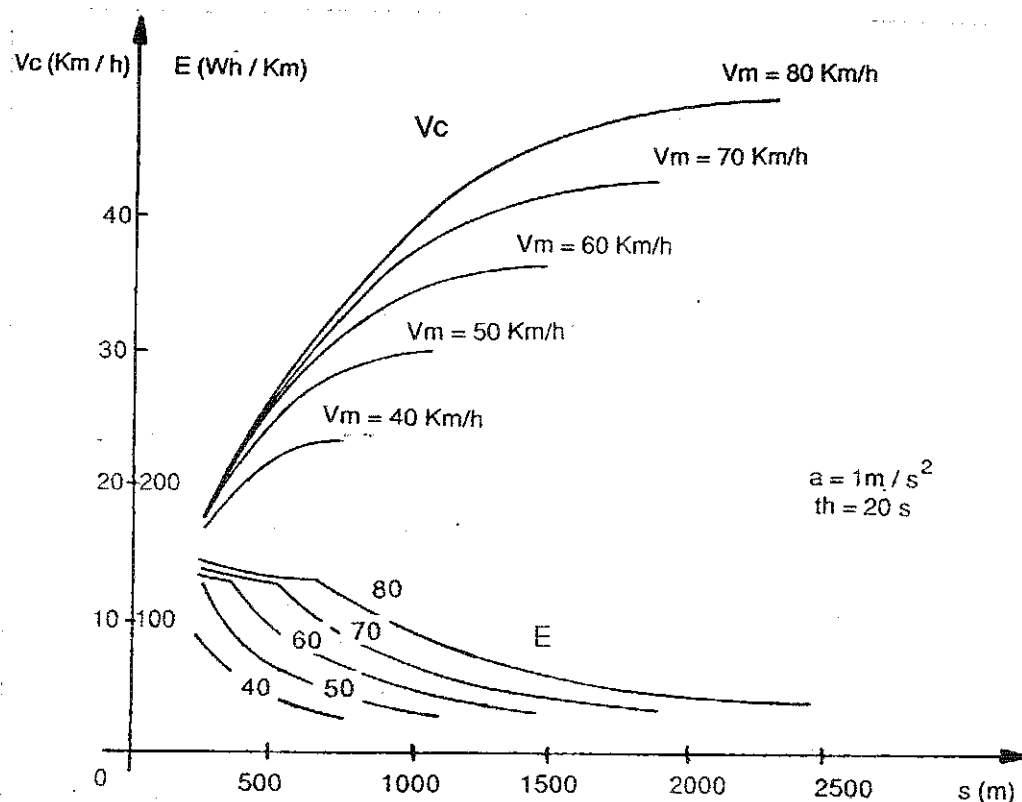


Figure 3

Influence de la distance entre arrêts sur la vitesse commerciale ($V_m = 40$ à 80 km/h)
Source UITP, 1989 Orientations des métros légers

En définitive la vitesse maximum que doit atteindre un véhicule dans une interstation dépend du linéaire de cette interstation: pour une exploitation optimisée on ne devra pas dépasser 40 km/h dans les interstations inférieures à 700 mètres, 50 km/h entre 700 et 1000 mètres, 60 km/h entre 1000 et 1500 mètres. Au delà de ces vitesses il y a une consommation d'énergie supplémentaire pendant l'accélération et la phase de dérive, un freinage plus important qui ne se traduisent pas par un gain important de temps de parcours.

Lorsqu'il y a des feux le long de l'axe de transport, une distance importante entre les stations et les feux est favorable à une bonne vitesse commerciale, si la distance entre la station et le carrefour à feux est faible on doit obtenir la priorité aux feux ou implanter la station au plus près des feux pour mettre en parallèle l'arrêt en station et le calcul des plans de feux permettant le départ de la rame dès que les montées/descentes sont effectuées.

4.5 Conditions de trafic

Les retards dûs aux conditions de trafic tels que les encombrements, l'attente aux feux, les limitations de vitesse ont une influence néfaste sur la vitesse commerciale et la consommation d'énergie.

Les dispositions de tracé et d'implantation des stations et les techniques modernes permettent d'en limiter les conséquences.

La Commission Internationale des métros légers de l'UITP a réuni depuis 1978 à partir des différents travaux effectués pour ses congrès, les aspects essentiels de la conception de l'infrastructure pour obtenir la meilleure exploitation selon les contraintes de l'environnement toujours dans le souci de la sécurité et la meilleure qualité de service pour les usagers des transports.

4.6 Temps d'arrêt

Pour une exploitation économique, les arrêts doivent être maintenus aussi courts que possible, par un aménagement judicieux des véhicules, des points d'arrêt (quais hauts), du système de perception, etc.

Il est impératif de s'assurer en premier lieu si tous les gains de temps possibles sont réalisés avant d'envisager l'accroissement des performances des véhicules. Le temps d'arrêt est influencé en pratique par la régularité de passage des rames/autobus.

4.7 Conception des véhicules

Outre leurs performances qui doivent être élevées, les caractéristiques géométriques des véhicules exploités doivent être favorables à la capacité du système, aux échanges rapides en station, au confort, et à la sécurité des passagers, etc.

Ainsi, la largeur des portes doit être de telle sorte qu'elle permette aux voyageurs de monter et de descendre sans se gêner: dans le cas de portes doubles l'UITP préconise une largeur de 1300 mm, pour les portes simples une largeur de 700 mm est recommandée.

Un nombre important de portes est nécessaire là où l'utilisation des arrêts est forte avec un nombre élevé de voyageurs montants et descendants. L'UITP préconise afin d'assurer un échange de voyageurs le plus rapide possible aux arrêts, les valeurs maxima par porte double de 35 voyageurs pour des quais bas et 60 voyageurs pour des quais hauts.

En ce qui concerne la longueur des véhicules, la capacité unitaire du véhicule dépend de sa longueur, aux heures de pointe les véhicules plus longs permettent une meilleure couverture, par contre à offre de place égale les véhicules plus courts permettent une fréquence plus élevée et raccourcissent le temps de dégagement aux carrefours équipés de signaux lumineux, l'offre de place est aussi beaucoup plus souple notamment aux heures creuses. D'un point de vue

économique, les véhicules plus longs sont plus favorables aux coûts d'acquisition et aux coûts d'exploitation.



Photo 11 : Niveau d'accès du métro à Tunis: ici quai de 60 cm (par rapport au niveau du rail) pour un niveau du plancher du véhicule à 85 cm au dessus du rail.



Photo 12 : Niveau du quai bas (20 cm au dessus du rail) soit 3 marches pour accéder à l'intérieur du véhicule à Tunis : ceci n'est pas favorable au temps de montée de l'utilisateur.

5. Le modèle Busway

5.1 Historique de Busway

Le modèle Busway est une version adaptée du modèle SIBULA (Simulation of Bus Lane). Ce modèle a été développé par M. Luis Antonio Lindau (UFRGS) en 1983 lors de sa thèse de doctorat de la Faculté d'Ingénierie et des Sciences appliquées de Southampton.

Le modèle SIBULA est écrit en Fortran IV sur machine ICL 2970. C'est un modèle microscopique de trafic qui représente en détail tous les véhicules qui composent la chaîne de trafic d'un tronçon.

Le modèle Busway, qui tourne sur IBM PC et compatible, est écrit en Microsoft Fortran 77 son interface entre utilisateur et modèle est écrit en langage C (Turbo C 2.0 et Microsoft C 5.1), il permet d'effectuer la simulation des couloirs d'autobus pour un flux plus au moins important des véhicules. Ces couloirs se caractérisent par la présence uniquement d'un point d'entrée et d'un point de sortie, pour un nombre maximum de 40 stations, de 40 carrefours avec feux et d'une longueur de 14 km. Après avoir apporté quelques modifications sur le logiciel, le modèle Busway peut simuler l'exploitation d'une ligne de métro léger.

Les **principales adaptations apportées** pour la nouvelle version de Busway qui permet de simuler un système de métro léger concernent les caractéristiques géométriques et d'exploitation, en particulier pour la priorité des rames aux feux de signalisation, la vitesse de consigne entre les stations et les temps d'arrêt dans les stations (l'adaptation de l'interface écrit en langage C a été effectuée par Ghandri S. au cours d'un stage au CRESTA en avril-juillet 1993).

La priorité d'une rame aux feux :

Après modification du logiciel, Busway permet de simuler des feux non tricolores avec une prise en compte des rames de métro. La logique des feux prévoit la mise en place d'une phase escamotable; le principe est de donner des phases spécifiques qui permettent le passage des véhicules; la mise en place d'une phase spécifique est conditionnée par l'apparition d'une demande.

La vitesse de consigne :

La vitesse de consigne est la vitesse qu'adopte le conducteur en l'absence de conflit. Si on compare les systèmes de métro léger avec les systèmes d'autobus en site propre, le métro léger a plus de contraintes lorsqu'il doit atteindre la vitesse maximum en interstation : il s'agit des contraintes de guidage, de la géométrie de la voie pour une exploitation respectant le confort et la sécurité des passagers. Busway permet l'introduction des différentes vitesses de consignes échantillonnées par une distribution selon la combinaison conducteur/véhicule/voie pour chaque interstation .

Le temps d'arrêt en station :

De la même façon que pour la vitesse de consigne, on introduit dans le modèle une distribution du temps mort, relevée sur les stations, pour chaque station de manière à représenter les grandes variations de ce temps. Le temps d'arrêt représente donc le temps de montée, calculé par le produit du nombre de passagers qui monte sur une porte par le temps unitaire moyen de montée de chaque passager qui monte, auquel on ajoute le temps mort. Pour chacune des rames le logiciel prend un numéro aléatoire qui permet d'entrer dans la distribution du temps mort et celle du nombre de passagers qui monte. Ainsi 2 rames qui se suivent n'ont jamais le même temps d'arrêt.

5.2 Approche de la simulation

Les modèles informatiques permettent de rechercher les possibilités opérationnelles et les innombrables alternatives de simulation, surtout dans les conditions extrêmes d'exploitation.

Ainsi la simulation effectuée à l'aide d'un modèle permet de réduire le temps de plusieurs semaines de travail et d'effectuer plusieurs simulations dans différents scénarios opérationnels en un temps et un coût réduit par rapport à celui qui serait nécessaire pour tester chacun de ces scénarios en exploitation réelle.

Un autre avantage des techniques de simulation par ordinateur est qu'il permet de tester plusieurs scénarios du système sous des conditions identiques.

En général, on trouve trois approches conceptuelles pour un modèle de simulation de trafic:

- Les modèles "macroscopiques" sont très rapides au niveau exécution puisqu'ils n'ont pas à conserver individuellement le trajet de chaque véhicule. De point de vue macroscopique, seules les caractéristiques totales du flux sont nécessaires pour exprimer la relation qui existe entre le volume, la densité et la vitesse courante du véhicule.
- Les modèles "pelotons" se rapprochent de la réalité. Les véhicules sont groupés en pelotons en fonction de la densité des véhicules les plus proches. Cette procédure évite l'évaluation de l'interaction entre les véhicules qui se suivent.
- Les modèles "microscopiques" dont Busway fait partie, prennent en considération la conduite individuelle des conducteurs. Chaque véhicule est identifié avec sa position, sa vitesse, son accélération et d'autres caractéristiques qui sont constamment mises à jour et enregistrées dans le système.

5.3 Caractéristiques du modèle Busway

Le but de cette méthode de simulation est d'engendrer individuellement des véhicules en leur attribuant les caractéristiques de distribution de trafic. La méthode de simulation a aussi besoin d'informations concernant l'agencement physique du tronçon correspondant à la simulation. Busway a été développé, précédemment pour simuler des couloirs d'autobus avec un grand flux, sur sites protégés, dans les conditions brésiliennes. Aujourd'hui, il est modifié pour pouvoir aussi simuler une ligne de métro léger. Pour la simulation, une ligne de métro léger se caractérise par la présence seulement d'un point d'entrée et d'un point de sortie des véhicules.

Cette simulation est réalisée dans une période de temps, en général d'une heure, pendant laquelle le modèle réévalue à chaque seconde toutes les caractéristiques cinématiques des véhicules. Ainsi, pour chaque véhicule qui entre dans le système (à partir de flux préétablis) le modèle 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 est dénommé le "pré-processus" qui a la fonction d'obtenir, de développer et d'emmagasiner toutes les caractéristiques géométriques du trafic de la ligne, et aussi d'engendrer les véhicules. Les calculs de cette étape considèrent la génération de variables aléatoires à partir de fonctions probabilistiques.

- Le deuxième se dénomme le "simulateur", il exécute les calculs répétitifs demandés pour la représentation du mouvement de chaque véhicule, chaque fois que le temps s'accroît, et gère toutes les données de sortie.

- Le troisième, est le module responsable de l'interface entre l'utilisateur et le modèle. Il a la compétence non seulement de pouvoir manipuler des données d'entrée et sortie, mais aussi de la représentation graphique du mouvement des véhicules dans la ligne, des intersections avec feux et des stations.

On peut dire que le module "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.

Ainsi une des principales caractéristiques de Busway est de permettre l'évaluation des effets de l'adoption de diverses configurations. Celles-ci sont définies autant pour les conditions géométriques de la voie (par exemple, étudier la distance entre feux ou entre stations), que pour les conditions de contrôle de feux (priorité au métro léger dans les intersections), pour les conditions de montée/descente (par exemple, l'influence de la différence de niveau entre le véhicule et la station), ainsi que pour les conditions de trafic.

5.4 Paramètres nécessaires pour la simulation

L'interface utilisateur permet d'introduire tous les paramètres nécessaires à travers des menus et des grilles d'écran. Les principaux paramètres sont :

1) Temps de simulation :

- Toujours une heure de simulation, généralement c'est l'heure de pointe.

2) Caractéristique géométriques :

- * longueur de la ligne (14 km au maximum)
- * nombre des feux (40 au maximum)
- * nombre des stations (40 au maximum)
- * localisation des feux (en mètres à partir de l'origine)
- * localisation des stations (en mètres à partir de l'origine).

Ces limites sont données par l'interface graphique, le modèle peut néanmoins effectuer les calculs pour des caractéristiques supérieures en déconnectant l'interface graphique.

3) Feux de signalisation :

- Le modèle, dans sa nouvelle version permet de prendre en compte les 3 types de logique de feux :

- Logique de type 1 - feux standards tricolores : pas de prise en compte, déroulement normal de diagramme de phases.

- * cycle des feux (en secondes)
- * temps de vert (en secondes)
- * temps de jaune (en secondes)
- * temps de réaction aux feux (en secondes)
- * minimum du temps de réaction (en secondes)
- * maximum du temps de réaction (en secondes)
- * écart type du temps de réaction (en secondes)
- * le décalage des verts "offset" pour chaque feu.

- Logique de type 2 - feux avec prise en compte tricolores : comporte la possibilité de modifier le déroulement normal de cycle des feux. Elle permet deux types d'actions:

- prolongation de la phase verte qui retarde l'apparition du rouge
- anticipation du début de vert

- * en plus des paramètres cités pour les feux de type 1 on a :
- * minimum du temps de rouge pour chaque feu (en sec.)
- * maximum du temps de vert pour chaque feu (en sec.).

- Logique de type 3 - feux avec prise en compte non tricolores : permet la mise en place d'une phase escamotable, le principe est de donner des phases spécifiques qui permettent le passage des véhicules du métro; leur réalisation est conditionnée par l'instant de l'apparition d'une demande du métro.

- * cycle des feux
- * minimum du temps de vert pour le métro
- * minimum du temps de rouge pour le métro
- * système de détection de véhicule (en mètres à partir de l'origine)
- * nombre des phases incompatibles pour chaque feu (5 phases au maximum).
- * début du temps de vert pour chaque phase incompatible de chaque feu.
- * minimum du temps de vert pour chaque phase incompatible de chaque feu.

4) Caractéristiques du trafic :

- * flux horaire des véhicules
- * intervalle minimum de génération de véhicules (en sec.)
- * temps de décharge aux feux (en sec.)
- * type d'insertion des véhicules;

L'utilisateur peut choisir une des options suivantes entre l'utilisation de convois (complets ou incomplets) ou pas de convois c'est à dire une insertion aléatoire de véhicule respectant l'intervalle minimum de génération

5) Caractéristiques des véhicules :

- pente d'accélération (en m/sec.³)
- longueur du véhicule (en mètres)
- distance d'arrêt entre deux véhicules (en mètres)
- caractéristiques de la vitesse, l'utilisateur a la possibilité de choisir entre deux options:

- une distribution pour l'ensemble de la ligne ou une distribution de la vitesse pour chaque interstation en utilisant les mêmes paramètres, les paramètres introduits sont les suivants :

- vitesse désirée (mètres/secondes)
- écart type de la vitesse désirée
- minimum de la vitesse désirée
- maximum de la vitesse désirée.

6) Mode d'exploitation des véhicules :

- nombre de véhicules en peloton
- nombre de groupement de lettres
- type d'arrêt de véhicules dans les stations :
 - . au voisinage des stations
 - . uniquement dans les stations
- le temps d'arrêt est généré à partir d'une distribution constante pour tous les véhicules (égale à la moyenne).
- dépassement dans les stations :
 - . pas de dépassement
 - . dépassement autorisé.

7) Stations :

- temps de montée par personne (en secondes)
- maximum du nombre de montées en fonction de la moyenne
- facteur de réduction du temps d'arrêt en station
- moyenne des montées pour chaque station
- écart type des montées pour chaque station
- temps mort, l'utilisateur a le choix entre deux options :
 - . un temps mort commun pour toutes les stations
 - . une distribution du temps mort pour chaque station (moyenne et écart type)

5.5 Sorties et résultats de Busway

Busway met à jour toutes les caractéristiques cinématiques du véhicule à chaque intervalle de temps, une variété de sorties peut être obtenue à partir du modèle :

- État des paramètres d'entrée :

La sortie standard du modèle inclut une édition d'un résumé des principaux paramètres géométriques et du flux spécifiques à chaque exécution d'une simulation. Un état contenant les caractéristiques initiales de tous les véhicules peut être édité à la demande de l'utilisateur.

- Mesures d'efficacité :

Les temps individuels de parcours, la moyenne du temps de parcours, les vitesses d'exploitation et d'autres informations détaillées comme les longueurs de queues pendant la durée du feu rouge, les flux de sortie à des localisations différentes et les délais d'insertion dûs au temps de formation des convois peuvent être obtenus à partir du modèle.

- Différents graphiques :

Le modèle génère les données nécessaires pour produire les graphiques qui sont un bon outil de comparaison, et de contrôle des résultats obtenus de la simulation. On peut citer comme exemples :

- . graphique de la vitesse en fonction du temps

- . graphique de la distance en fonction du temps
- . graphique de la performance (relation entre la vitesse et le flux (sortie/entrée))
- Les principaux résultats de la simulation :
 - . moyenne de la vitesse commerciale
 - . queues aux carrefours et aux stations
 - . temps d'arrêt aux carrefours et aux stations
 - . temps de parcours pour chaque rame

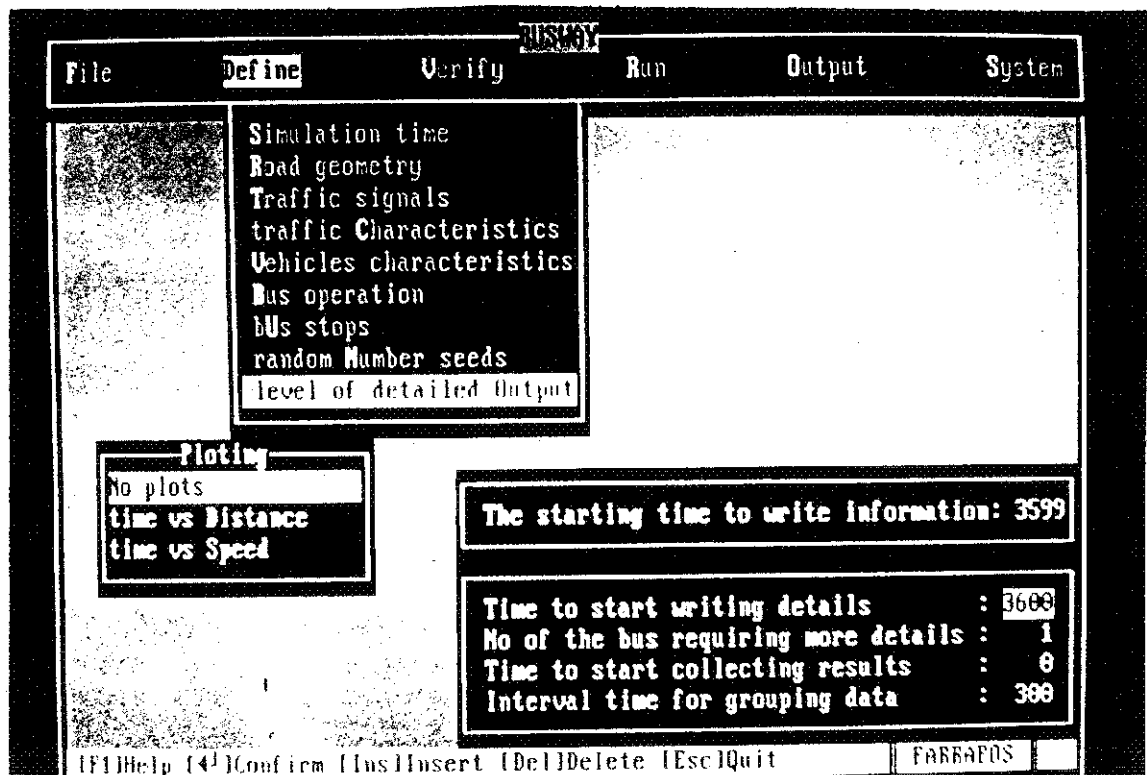


Photo 13 : Interface pour l'entrée des données du modèle Busway : ici le tableau général des caractéristiques à introduire.

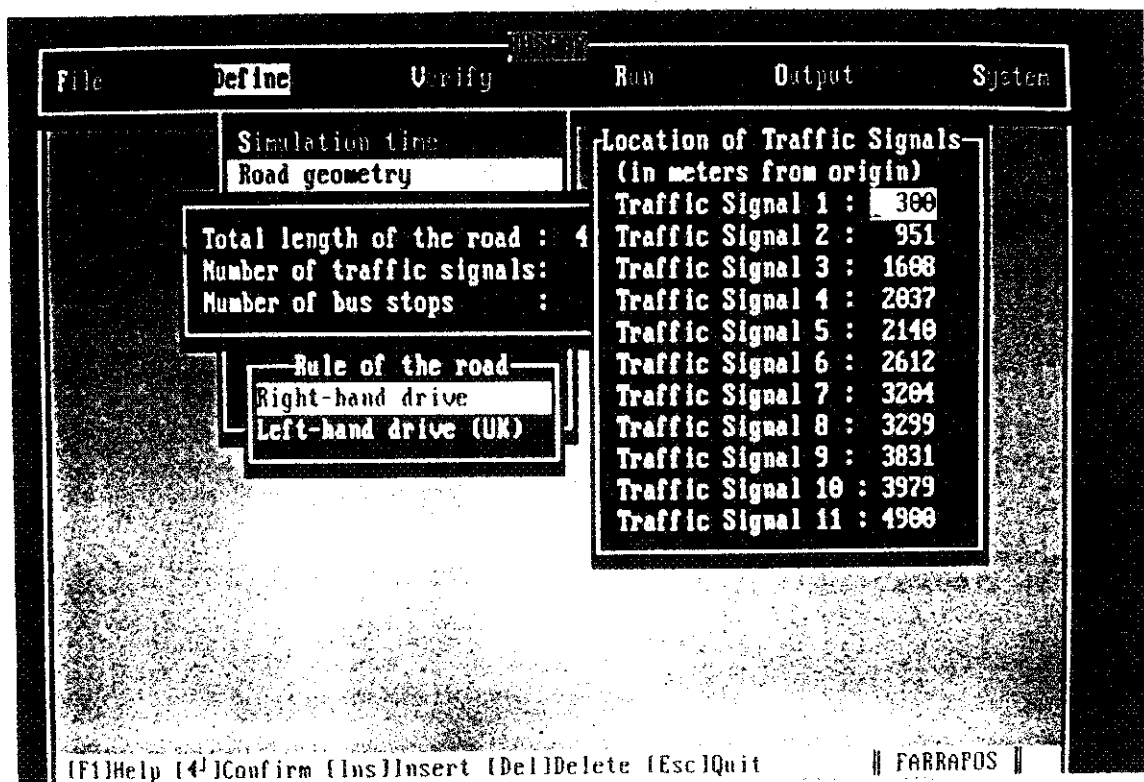


Photo 14 : Détails des données demandées par le modèle pour les caractéristiques géométriques.

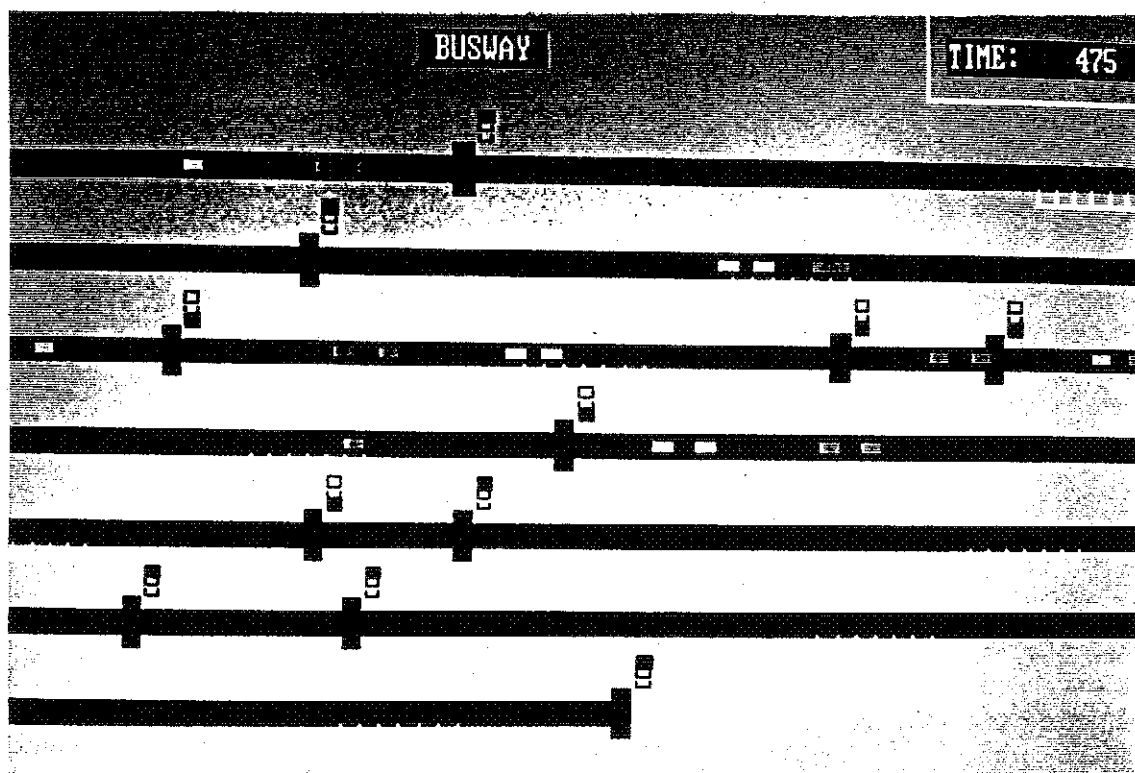


Photo 15 : Photo d'écran d'une simulation d'autobus en convois, on voit les 6 places d'arrêt avec les convois de 6 véhicules ainsi que les carrefours à feux.

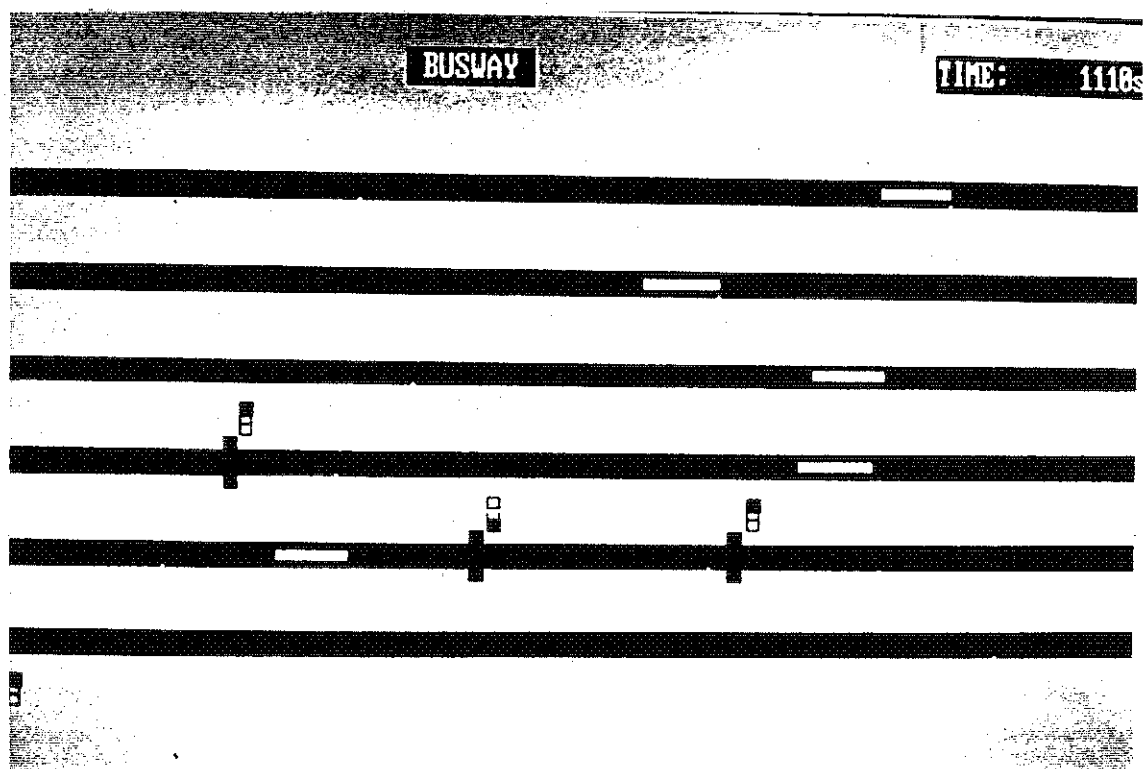


Photo 16 : Photo d'écran d'une simulation de rame de tramway, on aperçoit les arrêts et les carrefours à feux.

5.6 Calibrage du modèle Busway

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. Les chronométrages ainsi que l'endroit où sont effectués ces chronométrages sont intimement liés pour mesurer les caractéristiques du système et calibrer le modèle.

Les données relevées pour effectuer ce calibrage sont relatives :

- a) au profil d'accélération de la file des véhicules à partir de l'arrêt (courbe vitesses x distances, distance x temps);
- b) à la distance relative entre 2 véhicules et le profil d'accélération et de ralentissement de l'ensemble des véhicules;
- c) aux vitesses de consigne (vitesse que les véhicules atteignent dans les conditions de flux libre)

La typologie des lieux choisis où s'effectuent la prise des données se caractérise par la représentation d'un arrêt sans possibilité d'évitement, avec un feu implanté au delà pour permettre aux véhicules d'atteindre, en flux libre, les vitesses de consigne.

La collecte des données s'effectue pour l'heure à laquelle doit s'effectuer la simulation; dans notre étude nous nous intéressons aux heures de grande affluence c'est à dire à l'heure de pointe. Le calibrage du modèle Busway est lié aux ajustements des paramètres et des constantes qui sont utilisées dans les "équations de vitesse" (modèle de Gipps) que le modèle utilise pour faire circuler les véhicules pendant toute la durée de la simulation.

Les temps d'arrêt des véhicules aux stations ainsi qu'aux feux (qui sont très importants pour la simulation) ne sont pas pris en compte dans ce calibrage car il n'y a pas de paramètres ou constantes à ajuster dans la modélisation . Le temps d'arrêt est représenté dans ce modèle par :

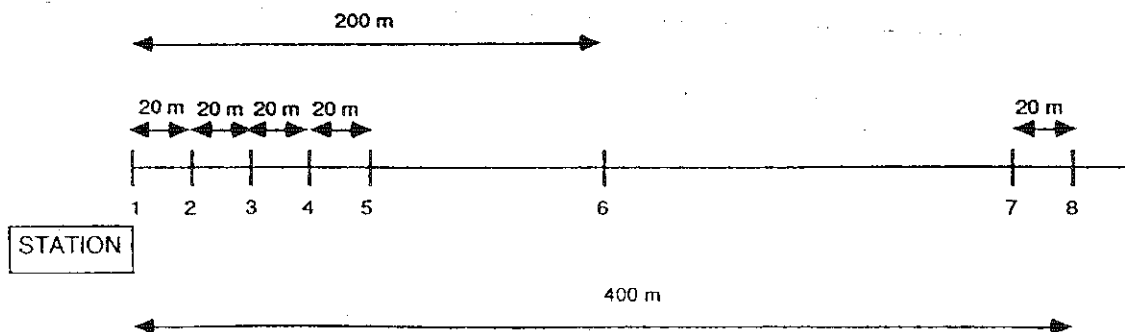
- un temps de montée par voyageur et un nombre de voyage relevé d'après les enquêtes
- un temps mort relevé par enquêtes
- le temps d'arrêt au feux est représenté par la logique des feux du système autobus ou métro léger.

5.6.1 Calibrage en vue d'une simulation de l'exploitation du métro léger

Le modèle de simulation Busway qui a été modifié pour pouvoir simuler le flux de trafic d'un métro léger a été calibré et validé pour un tronçon spécifique (Ouardia - Barcelone) de la ligne Sud du Métro Léger de Tunis.

Calibrage

On a choisi un tronçon de 400 mètres sur la ligne, à partir d'une station, dans lequel divers chronométrages ont été effectués. Ce tronçon a été divisé en 8 points où on a relevé au droit de chacun, l'heure de passage des véhicules pendant l'heure de pointe du matin. Les cinq premiers points ont été placés à une distance de 20 mètres entre eux et le sixième a été placé au milieu du tronçon (± 200 m de la station), et les deux points restants ont été placés en extrémité, séparés d'une distance de 20 mètres.



A partir de ce relevé de données, on a pu calibrer Busway. En ce qui concerne le choix de la vitesse pour le modèle il est fait à partir du véhicule qui suit.

Le processus de calibrage a été réalisé avec un échantillon de 48 relevés (cf tableau et courbe en annexe au § 5.6.1 Calibrage du modèle Busway), on a introduit dans le modèle de simulation les caractéristiques géométriques du tronçon et pour chaque véhicule leur vitesse maximum observée.

Dans la simulation, le modèle nous a donné pour chaque seconde la distance à partir de l'origine de chaque véhicule. Nous pouvons alors calculer l'heure de passage de chaque véhicule aux points fixés et nous pouvons donc comparer les données recueillies avec les valeurs simulées.

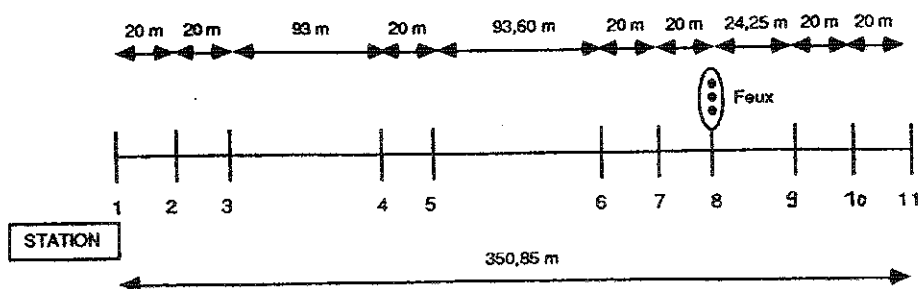
Ainsi, en utilisant le coefficient de détermination R^2 , on peut constater que le modèle est capable d'expliquer 94% de la variabilité des données.

En ce qui concerne les stations, nous avons noté les temps d'arrêt par véhicule, en exploitation avec des voyageurs, pour chaque station. A partir d'une enquête des mouvements de voyageurs dans les stations (montée/descente, charge) effectuée auparavant, on a pu déterminer les distributions de personnes qui montent dans chaque station. Dans la simulation, le calcul du temps d'arrêt en station est fonction du nombre de personnes qui montent et descendent du véhicule, du temps moyen pris par cette opération, pour chaque personne et aussi du temps mort (temps perdu pour l'ouverture et la fermeture des portes et pour le démarrage). En fonction de ces données, le modèle détermine le temps pendant lequel chaque véhicule est arrêté dans la station (le temps moyen relevé dans les 8 stations est égal à 52,13 secs. (36,02 secs. d' écart type) et le temps moyen calculé par la simulation est égal à 46,77 secs (20,82 secs. d'écart type) pour la ligne sud.

5.6.2 Calibrage en vue d'une simulation des convois d'autobus.

On a retenu un tronçon de 350 mètres sur le couloir d'autobus de Farrapos à Porto Alegre (Brésil) dans lequel divers chronométrages ont été effectués. Ce tronçon a été divisé en 10 parties par 11 points où on a relevé au droit de chacun, l'heure de passage des autobus en convois pendant l'heure de pointe.

Les différents points ont été implantés selon le schéma ci-après, le 8ième point étant placé au droit d'un carrefour à feux.



Le processus de calibrage a été réalisé avec un échantillon de 80 relevés (cf tableau en annexe au § 5.6.2 Calibrage en vue d'une simulation des convois d'autobus), il s'est déroulé comme décrit ci-dessus pour les tramways. En utilisant le coefficient de détermination R^2 , on peut constater que le modèle est capable d'expliquer 98,6% de la variabilité des données.

En ce qui concerne les stations, nous avons noté les temps d'arrêt, les montées/descentes des voyageurs, le processus d'enquête s'est déroulé comme décrit ci-dessus pour les tramways.

Beaucoup plus d'informations sur la conception et l'utilisation du modèle Busway apparaissent dans la thèse (Lindau L.A., 1983) et le rapport de stage (Ghandri S., 1993).

6. Plans d'expériences

Définitions

Observation et Expérimentation:

Depuis bien longtemps, l'observation et l'expérimentation sont deux outils essentiels pour l'avancement des sciences. L'observation permet d'acquérir une première connaissance des phénomènes de la nature, au sens le plus large, et d'en déduire des hypothèses, qui doivent ensuite être vérifiées et, éventuellement, précisées ou modifiées.

Dans certaines disciplines, telle la médecine, l'économie, la météorologie et les sciences de la Terre, il n'est pas ou il n'est guère possible de provoquer la réalisation des phénomènes que l'on désire étudier. La vérification des hypothèses émises ne peut alors se faire que par une observation étendue, dans le temps ou dans l'espace sous forme d'enquêtes.

Dans d'autres disciplines où, au contraire, les phénomènes étudiés peuvent être provoqués assez facilement, telles la biologie, la physique et la chimie, le contrôle des hypothèses se fera habituellement par l'expérience ou l'expérimentation. En effet, l'expérience (ou l'essai) a précisément pour but d'éprouver toute chose qui peut conduire à un enrichissement des connaissances et l'expérimentation peut être définie comme étant l'emploi systématique de l'expérience scientifique.

Mais il ne faut pas en conclure que l'expérience scientifique ne peut conduire qu'à l'acceptation ou au rejet, à la confirmation ou à l'information d'une hypothèse. Très souvent, l'expérience fournira en effet aussi, et peut-être surtout, des indications chiffrées qui ne sont nullement du type "tout ou rien".

Dans les transports :

L'application des plans d'expérience dans les transports, ne peut pas suivre les mêmes étapes que dans les autres sciences (biologie, chimie,), puisque pour faire l'expérimentation, en utilisant des observations réalisées en place, il faut de grands investissements financiers. Il n'est pas possible de construire pour chaque traitement différent une ligne de tramway, ou n'importe quel moyen de transport, étant donné que cela nécessiterait des infrastructures d'un coût très élevé et aussi, causerait de grandes perturbations dans les villes où on voudrait faire l'expérimentation. Donc, il faut trouver une autre façon d'obtenir les résultats nécessaires, sans faire une expérimentation en grandeur réelle, mais faire en sorte que les résultats soient valables.

Pour cela, il y a les méthodes de simulation ayant pour but d'estimer les observations qui seraient obtenues en pratique. Ces modèles utilisent toutes les caractéristiques d'une expérience proprement dite.

Pour ce travail, nous utilisons le modèle de simulation Busway, défini précédemment, pour obtenir les résultats nécessaires pour la concrétisation des plans d'expérience.

Caractéristiques de l'expérimentation

La définition des caractéristiques d'une expérience est une tâche qui doit être réalisée à la fois par le technicien et le statisticien. Cette caractérisation est définie par plusieurs opérations :

- Sélection des variables principales et auxiliaires et des champs de variation.
- Caractérisation des niveaux de variabilité :
 - fixés ou aléatoires
 - qualitatifs ou quantitatifs
- Définition des variables dépendantes.
- Définition des procédures de mesure.
- Prévion des interactions possibles entre les variables.
- Examen des variables qui ne peuvent pas être contrôlées.

Le plan d'expériences doit être établi par le technicien et le statisticien ensemble, la procédure qui doit être respectée est la suivante :

- Définition des contraintes d'origine pour les conditions expérimentales.
- Définition des types de répétitions, qui peuvent être plusieurs échantillons ou blocs d'un grand échantillon.
- Obtention préliminaire de l'erreur expérimentale.
- Définition du modèle mathématique et statistique.
- Définition de la taille de l'échantillon en fonction de l'erreur acceptable, du coefficient de variabilité et de la normalité des observations.
- Obtention des données. (Oliveira Simoes M.L.,1993).

Analyse des résultats:

- Traitement des données recueillies.
- Tests de signification, tests de comparaison, etc...
- Interprétation des résultats.

Les plans d'expérience:

Un plan d'expériences compte une série d'expériences structurée de manière à traduire les objectifs (à court terme) d'une stratégie expérimentale préalablement définie. Son efficacité, en termes d'information, est supérieure à celle de toute autre séquence expérimentale non structurée de même taille.

Les plans d'expérience sont la base d'une méthodologie destinée à optimiser la conduite et l'interprétation de l'expérimentation. En effet, les décisions importantes prises à partir des résultats expérimentaux, le coût croissant des expériences interdit de laisser à la seule intuition la recherche de la solution d'un problème quelconque.

Cette méthodologie permet notamment de répondre clairement et au moindre coût aux questions que se pose l'expérimentateur, à savoir :

- Quels sont les facteurs influents ?
- Comment déterminer une solution répondant aux objectifs visés ?

Expériences faisant intervenir deux ou plusieurs facteurs

Principes généraux

Très souvent, une même expérience fait intervenir simultanément deux ou plusieurs facteurs, qualitatifs ou quantitatifs. Pour chacun d'eux, la détermination du nombre de niveaux et le choix des différents niveaux se réalisent alors selon les mêmes principes que dans le cas d'un seul facteur. Mais en ce qui concerne la manière dont les différents facteurs sont associés l'un à l'autre, une distinction doit être faite entre les expériences factorielles et les expériences non factorielles.

L'expérience **FACTORIELLE** est celle dont les objets sont tels que chacun des niveaux d'un facteur est associé à chacun des niveaux de l'autre ou des autres facteurs, l'ensemble des objets, dans les cas les plus simples à deux facteurs, constituant donc un maillage carré ou rectangulaire complet. Par contre, nous qualifierons de **NON FACTORIELLE** toute expérience qui ne présente pas cette propriété.

Les expériences factorielles ont l'avantage de conduire, par l'analyse de la variance, à des décompositions et à des interprétations simples, en terme d'effets principaux et d'interactions. Ces expériences ont cependant l'inconvénient d'introduire rapidement, pour plus de deux facteurs, des nombres considérables d'objets.

La pratique des plans d'expériences peut se traduire rapidement et sans investissement matériel par des gains significatifs :

- Dans la productivité des installations et des équipes,
- Dans la qualité des informations et des produits.

La mise en oeuvre de cette méthodologie conduit notamment à des informations fiables, synthétiques et prévisionnelles. Elle répond au souci de minimiser et de quantifier la part prise par le hasard, tout en réduisant le travail expérimental.

Basée sur l'utilisation rigoureuse de techniques scientifiques, la méthodologie se caractérise par une phase déterminante d'analyse du problème. Elle donne ainsi la priorité au travail de conception, dans lequel s'exprime l'intuition ou la créativité de l'expérimentateur.

Facteur et réponse

L'énoncé de la liste des facteurs consiste à décrire l'ensemble des causes à priori possibles des variations du phénomène étudié. Les réponses concernent les manifestations de ce phénomène. Les notions de facteurs et de réponses ne sont pas encore suffisamment explicites pour donner un contenu précis aux travaux expérimentaux.

Les facteurs et les réponses doivent être concrétisés en termes de variables expérimentales, tenant compte notamment des contraintes propres au matériel dont dispose l'expérimentateur. L'ensemble des variables explicatives est à même de décrire les conditions de l'expérimentation. Les variables expliquées (ou variables réponses) doivent traduire les résultats observés, au regard du problème initialement posé.

Matrices d'expériences

La matrice d'expériences est la traduction formalisée du plan d'expériences. Elle se représente par un tableau dont chaque ligne est un traitement et chaque colonne une variable explicative. Elle fournit à l'expérimentateur la structure des données nécessaires à la réalisation de l'expérimentation.

Effets

On dit qu'une variable explicative X a un effet sur une variable expliquée Y si le changement de niveau de cette variable explicative (les autres variables explicatives restant constantes ou étant moyennes) modifie significativement, au regard de la dispersion expérimentale, les valeurs prises par cette variable Y .

Lorsque l'effet d'une variable explicative X_1 sur une variable expliquée Y dépend des niveaux d'une autre variable explicative X_2 , on dit que X_1 et X_2 sont en interaction relativement à Y .

On peut définir par récurrence l'interaction de trois variables explicatives (ou plus).

Plans factoriels 2^k

Les plans d'expériences factoriels qui enveloppe un grand nombre de facteurs, où il est nécessaire d'étudier l'effet interlié de ces facteurs sur la réponse sont largement utilisés en expérimentation.

Chaque facteur est à 2 niveaux seulement. Ces deux niveaux peuvent être quantitatifs ou qualitatifs.

Ce plan est appelé 2^k , parce que pour l'exécuter il faut 2^k observations.

Quand il y a plusieurs facteurs à étudier, le nombre total de combinaisons de traitements dans les plans factoriels 2^k croît vite. Souvent les recours disponibles sont bornés et le technicien cherchant à étudier un nombre maximum de facteurs, n'aura pas d'autre choix que faire le plan avec une seule répétition.

Avec une seule répétition du plan 2^k , il n'est pas possible d'estimer l'erreur expérimentale, c'est-à-dire, il n'est pas possible de calculer une variance pour l'erreur de façon usuelle. Ainsi, apparemment les hypothèses sur les effets principaux et les interactions ne pourraient pas être testées.

Pourtant, l'approximation conseillée pour l'analyse des plans d'expériences 2^k avec une seule répétition suppose que certaines interactions d'ordre supérieur soient insignifiantes et, dès lors que leurs variances auront toutes la valeur attendue s^k , elles pourront être additionnées pour former l'erreur expérimentale.

Il est conseillé de choisir les interactions qui vont former le terme d'erreur avant que l'analyse soit réalisée, car retenir simplement celles qui ont les plus petits effets pour former le terme d'erreur peut rendre une valeur considérablement surestimée pour ce terme. Usuellement le

plus petit plan pour lequel cette technique est conseillée est le 2^4 , et l'expérimentateur connaissant le phénomène qu'il est en train d'étudier, sait en général d'avance indiquer les interactions qui ne sont pas significatives.

Ces plans sont surtout utiles dans les stages initiaux d'un travail expérimental, quand il y aura probablement beaucoup de facteurs qui devront être analysés. Il offre le plus petit nombre de combinaisons de traitements qui permet l'étude de k facteurs dans un plan d'expériences factorielles complet. Comme il y a seulement 2 niveaux pour chaque facteur, on doit supposer que la réponse est presque linéaire dans l'intervalle choisi pour les niveaux des facteurs.

Plans factoriels fractionnés sans répétitions

Souvent, le technicien n'a pas la possibilité de réaliser plusieurs répétitions d'un plan d'expériences et en plus il ne peut pas faire le plan factoriel complet en un bloc. Alors, le plan d'expériences peut être divisé en blocs et l'information sera obtenue sur tous les effets, excepté quelques interactions d'ordre plus élevé qui sont choisies pour être confondues avec les blocs.

On observe qu'avec l'augmentation du nombre de facteurs les interactions d'ordre supérieur augmentent. Ces interactions d'ordre supérieur peuvent être utilisées comme terme d'erreur, quand les interactions de plus de 3 facteurs sont difficiles à interpréter et peu significatives, ce qui se produit fréquemment.

Pour établir des plans d'expériences avec un grand nombre de facteurs, il n'est pas économique d'exécuter le plan complet, et on peut obtenir sensiblement la même information avec la moitié des essais. Ceci s'appelle un plan factoriel fractionné.

La procédure pour définir les plans factoriels fractionnés consiste à diviser en deux blocs (ou en plus) le plan complet - en confondant une (ou plusieurs) interactions d'ordre supérieur - et après seulement, pour les essais, de choisir un bloc, de façon aléatoire.

Définition de chaque facteur utilisé dans cette étude :

A - "Vitesse désirée" : c'est la vitesse maximum que peut atteindre un véhicule en débit libre dans un tronçon (cette vitesse se caractérise par une distribution avec une moyenne, un minimum, un maximum et un écart type), en tenant compte des différents conflits avec les piétons, les voitures, etc. qui surviennent sur la voie.

B - "Flux de véhicules" : ce facteur mesure le nombre de véhicules qui circulent pendant une heure sur le tronçon considéré.

C - "Demande" : c'est le nombre de voyageurs total qui monte dans les véhicules pendant une heure sur le tronçon simulé.

D - "Temps de montée par voyageur" : ce facteur fixe le temps moyen que prend chaque voyageur pour monter dans le véhicule quelle que soit la station.

E - "Temps mort" : c'est le temps pendant lequel chaque conducteur peut être arrêté dans les stations sans que soient effectuées montées ou descentes, nous prenons dans le modèle une distribution du temps mort (moyen, écart type, mini, maxi) pour chaque station. Une analyse statistique de cette distribution permet de faire l'hypothèse d'une distribution de type Logarithme népérien (cf. exemple de courbe de cette distribution en annexe § 7.1.1 e validation du modèle Busway), cette hypothèse se confirme car en moyenne nous avons une grande concentration médiane puis nous trouvons des points très éloignés de ce premier groupe de points.

Pour avoir plus de détails à propos des plans factoriels 2^k ou des plans fractionnés $2^{(k-p)}$ il faut se reporter à Montgomery (1976) ou Nanni et Ribeiro (1991). En ce qui concerne le Second Order Composite Designs on doit se rapprocher de Box et Draper (1987).

Pour avoir plus de détails à propos des plans factoriels 2^k ou des plans fractionnés $2^{(k-p)}$ il faut se reporter à Montgomery (1976) ou Nanni et Ribeiro (1991). En ce qui concerne le Second Order Composite Designs on doit se rapprocher de Box et Draper (1987).

7. Etude des performances d'exploitation sur un couloir existant

7.1 Etude du cas du métro léger

7.1.1 Validation du modèle Busway sur une ligne du métro de Tunis

Après avoir calibré le modèle Busway pour la simulation de l'exploitation du métro léger sur la ligne sud, nous effectuons la validation du modèle dans sa nouvelle version pour la ligne sud pour s'assurer que les résultats obtenus par le modèle sont conformes à ceux obtenus par les relevés sur cette ligne. Nous listons ci-après l'ensemble des données nécessaires pour effectuer cette simulation. Ces données ont été fournies par la S.M.L.T. La simulation de chaque ligne a été réalisée pendant une heure à l'heure de pointe du matin, dans le sens Banlieue, Centre- ville.

La ligne sud

(cf carte du réseau de métro léger de Tunis ci-après)

Signalisation

Les signaux aux terminus et aux stations permettant le retournement sont commandés soit manuellement par les agents des stations, soit directement depuis le véhicule par induction.

Les signaux des carrefours avec priorité absolue du métro léger sont commandés automatiquement par les véhicules de métro. Aux carrefours importants où le métro léger n'est pas absolument prioritaire, les signaux sont commandés par l'ordinateur de gestion du trafic routier.

Régulation des conflits rail-route

Trois types de conflit ont été définis :

- **type 1:** accès privé ou semi-privé (< 1000 - 2000 uv/24h), avec une bonne visibilité.

Ce type de conflit étant mineur, les passages à niveau de type 1 sont exploités sans signalisation lumineuse, une croix de St André de part et d'autre du point de conflit indique la perte de priorité pour les véhicules individuels. Le métro est prioritaire.

- **type 2:** accès public; problème de sécurité (visibilité), les flux sécants étant ou pouvant devenir supérieurs à 2000 u.v./24h.

Du point de vue routier, ces conflits ont été régulés par un signal à 2 feux, clignotant alternativement.

Du point de vue ferroviaire, un feu spécial signale l'état de fonctionnement du signal routier au conducteur de métro. Le métro est prioritaire.

- **type 3:** accès public; carrefour à proximité et flux sécants importants (> 8000 - 10000 u.v./24h)

La signalisation routière correspondant à ce type de conflit est obtenue à partir d'une signalisation lumineuse.

La signalisation ferroviaire de type 3 est donnée par une boîte à feux à 3 modules: dans ce cas le métro n'est pas prioritaire.

La détection ferroviaire signale qu'il y a sur chaque voie soit une demande prioritaire métro, soit une demande non prioritaire métro, soit pas de demande métro.

Cette notion de demande prioritaire ou non a été introduite pour faire avec la régulation de carrefour, de la régulation d'espacement de convoi sur la ligne de métro léger. En l'absence momentanée de régulation propre au métro léger on a accordé des priorités différenciées en fonction des cas.

Les priorités données au métro léger sont totales pour les conflits de type 2, quasi totales pour les carrefours isolés du type 3, très importantes pour les carrefours coordonnés du type 3.

Le matériel roulant

Les véhicules retenus sont à 3 caisses, à double articulation, bi-directionnelles, 8 essieux, construits par Düwag et MAN sur le modèle des véhicules de la classe 6000 exploités à Hanovre, d'une longueur de 30 mètres, d'une largeur de 2,50 mètres, avec 5 larges portes par côté.

La capacité unitaire d'un élément est de 286 places dont 52 assises (6 voy/m²) ou 364 places (8 voy/m²), soit respectivement 572 places et 728 places par rame.

Lorsque sur la ligne Sud par exemple, on trouve à l'heure de pointe 15 rames doubles, l'offre de capacité théorique maximum est de 10 920 places offertes, sur la boucle centrale cette offre passe à 15 288 places (21 rames).

a) Caractéristiques géométriques :

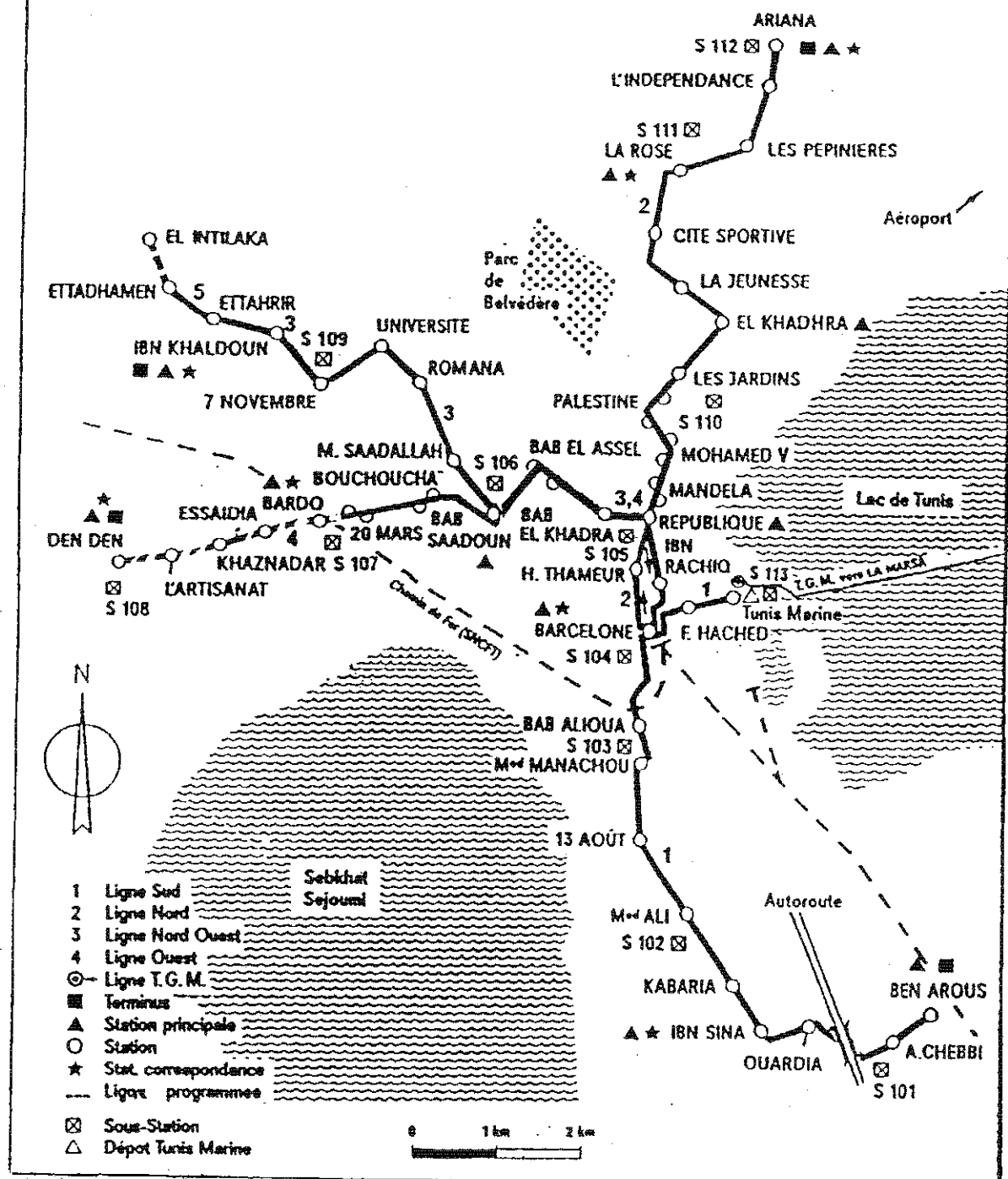
- longueur de la ligne (Ouardia à Barcelone) : 6123 m
- nombre de feux : 3 (+1)
- nombre de stations : 8
- localisation des feux (à partir de l'origine) :

Feux	Point métrique
1er	3363
2ième	4582
3ième	4810
4ième	6123

- localisation des stations (à partir de l'origine) :

Station	Point métrique
Ouardia	260
Ibn Sina	765
Kabaria	1465
Med Ali	2536
13 Août	3476
Manachou	4332
Bab Aleoua	4800
Barcelone	6073

METRO LEGER DE TUNIS



Source : Krug 12/90, der Stadtverkehr

b) Feux de signalisation :

Les feux de la ligne Sud sont de type 3, les données introduites sont extraites de la matrice de sécurité et du diagramme des phases de chaque carrefour:

- cycle de feux : 90 s
- minimum du temps de vert : 5 s
- minimum du temps de rouge : 30 s
- localisation des détecteurs de rames :

Feux	Point métrique
1er	3163
2ième	4382
3ième	4800
4ième	6073

- nombre de phases incompatibles :

Feux	Phases incompatibles
1er	3
2ième	4
3ième	3
4ième	1

- début de vert de chaque phase incompatible :

Feux	Début de vert
1er	10; 12; 0
2ième	0; 51; 83; 87
3ième	0; 13; 72
4ième	0

- minimum de vert de chaque phase incompatible :

Feux	Mini. de vert
1er	8; 8; 8
2ième	7; 7; 8; 7
3ième	7; 7; 7
4ième	1

c) Caractéristiques du trafic :

- flux horaire de véhicules : 15
- intervalle minimum de génération : 120 s
- temps de décharge aux feux : 5.00 s

d) Caractéristiques des véhicules :

- pente d'accélération : 0.015 m/s^3
- longueur du véhicule : 60.00 m
- distance d'arrêt : 2.00 m

- caractéristiques de la vitesse (m/s) :

- . vitesse désirée : 7,8 m/s
- . écart type : 1,5 m/s
- . minimum : 6,00 m/s
- . maximum : 12,00 m/s

La vitesse de consigne dans la simulation est la vitesse moyenne obtenue à partir de 6 relevés tachymétriques en différents points du tronçon.

e) Stations :

- temps de montée par personne : 2,30 s
- maximum du nombre de montées en fonction de la moyenne : 2,5
- facteur de réduction : 1.00

Ce temps de montées/descentes est obtenue à partir des chronométrages effectués en mai-juin 93 à l'heure de pointe entre Ouardia et Bab Aleoua. Le choix de la porte est aléatoire.

- nombre de montées (passagers/porte) par station :

Station	Moyenne	Ecart type
Ouardia	7,80	3,20
Ibn Sina	14,90	5,00
Kabaria	15,00	6,50
Med Ali	5,70	2,70
13 Août	4,20	1,60
Manachou	2,26	1,20
Bab Aleoua	6,30	1,70
Barcelone	15,00	5,00

- temps mort dans les stations :

les résultats sont obtenus en établissant une distribution des données relevées avec l'hypothèse que cette distribution est de type Logarithme normal (cf courbes en annexe § 7.1.1 e : Validation du modèle Busway):

Station	Moyenne	Ecart type
	en sec.	en sec.
Ouardia	40,44	2,71
Ibn Sina	44,70	1,73
Kabaria	23,57	2,27
Med Ali	16,77	1,71
13 Août	16,28	1,78
Manachou	9,97	1,47
Bab Aleoua	21,11	1,61
Barcelone	11,82	3,38

f) Résultats de la simulation

La simulation nous a permis d'obtenir les résultats suivants avec les données mentionnées ci dessus, en comparant ces résultats avec la réalité, on peut dire que le modèle est capable de représenter l'exploitation de cette ligne:

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
Temps de parcours en sec.	1230,37	175,55	1273,17	121,84

Nota: Dans la réalité, le calcul de la vitesse commerciale se fait entre Ouardia et Barcelone c'est à dire sur un tronçon de 5813 mètres. Le temps d'arrêt aux feux constaté est de 34,09 sec. avec un écart type 18,31 sec..

Dans la simulation, ce calcul se fait sur la longueur de tronçon égale ici à 6123 mètres soit un temps supplémentaire de 39,74 sec. avec une vitesse de 7,8 m/s. Le temps total pour une même longueur de parcours dans la simulation devient alors 1233,43 sec. à comparer avec le temps de parcours réel entre les stations Ouardia et Barcelone de 1230,37 sec. Le temps d'arrêt aux feux est de 15,94 sec..

7.1.2 Un plan d'expériences pour l'exploitation du métro léger

Nous effectuons un plan d'expériences pour un tronçon de la ligne sud du métro léger de Tunis à partir d'une série d'exécutions du modèle Busway avec différentes valeurs de facteurs permettant d'évaluer les performances d'exploitation de cette ligne.

Ce plan d'expériences est de type 2^k avec 3 répétitions et 5 facteurs ($k=5$). Chaque expérience se caractérise par l'exécution de Busway où nous fixons une combinaison déterminée des niveaux des facteurs contrôlables (données d'entrée du modèle qui identifient une certaine configuration géométrique et d'exploitation), et le résultat obtenu dans ce cas est la vitesse commerciale sur le tronçon appelée VECO.

A partir des données relevées sur la ligne sud, nous choisissons les valeurs maximales et minimales, enregistrées pour chaque facteur, pour définir les niveaux "+1" et "-1" nécessaires à la construction de ce plan d'expériences.

Les principaux facteurs explicatifs de l'exploitation de la ligne Sud que nous considérons dans ce plan sont :

- la vitesse désirée.
- le flux de véhicules/heure.
- la demande
- le temps moyen de montée par voyageur.
- les temps morts dans chaque station.

Toutes les autres caractéristiques du tronçon demandées par le modèle sont constantes et conformes à celles utilisées dans la validation (cf § 7.1.1).

Matrice de l'expérimentation sur l'exploitation de la ligne sud :

Vit.moy. en km/h	A vit.désir	B Flux	C Dem.	D Tpmont.	E LnTp-mort	R1	R2	R3
19,033	7,80 -1	15 -1	8424 -1	2 -1	2,317 -1	18,8	18,6	19,7
20,933	9,25 1	15 -1	8424 -1	2 -1	2,317 -1	20,7	20,3	21,8
19,700	7,80 -1	20 1	8424 -1	2 -1	2,317 -1	19,8	19,4	19,9
21,633	9,25 1	20 1	8424 -1	2 -1	2,317 -1	21,6	21,2	22,1
17,966	7,80 -1	15 -1	12636 1	2 -1	2,317 -1	17,7	17,6	18,6
19,800	9,25 1	15 -1	12636 1	2 -1	2,317 -1	19,3	19,6	20,5
18,866	7,80 -1	20 1	12636 1	2 -1	2,317 -1	18,6	18,7	19,3
20,600	9,25 1	20 1	12636 1	2 -1	2,317 -1	20,3	20,6	20,9
18,666	7,80 -1	15 -1	8424 -1	2,297 1	2,317 -1	18,4	18,3	19,3
20,566	9,25 1	15 -1	8424 -1	2,297 1	2,317 -1	20,1	20,3	21,3
19,300	7,80 -1	20 1	8424 -1	2,297 1	2,317 -1	19,2	19,1	19,6
21,266	9,25 1	20 1	8424 -1	2,297 1	2,317 -1	21,2	20,9	21,7
17,600	7,80 -1	15 -1	12636 1	2,297 1	2,317 -1	17,5	16,8	18,5
19,300	9,25 1	15 -1	12636 1	2,297 1	2,317 -1	18,8	19,0	20,1
18,166	7,80 -1	20 1	12636 1	2,297 1	2,317 -1	18,2	18,2	19,0
20,133	9,25 1	20 1	12636 1	2,297 1	2,317 -1	20,0	20,0	20,4
17,600	7,80 -1	15 -1	8424 -1	2 -1	3,011 1	17,5	16,8	18,5
19,166	9,25 1	15 -1	8424 -1	2 -1	3,011 1	19,2	18,2	20,1
17,900	7,80 -1	20 1	8424 -1	2 -1	3,011 1	17,8	17,3	18,6
19,266	9,25 1	20 1	8424 -1	2 -1	3,011 1	19,5	18,2	20,1
16,533	7,80 -1	15 -1	12636 1	2 -1	3,011 1	16,6	15,5	17,5
18,166	9,25 1	15 -1	12636 1	2 -1	3,011 1	17,8	17,7	19,0
17,100	7,80 -1	20 1	12636 1	2 -1	3,011 1	17,3	16,2	17,8
18,600	9,25 1	20 1	12636 1	2 -1	3,011 1	18,7	17,7	19,4
17,300	7,80 -1	15 -1	8424 -1	2,297 1	3,011 1	17,2	16,6	18,1
18,733	9,25 1	15 -1	8424 -1	2,297 1	3,011 1	18,4	17,8	20,0
17,500	7,80 -1	20 1	8424 -1	2,297 1	3,011 1	17,8	16,6	18,1
19,300	9,25 1	20 1	8424 -1	2,297 1	3,011 1	19,1	18,9	19,9
16,100	7,80 -1	15 -1	12636 1	2,297 1	3,011 1	15,9	15,7	16,7
17,600	9,25 1	15 -1	12636 1	2,297 1	3,011 1	17,3	17,1	18,4
16,833	7,80 -1	20 1	12636 1	2,297 1	3,011 1	16,9	16,1	17,5
18,433	9,25 1	20 1	12636 1	2,297 1	3,011 1	18,2	18,1	19,0

A l'aide d'un logiciel de statistique nous construisons la matrice d'expériences pour un plan factoriel complet (5 facteurs à 2 niveaux) et on exécute le modèle de simulation Busway pour chacun des 32 traitements avec 3 répétitions, nous obtenons les valeurs expérimentales de la variable réponse (vitesse commerciale). Ces valeurs peuvent être trouvées dans le tableau ci-dessus.

L'objectif de ce projet est d'estimer les effets de chaque facteur sur la vitesse commerciale VECO ainsi les résultats attendus permettent de classer et quantifier les facteurs qui ont la plus grande influence sur celle-ci.

Les 2 niveaux retenus pour chaque facteur sont présentés dans le tableau ci-après, tous les facteurs sont quantitatifs.

1* Ces facteurs sont représentés dans le modèle sous la forme d'une distribution avec une moyenne, un écart type, un minimum et un maximum.

2* La distribution est de la forme Log.normal où $\ln 10,15 = 2,317$ et $\ln 20,31 = 3,011$.

Toutes les valeurs de ces facteurs sont répertoriées au tableau ci-après.

Comment les niveaux de chaque facteur sont ils choisis ?

Facteurs Niveau	A Vitesse (m/s) 1*	B Flux (véh.)	C Demande (pass.) 1*	D Tps monté (secs.)	E Tps mort (sec.) 2*
-1 (bas)	7,80	15	8424	2,0	10,15
+1(haut)	9,25	20	12636	2,3	20,31

A - A partir de relevés tachymétriques et d'enquêtes réalisés sur la ligne sud et après avoir effectué une analyse de ces données, nous avons défini les valeurs de chaque niveau de ce facteur. Le niveau bas correspond à la vitesse désirée actuelle (moyenne retenue entre les résultats de relevés tachymétriques et des enquêtes OVD, cette vitesse représente la vitesse de consigne avec des conflits (P.N., passage-piétons, etc). Le niveau haut représente la vitesse de consigne actuelle augmentée de 18,5%, c'est une vitesse qui pourrait être obtenue après application de certaines mesures décrites ultérieurement dans ce rapport.

B - La valeur de niveau bas du flux est celle adoptée actuellement sur la ligne sud à l'heure de pointe. La valeur de niveau haut devrait être mise en place à moyen terme pour ajuster l'offre à la demande.

C - On considère ici comme "la demande" le nombre de montées sur le tronçon simulé de la ligne sud, la valeur du niveau bas de la demande correspond à la fréquentation actuelle (obtenue à partir de l'enquête SMLT de montée-descente de 1992 effectuée sur l'ensemble du réseau). La valeur du niveau haut correspond à une augmentation de 50% de la valeur actuelle, valeur qui pourra être atteinte à moyen terme.

D - Le temps moyen de montée par voyageur (temps effectif pour effectuer l'action de monter dans la rame par un voyageur) relevé sur l'enquête SMLT ligne sud (semblable aux autres lignes) est de 2,3 secs. Cette valeur est adoptée pour le niveau haut du facteur, le niveau bas correspond à ce temps diminué de 13,04%. Cette diminution du temps de montée nous semble pouvoir être obtenue par une réorganisation des montées-descentes au niveau de chaque porte en station.

E - Le temps mort est le temps écoulé entre le moment où le dernier voyageur monte dans la rame jusqu'au moment du démarrage de celle-ci. Ce temps a été chronométré pendant l'heure de pointe pour chaque station. La distribution du temps mort relevé sur les stations de la ligne Sud représente le niveau haut de ce facteur (la moyenne en Log. népérien de ces temps apparaît dans le tableau ci-dessus: 3,011 en valeur de Log. nép. soit 20,31 sec. Le niveau bas de ce facteur correspond à une diminution de 50% du temps mort actuel soit un temps égal à 10,15 sec, ou 2,317 en valeur Ln, niveau qui pourra être obtenu après une mise en application de nouvelles mesures (formation,organisation,etc.).

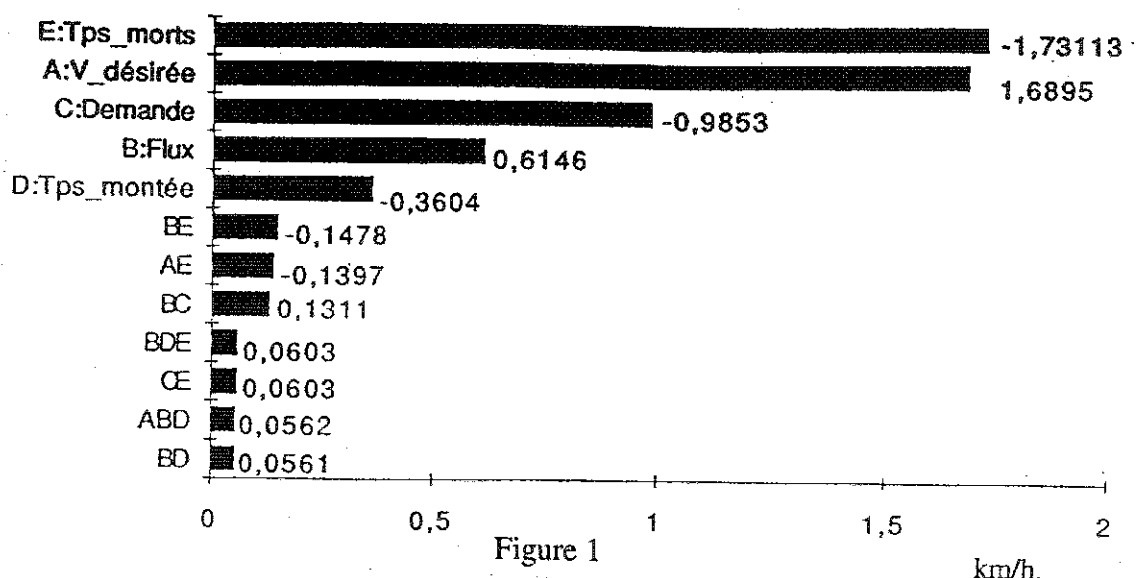
7.1.3 Obtention et analyse des résultats

Ce plan d'expériences nous montre les effets de chaque facteur et toutes les interactions possibles des facteurs sur la VECO. Pour chaque simulation nous avons effectué 3 répétitions. La valeur de la VECO, pour chaque condition de simulation (combinaison des facteurs) est obtenue à partir de la moyenne de ces 3 répétitions. Pour les 32 combinaisons possibles des facteurs dans ce plan d'expériences (c'est à dire toutes les liaisons possibles entre les 5 facteurs à 2 niveaux), nous avons obtenu une moyenne de la vitesse commerciale de 18,74 km/h qui varie entre 16,1 et 21,6 km/h.

Une de ces combinaisons représente l'exploitation actuelle où les facteurs "Vitesse", "Flux" et "Demande" étant au niveau -1, et les facteurs "Tps montée" et "Tps mort" au niveau +1 ont donné une vitesse commerciale moyenne après 3 répétitions de 17,3 km/h.

Chaque simulation tient compte des différentes liaisons pour les 2 niveaux établis, certains liens sont favorables à la vitesse commerciale, d'autres ne le sont pas. Par exemple, le lien entre le flux et la demande: la demande de 8424 pas./h est transportée par un flux de 15 rames/h, la demande de 12636 pas./h (+50%) peut être transportée par un flux de 20 rames avec un niveau de service légèrement différent : pour avoir le même niveau de service on devrait mettre en ligne 22,5 rames/h. Lorsque on combine la demande de 12636 pas./h avec un flux de 15 rames, il y a un niveau de service très différent parce qu'on passe d'une charge moyenne de 632 pas./rame (7 pas./m²) avec un flux de 20 rames à une charge de 842 pas./rame (10 pas./m²) avec un flux de 15 rames ce qui entraîne évidemment des temps d'arrêt plus long en station. Cette combinaison nécessaire pour le plan d'expériences est difficilement admissible dans la réalité car les rames sont alors en surcharge exceptionnelle de 10 pas./m².

La figure 1 ci-après, nous donne les différents effets de chaque facteur et les interactions sur la VECO dans l'ordre décroissant.



Plus la valeur absolue du résultat est grande, plus grand est l'impact du facteur (ou de la combinaison des facteurs) sur la vitesse commerciale. Un signe positif indique que lorsque le facteur concerné passe du niveau bas au niveau haut, il y a alors augmentation de la vitesse commerciale. Par contre un signe négatif indique que lorsque le facteur passe du niveau bas au niveau haut, il y a diminution de la vitesse commerciale. Par exemple, l'effet du temps mort qui passe de 10,15 secs à 20,31secs est estimé comme entraînant une diminution en moyenne de - 1,73 km/h sur la VECO.

Les résultats montrent que tous les facteurs simples ont statistiquement une influence sur la VECO. L'analyse statistique montre que les interactions de 1er ordre (entre 2 facteurs) BE, AE, BC, ont des effets significatifs. Les interactions de 2ème ordre (entre 3 facteurs) dont l'effet est inférieur ou égal à 0,0603 ne sont pas significatives statistiquement à un niveau de signification de 99%.

Dans ce plan d'expériences on note une plus grande influence du facteur "Tps mort" sur la vitesse commerciale et l'influence du facteur "Vitesse désirée" vient seulement en deuxième position. Les effets de ces deux facteurs sont nettement plus importants en valeur absolue que tous les autres effets pour ce plan d'expérience. Les effets des facteurs "Demande" et "Flux" ont une valeur respectivement décroissante sur la VECO, et le facteur "Tps de montée" vient en dernière position avec une faible influence sur la VECO.

Le facteur "Vitesse" a un effet positif égal à 1,69 km/h en moyenne sur la vitesse commerciale. Cette influence positive est évidente, la valeur de la vitesse commerciale pourrait passer ainsi de 17,3 km/h en moyenne actuellement à 18,99 km/h quand la vitesse de consigne passe du niveau bas au niveau haut.

Le facteur "Demande" a un effet supérieur en valeur absolue au facteur "Flux" mais négatif égal à - 0,99 km/h. Cette influence négative est évidente. Lorsque la demande passe du niveau bas au niveau haut en moyenne la VECO diminue de 0,99 km/h c'est à dire pourrait passer de 17,3 km/h vitesse commerciale actuelle à 16,31 km/h en moyenne.

Le facteur "Flux" a un effet positif égal à 0,61 km/h sur la vitesse commerciale. La valeur de la vitesse commerciale pour ce facteur pourrait passer ainsi de 17,3 km/h en moyenne actuellement à 17,9 km/h quand le "Flux " passe du niveau bas au niveau haut. Ce facteur présente en comparaison avec les facteurs "Vitesse" et "Tps mort" un impact proportionnellement plus petit sur la vitesse commerciale, cet impact de signe positif (en augmentant le flux, on augmente la vitesse commerciale), s'explique par deux faits : d'une part, cette ligne a une capacité prévue d'environ 30 rames à l'heure par sens, donc toutes les combinaisons de flux simulées pour ce plan d'expérience se trouvent bien en dessous de cette limite. Lorsqu'on augmente le flux de 15 à 20 rames/heure, compte tenu de la priorité presque absolue aux carrefours, il n'apparaît pas de problèmes majeurs sur la ligne. D'autre part, le fait d'introduire un plus grand nombre de rames/heure sans augmenter la demande diminue le temps d'arrêt dans les stations ce qui est favorable à l'augmentation de la VECO.

Le facteur "Tps_montée" a un effet négatif égal à - 0,36 km/h sur la vitesse commerciale, qui pourrait passer de 17,3 km/h actuellement à 16,94 km/h quand ce facteur passe du niveau bas au niveau haut.

Comment obtenir la meilleure VECO à partir de ce plan ?

La combinaison qui maximise la VECO est effectuée selon le tableau suivant, la vitesse obtenue avec ces niveaux de facteur est de 21,633 km/h relevée dans l'histogramme des résultats du plan d'expérience :

Facteurs	A Vitesse	B Flux	C Demande	D Tps montée	E Tps mort
Niv. Max	+1	+ 1	- 1	- 1	- 1
Niv.actuel	- 1	- 1	- 1	+ 1	+ 1

La vitesse commerciale obtenue à partir de ces niveaux actuels des différents facteurs est de 17,3 km/h.

A partir de l'histogramme des résultats du plan d'expériences nous pouvons donner l'incidence de chaque facteur sur cette vitesse commerciale actuelle, ainsi:

- si tps mort E baisse de 50%, on augmente la VECO de : 1,73 km/h.
 - si tps montée D baisse de 13%, on augmente la VECO de: 0,36 km/h.
 - si on accroît le débit B de 33,3%, on augmente la VECO de: 0,61 km/h.
 - si on accroît la vitesse dés. de 18,5%, on augmente la VECO de: 1,69 km/h
- soit un total de: 4,39 km/h

qui est ajouté à la VECO actuelle de 17,3 km/h, ce qui donne une VECO maximum de 21,69 km/h.

Un calcul similaire pourrait être fait pour d'autres combinaisons dans les limites de chaque niveau de ce plan d'expériences.

7.1.4 Analyse de la capacité de la ligne Sud

Nous recherchons les limites de capacité du tronçon étudié sur la ligne Sud en effectuant plusieurs simulations à l'aide de Busway à partir des données actuelles d'exploitation et en faisant varier le flux horaire de 15 à 40 rames. Cette limite est analysée à partir de la vitesse commerciale et du phénomène de queue qui apparaît lorsque le nombre de rames à l'heure augmente. Le logiciel permet de connaître le nombre de rames en position de queue aux carrefours et aux stations. Par exemple, si nous trouvons une queue d'une rame maximum en attente pour accéder à la station voisine pour 5 stations sur 8 dans l'heure de simulation, ceci signifie que soit la même rame est arrêtée sur 5 stations en 2^{ème} position ou 5 rames différentes sont arrêtées une fois dans une station du tronçon simulé. Les résultats de ces différentes simulations sont représentés dans le graphe 1 ci-dessous.

Nous observons tout d'abord sur le graphe qu'une augmentation du flux de 15 à 40 rames entraîne une baisse de la vitesse commerciale qui passe de 17,3 à 14,20 km/h. Le flux maximum que le logiciel a pu simuler sur ce tronçon est de 40 rames à l'heure, le système pourrait alors transporter 22 464 pas./h/sens dans des conditions de plus en plus perturbées.

Pour un flux de 20 rames/h (11232 pas./h/sens), nous constatons un phénomène de queue de une rame maximum en attente pour accéder à la station voisine (pour 5 stations sur 8).

Pour un flux de 25 rames/h (14040 pas./h/sens), nous constatons 2 rames en attente à Ibn Sina et dans 4 stations sur huit, il y a une rame en attente.

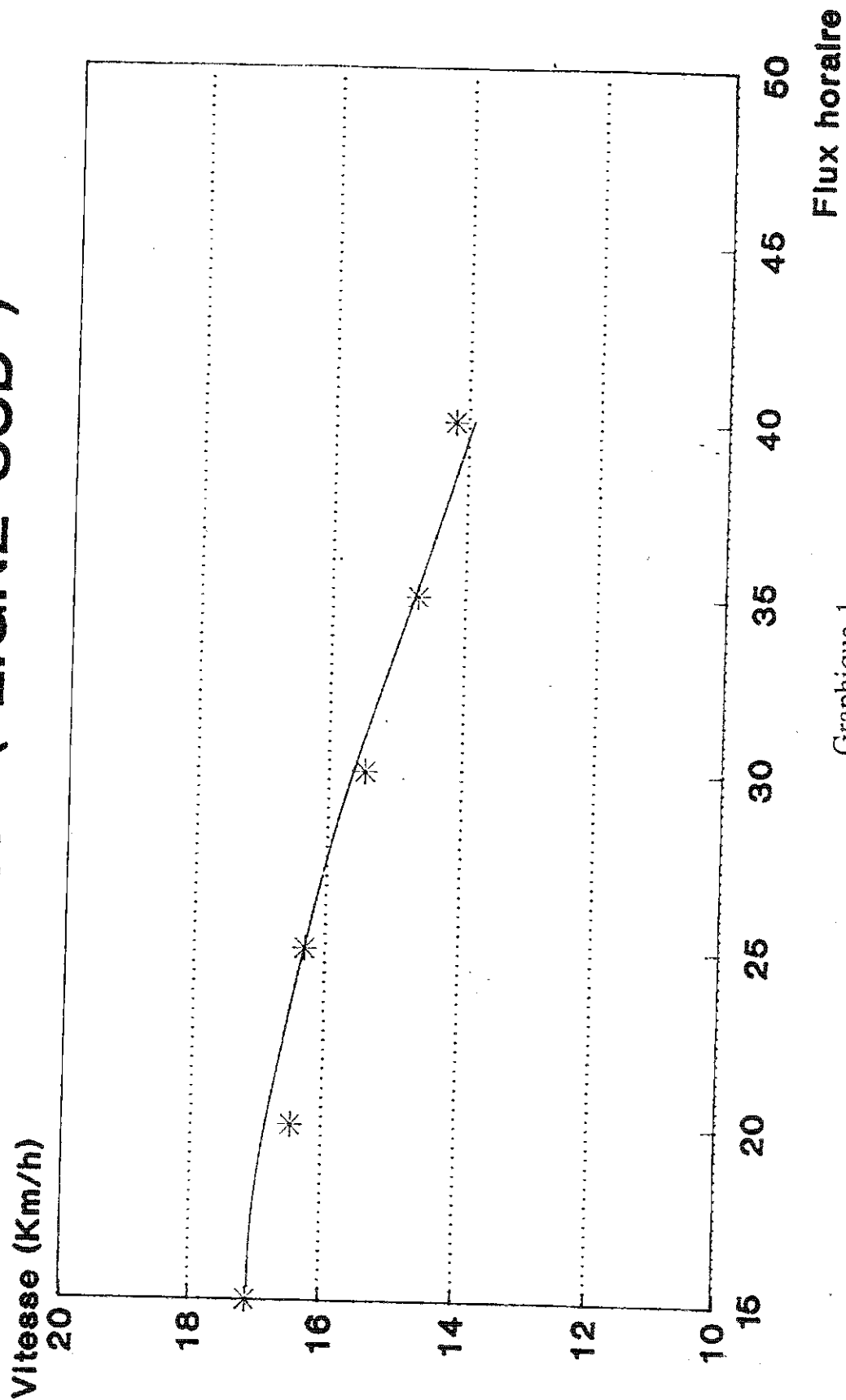
Pour un flux de 30 rames/h (16848 pas./h/sens), nous constatons à Ibn Sina 3 rames en attente et une rame en attente dans 4 stations sur 8.

Pour un flux de 35 rames/h (19656 pas./h/sens), le phénomène de queue commence à s'accélérer, il y a une queue de 5 rames à Ibn Sina, une queue de 2 rames dans 2 stations sur 8 et une rame en attente dans 3 stations sur 8.

Pour un flux de 40 rames/h (22464 pas./h/sens), nous constatons une diminution significative de la vitesse commerciale (14,2 km/h) et de grandes queues en station et aux feux, (une queue de 6 rames se forme en entrée d'Ibn Sina, une queue de 3 rames dans une station sur 8 et une rame en attente dans 4 stations sur 8.), ce qui n'est plus acceptable.

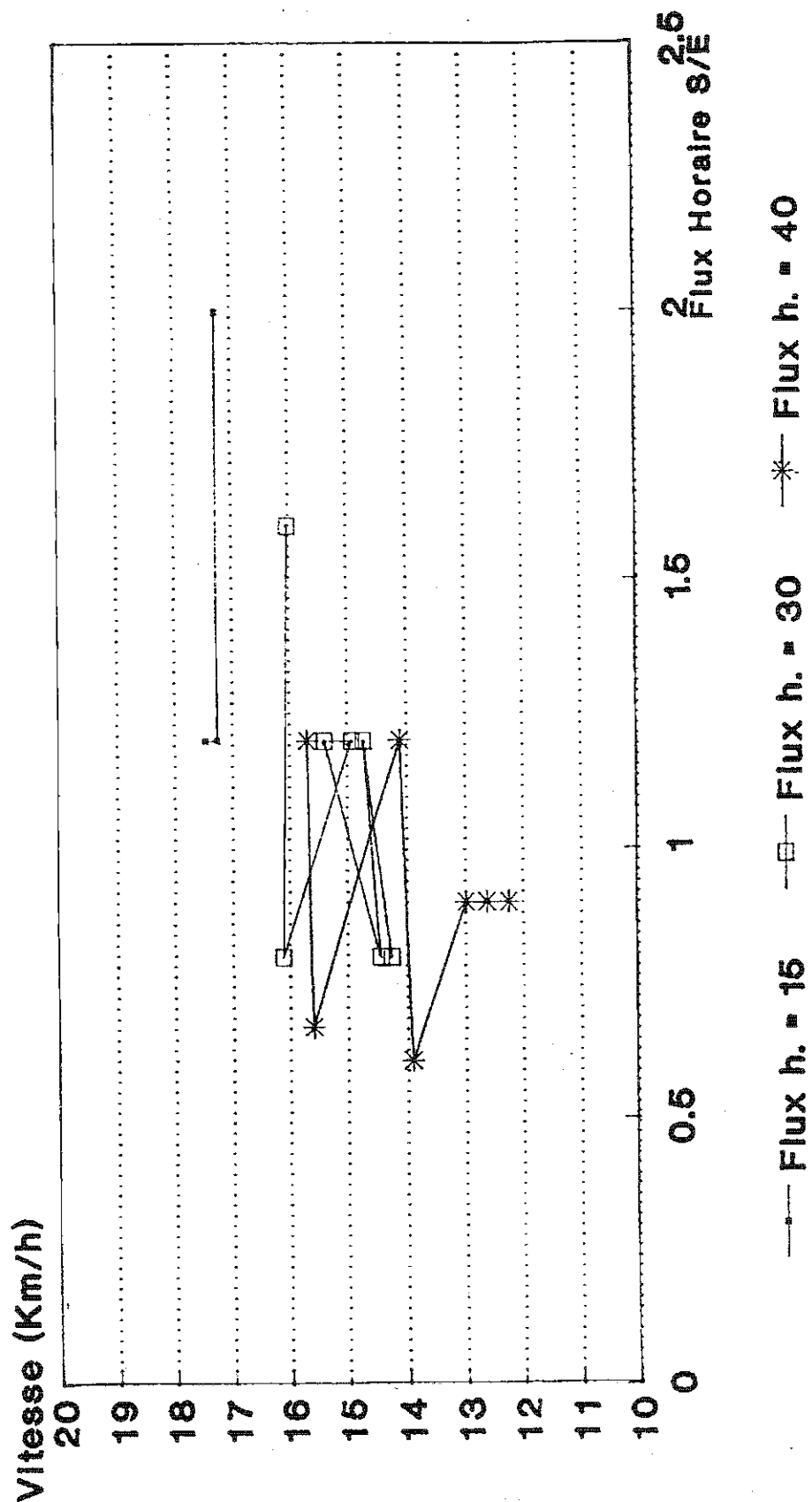
Ainsi, dès que l'on augmente le flux de 15 à 20 rames/h nous constatons une baisse de la vitesse commerciale (16,46 km/h) et l'apparition d'une queue d'une rame dans 5 stations sur 8 ce qui est dû aux temps d'attente important dans les stations. Par ailleurs la station de correspondance d'Ibn Sina perturbe l'exploitation de la ligne avec ses longs temps d'attente, il est prévu que cette correspondance soit déplacée et mieux organisée sur une station de la branche à réaliser vers El Mourouj dans un proche avenir.

VITESSE / FLUX S.M.L.T (LIGNE SUD)



PERFORMANCE

S.M.L.T (LIGNE SUD)



S/E=Sorties des rames/Entrées de rames Graphique 2

Le graphe 2 est constitué à partir de simulations où nous établissons la relation entre la vitesse commerciale et le rapport (Flux S/E) flux de sortie estimé divisé par flux d'entrée (connu) sur le tronçon. Chaque point de la relation entre vitesse et flux S/E représente 5 minutes d'exploitation où le flux de sortie est calculé pour une heure d'exploitation. On s'attend à ce que ce flux S/E soit calé autour de la valeur 1 c'est à dire qu'il y ait autant de véhicules sortant sur le tronçon que de véhicules entrant pour une capacité maximum de la ligne. Lorsque ce rapport des flux S/E se situe au dessus de 1 ($S > E$) cela signifie que la capacité de la ligne n'est pas entièrement utilisée, ainsi :

- pour un flux de 15 rames à l'heure, le graphe montre que le rapport S/E se situe entre 2 et 1,2 pour une VECO située entre 17,27 et 17,47 km/h, (le tronçon pourrait absorber plus de rames dans l'heure).

- pour un flux de 30 rames à l'heure, le graphe montre qu'il y a une grande variation de la VECO de 16,12 à 14,27 km/h ainsi qu'une variation de l'estimation du rapport S/E, le flux S/E se situe de part et d'autre de la valeur 1, ce qui présente un début de perturbation de l'exploitation.

- pour un flux de 40 rames à l'heure, le graphe montre que la VECO décroît au fur et à mesure de l'estimation de chaque point jusqu'à 12 km/h : c'est la saturation du système même avec la priorité presque absolue aux feux. Pour un tel flux il y a pénalisation des autres axes de circulation, il faudrait modifier la gestion des feux qui deviendrait alors plus pénalisante pour le métro, la saturation interviendrait avant d'exploiter le tronçon avec un flux de 40 rames.

7.1.5 Analyse de la vitesse commerciale en fonction du temps d'arrêt en station et de la vitesse désirée.

a) Incidence du temps d'arrêt en station sur la vitesse commerciale

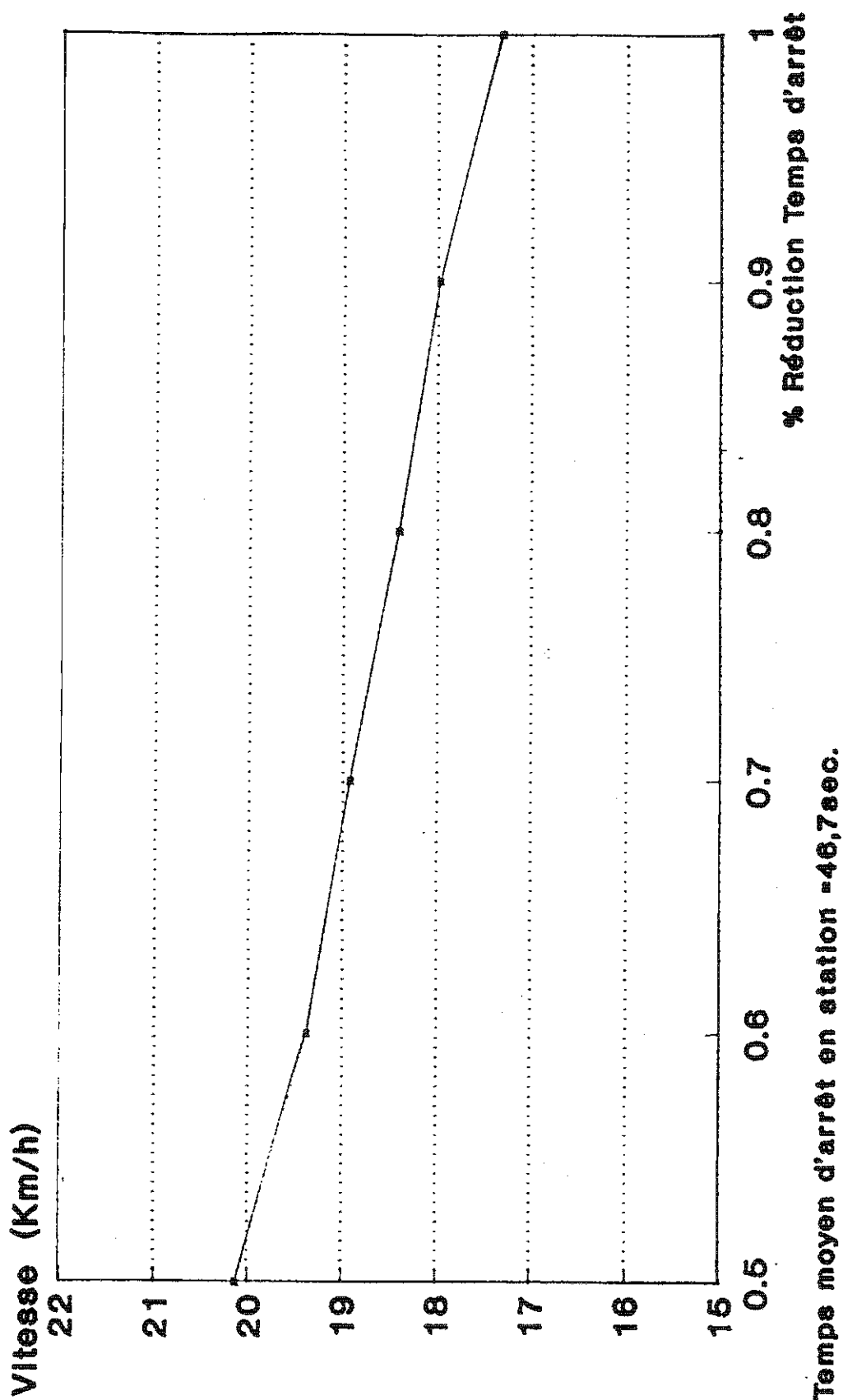
Le graphe 3 représente la relation entre la vitesse commerciale et la variation du temps d'arrêt en station.

Le temps d'arrêt d'une rame en station est représenté dans le logiciel par un nombre de montées (obtenu à partir d'une distribution) multiplié par un temps moyen de montée par voyageur auquel on ajoute un temps mort (obtenu à partir d'une distribution). Nous établissons le graphe avec le temps d'arrêt réduit chaque fois de 10% à partir de la situation actuelle d'exploitation de la ligne jusqu'à une valeur de 50% de ce temps. Une réduction de 50% du temps mort à laquelle on ajoute une réduction de 13% du temps de montée représente une diminution de 32,44% en moyenne du temps d'arrêt en station. Ce graphe 3 montre qu'une diminution du temps d'arrêt de 50% dans toutes les stations permet d'augmenter la vitesse commerciale de 16,3 à 20,13 km/h soit 16,36%.



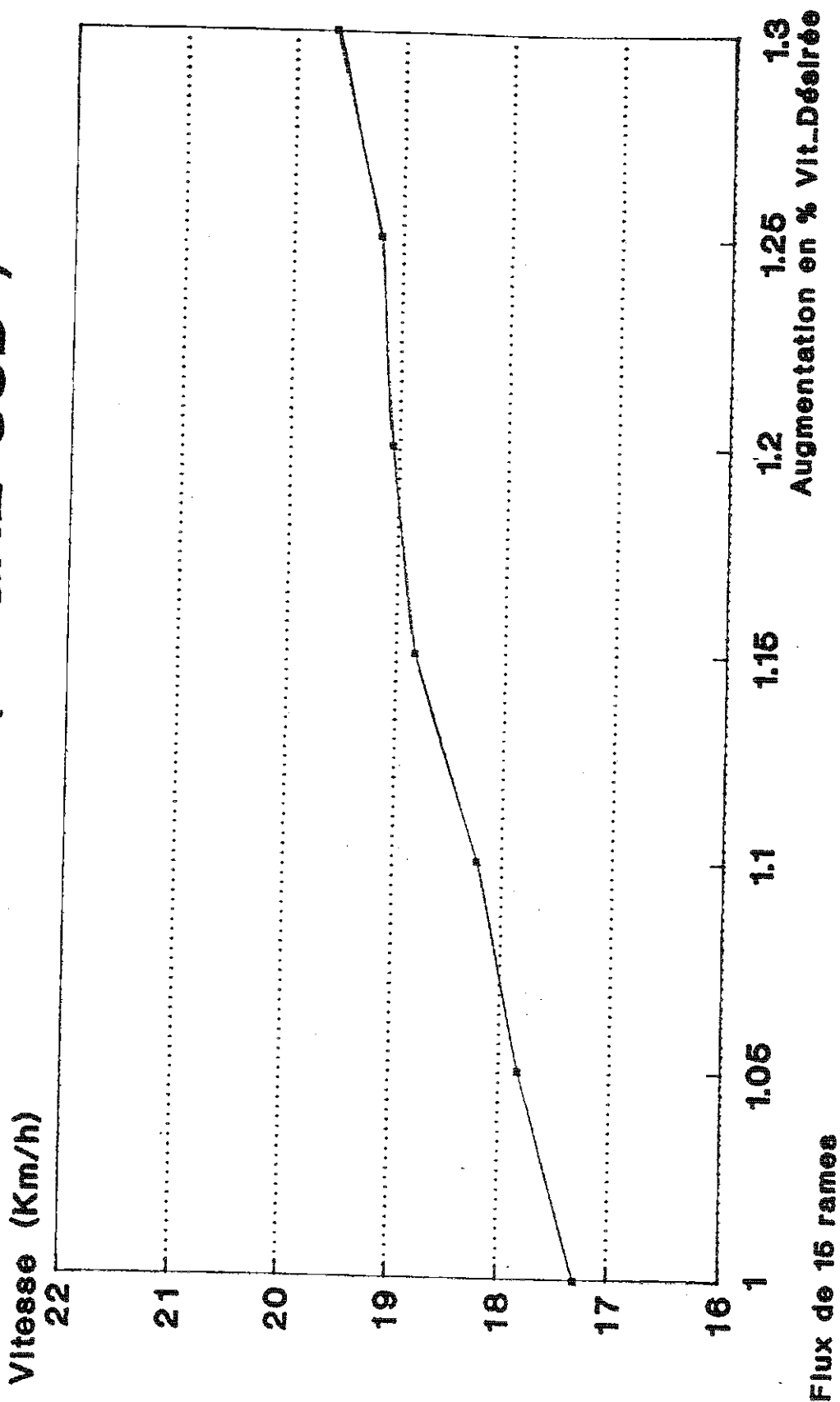
VITESSE / TEMPS D'ARRÊT

S.M.L.T (LIGNE SUD)



Graphique 3

VITESSE / VITESSE DESIREE S.M.L.T (LIGNE SUD)



Graphique 4

b) Incidence de la vitesse de consigne sur la vitesse commerciale

Le graphe 4 représente la relation entre la vitesse commerciale et la variation de la vitesse désirée jusqu'à 30% de plus que la vitesse désirée actuelle utilisée par le modèle. Une augmentation supérieure à 30% de la vitesse désirée actuelle nous paraît difficilement réalisable compte tenu de la complexité des contraintes actuelles.

Ce graphe 4 montre que pour une augmentation de la vitesse de consigne de 30%, la vitesse commerciale augmente de 17,3 à 19,63 km/h soit 13,46%.

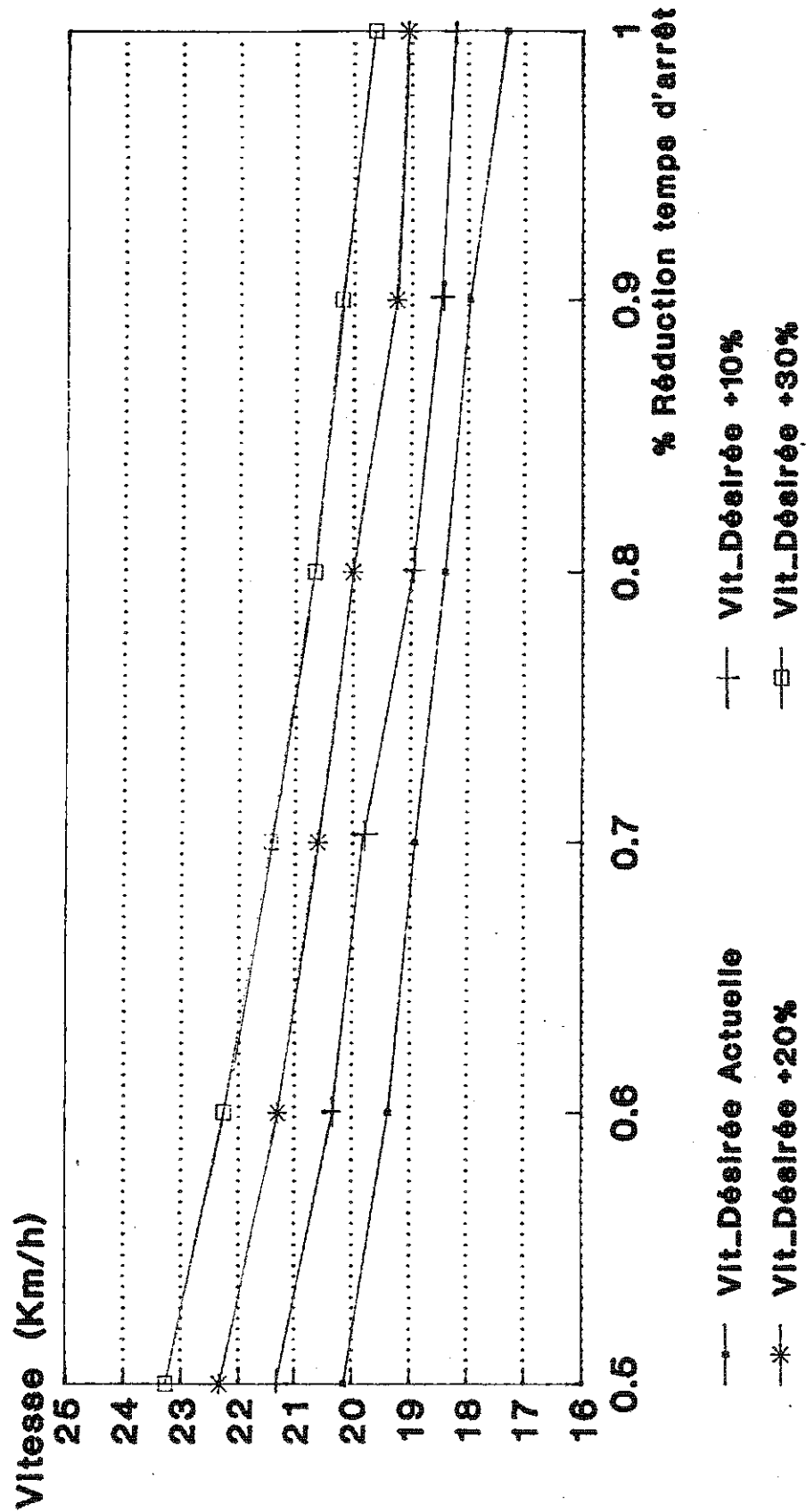
c) Incidence de la vitesse désirée et du temps d'arrêt en station sur la vitesse commerciale

Le graphe 5 illustre les effets cumulés d'une augmentation de la vitesse désirée et d'une réduction du temps d'arrêt en station.

Si on se réfère à la vitesse commerciale de l'exploitation actuelle, le graphe 5 montre qu'un accroissement de 30 % de la vitesse désirée cumulé avec une réduction du temps d'arrêt de 50 % pourrait augmenter la vitesse commerciale de 17,3 à 23,26 km/h soit 34,45%.

VITESSE / TEMPS D'ARRET

S.M.L.T (LIGNE SUD)



Graphique 5

Temps moyen d'arrêt en station -46,7sec

7.2 Etude du cas de l'autobus en site propre

7.2.1 Un plan d'expériences pour l'exploitation de l'autobus en site propre

Nous utilisons le site du métro léger de Tunis (le tronçon le plus chargé de la ligne sud) pour simuler l'exploitation de cette ligne avec des autobus en site propre. Nous effectuons le même type de plan d'expériences que celui établi pour une exploitation de cette ligne avec le métro léger (cf. § 7.1.2). En effet, sur le tronçon Ouardia - Barcelone avec la même implantation de stations et le même niveau de la demande nous simulons l'exploitation avec plus de 100 autobus/heure/sens, nombre important au regard des conflits dans les carrefours. Avec ce flux, il n'est pas possible de donner la priorité absolue aux 3 carrefours importants de ce tronçon (cf. métro léger ligne sud) mais aussi aux autres carrefours qui ont pu être supprimés dans la simulation pour le métro léger (priorité au métro léger), nous avons donc dû rajouter dans cette simulation 5 carrefours.

Les carrefours du couloir d'autobus sont contrôlés par des feux standards tricolores sans prise en compte avec un cycle de 90 sec. un temps de vert de 58 sec.

- localisation des feux (à partir de l'origine) :

Feux	Point métrique
1er	605
2ième	788
3ième	1376
4ième	2301,5
5ième	2601
6ième	3363
7ième	4582
8ième	4810
9ième	6123

Nous essayons d'être aussi réaliste que possible car il y a une autre solution qui consisterait à dévier la circulation générale par des latérales au site propre autobus vers les 3 carrefours où les autobus ne seraient pas prioritaires : cette solution plus onéreuse, augmentant les distances de trajet des automobilistes risquerait de ne pas être acceptée; actuellement le passage de 15 rames /h/sens au droit de l'ensemble des carrefours où il est prioritaire ne gêne pas les automobilistes riverains, par contre le passage de plus de 100 autobus /h/sens pénaliserait les automobilistes riverains.

Nous n'avons pas de relevés concernant les caractéristiques d'exploitation du réseau d'autobus de Tunis aussi nous utilisons les données d'autres réseaux de pays en développement (Lindau 1983, Gardner 1991).

A l'aide d'un logiciel de statistique nous construisons la matrice d'expériences pour un plan factoriel complet (5 facteurs à 2 niveaux) et on exécute le modèle de simulation Busway pour chacun des 32 traitements avec 2 répétitions, nous obtenons les valeurs expérimentales de la variable réponse (vitesse commerciale). Ces valeurs peuvent être trouvées dans le tableau ci-après.

L'objectif de ce projet est d'estimer les effets de chaque facteur sur la vitesse commerciale VECO ainsi les résultats attendus permettent de classer et quantifier les facteurs qui ont la plus grande influence sur celle-ci.

Les 2 niveaux retenus pour chaque facteur sont présentés dans le tableau ci-après, tous les facteurs sont quantitatifs.

1* Ces facteurs sont représentés dans le modèle sous la forme d'une distribution avec une moyenne, un écart type, un minimum et un maximum.

Toutes les valeurs de ces facteurs sont répertoriées au tableau ci-dessous.

Facteurs Niveau	A Vitesse (m/s) 1*	B Flux (véh.)	C Demande (pass.) 1*	D Tps monté (secs.)	E Tps mort (sec.)
-1 (bas)	7,80	108	8424	2,0	10,15
+1(haut)	10,5	144	12636	2,3	20,31

Vit.moy. en km/h	A vit.désir	B Flux	C Dem.	D Tpmont.	E Tp-mort	R1	R2
17,05	7,80 -1	108 -1	8424 -1	2 -1	10,15 -1	17,2	16,9
19,30	10,5 1	108 -1	8424 -1	2 -1	10,15 -1	18,5	20,1
17,75	7,80 -1	144 1	8424 -1	2 -1	10,15 -1	18,5	17,0
20,10	10,5 1	144 1	8424 -1	2 -1	10,15 -1	19,9	20,3
15,50	7,80 -1	108 -1	12636 1	2 -1	10,15 -1	15,7	15,3
17,05	10,5 1	108 -1	12636 1	2 -1	10,15 -1	16,5	17,6
15,60	7,80 -1	144 1	12636 1	2 -1	10,15 -1	15,6	15,6
17,40	10,5 1	144 1	12636 1	2 -1	10,15 -1	18,0	16,8
16,40	7,80 -1	108 -1	8424 -1	2,297 1	10,15 -1	16,2	16,6
18,30	10,5 1	108 -1	8424 -1	2,297 1	10,15 -1	17,8	18,8
17,00	7,80 -1	144 1	8424 -1	2,297 1	10,15 -1	16,4	17,6
19,45	10,5 1	144 1	8424 -1	2,297 1	10,15 -1	19,8	19,1
14,75	7,80 -1	108 -1	12636 1	2,297 1	10,15 -1	14,7	14,8
16,15	10,5 1	108 -1	12636 1	2,297 1	10,15 -1	16,9	15,4
14,65	7,80 -1	144 1	12636 1	2,297 1	10,15 -1	14,7	14,6
16,60	10,5 1	144 1	12636 1	2,297 1	10,15 -1	16,1	17,1
15,75	7,80 -1	108 -1	8424 -1	2 -1	20,31 +1	16,0	15,5
17,50	10,5 1	108 -1	8424 -1	2 -1	20,31 +1	18,1	16,9
16,20	7,80 -1	144 1	8424 -1	2 -1	20,31 +1	16,6	15,8
17,65	10,5 1	144 1	8424 -1	2 -1	20,31 +1	17,7	17,6
14,35	7,80 -1	108 -1	12636 1	2 -1	20,31 +1	14,3	14,4
15,85	10,5 1	108 -1	12636 1	2 -1	20,31 +1	15,4	16,3
14,35	7,80 -1	144 1	12636 1	2 -1	20,31 +1	14,4	14,3
15,50	10,5 1	144 1	12636 1	2 -1	20,31 +1	15,9	15,1
15,30	7,80 -1	108 -1	8424 -1	2,297 1	20,31 +1	15,2	15,4
16,90	10,5 1	108 -1	8424 -1	2,297 1	20,31 +1	16,2	17,6
15,55	7,80 -1	144 1	8424 -1	2,297 1	20,31 +1	15,3	15,8
17,35	10,5 1	144 1	8424 -1	2,297 1	20,31 +1	17,5	17,2
13,55	7,80 -1	108 -1	12636 1	2,297 1	20,31 +1	13,7	13,4
14,90	10,5 1	108 -1	12636 1	2,297 1	20,31 +1	15,3	14,5
13,75	7,80 -1	144 1	12636 1	2,297 1	20,31 +1	13,8	13,7
14,60	10,5 1	144 1	12636 1	2,297 1	20,31 +1	14,1	15,1

Comment les niveaux de chaque facteur sont ils choisis ?

A - Le niveau bas correspond à la vitesse désirée actuelle des véhicules de métro léger. La vitesse au niveau haut représente la vitesse de consigne actuelle augmentée de 34,6 %, c'est une vitesse qui est obtenue sur le réseau de Porto Alegre (Lindau, 1983). A priori, on peut dire qu'un véhicule sur pneus accélère et décélère plus vite qu'un véhicule sur rails, ce qui leur permet d'atteindre une vitesse de consigne plus élevée notamment dans des interstations inférieures à 1km.

B - La valeur de niveau bas du flux représente la demande actuelle (108 autobus de 10 places maxi à l'heure de pointe) est celle adoptée actuellement sur la ligne sud avec le métro léger à l'heure de pointe. La valeur de niveau haut devrait être mise en place à moyen terme pour ajuster l'offre à la demande.

C - On considère ici comme "la demande" le nombre total de /*montées sur le tronçon simulé de la ligne sud, la valeur du niveau bas de la demande correspond à la fréquentation actuelle. La valeur du niveau haut correspond à une augmentation de 50% de la valeur actuelle, valeur qui pourra être atteinte à moyen terme. La section la plus chargée du tronçon simulé à l'heure de pointe donne une demande de 6800 pas./h/sens.

D - Le temps moyen de montée par voyageur (temps effectif pour effectuer l'action de monter dans la rame par un voyageur) relevé sur l'enquête SMLT ligne sud (semblable aux autres lignes) est de 2,3 secs. Nous gardons cette valeur qui est représentative du niveau d'accès dans les stations, ce temps a été relevé sur une porte du métro léger comme pour l'autobus. Cette valeur est adoptée pour le niveau haut du facteur, le niveau bas correspond à ce temps diminué de 13,04%. Cette diminution du temps de montée nous semble pouvoir être obtenue par une réorganisation des montées-descentes au niveau de chaque porte en station.

E - Le temps mort est le temps écoulé entre le moment où le dernier voyageur monte dans la rame jusqu'au moment du démarrage de celle-ci. Ce temps a été chronométré pendant l'heure de pointe pour chaque station. Le niveau bas de ce facteur correspond à une diminution de 50% du temps mort actuel soit un temps égal à 10,15 sec.. D'après les données du TRL (Gardner, 1991) le temps mort en station avec des autobus se situe entre 5,2 sec. et 23 sec.: nous maintenons le temps mort relevé pour le métro léger de 20,31 sec. et 10,15 sec. à terme. Les systèmes qui transportent le plus de passagers avec des autobus organisé en convois sur site propre ont un temps mort situé entre 5 et 9 sec.

7.1.3 Obtention et analyse des résultats

Ce plan d'expériences nous montre les effets de chaque facteur et toutes les interactions possibles des facteurs sur la VECO.

Pour chaque simulation nous avons effectué 2 répétitions. La valeur de la VECO, pour chaque condition de simulation (combinaison des facteurs) est obtenue à partir de la moyenne de ces 2 répétitions. Pour les 32 combinaisons possibles des facteurs dans ce plan d'expériences (c'est à dire toutes les liaisons possibles entre les 5 facteurs à 2 niveaux), nous avons obtenu une moyenne de la vitesse commerciale de 16,31 km/h qui varie entre 13,55 et 20,1 km/h.

Une de ces combinaisons représente l'exploitation simulée dans les mêmes conditions que l'exploitation du métro léger où les facteurs "Vitesse", "Flux" et "Demande" étant au niveau -1, et les facteurs "Tps montée" et "Tps mort" au niveau +1 ont donné une vitesse commerciale moyenne après 2 répétitions de 15,3 km/h. Si on admet une vitesse de consigne de 10,5 m/s la VECO devient 17,0 km/h.

Chaque simulation tient compte des différentes liaisons pour les 2 niveaux établis, certains liens sont favorables à la vitesse commerciale, d'autres ne le sont pas. Nous pourrions faire la même analyse concernant le lien entre le flux et la demande que pour le métro léger (cf. § 7.1.3).

La figure 2 ci-après, nous donne les différents effets de chaque facteur et les interactions sur la VECO dans l'ordre décroissant.

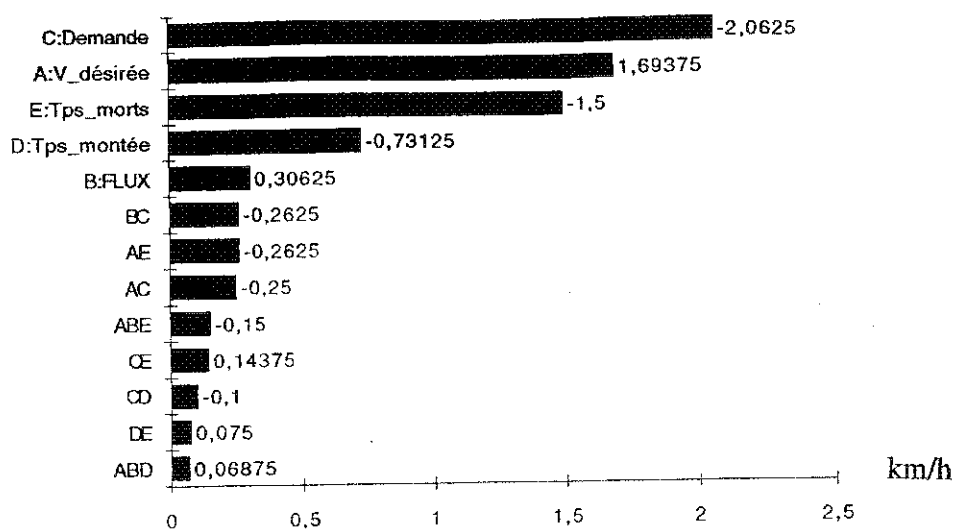


Figure 2

Nous rappelons que plus la valeur absolue du résultat est grande, plus grand est l'impact du facteur (ou de la combinaison des facteurs) sur la vitesse commerciale. Un signe positif indique que lorsque le facteur concerné passe du niveau bas au niveau haut, il y a alors augmentation de la vitesse commerciale. Par contre un signe négatif indique que lorsque le facteur passe du niveau bas au niveau haut, il y a diminution de la vitesse commerciale.

Les résultats montrent que tous les facteurs simples ont statistiquement une influence sur la VECO. L'analyse statistique montre que les interactions de 1er ordre (entre 2 facteurs) BC, AE, AC, CE, CD, DE, ont des effets significatifs. Les interactions de 2ème ordre ABE et ABD sont significatives. Toutes les interactions dont l'effet est inférieur ou égal à 0,068 ne sont pas significatives statistiquement à un niveau de signification de 99%.

Dans ce plan d'expériences on note une plus grande influence du facteur "Demande" sur la vitesse commerciale et l'influence du facteur "Vitesse désirée" vient seulement en deuxième position. Les effets de ces deux facteurs sont nettement plus importants en valeur absolue que tous les autres effets pour ce plan d'expérience. Les effets des facteurs "Temps mort" et "Temps de montée" ont une valeur respectivement décroissante sur la VECO, et le facteur "Flux" vient en dernière position avec une faible influence sur la VECO. L'exploitation actuelle est représentée par les facteurs A,B,C au niveau -1 et les facteurs D et E au niveau +1.

Le facteur "Vitesse" a un effet positif égal à 1,69 km/h en moyenne sur la vitesse commerciale. Cette influence positive est évidente, la valeur de la vitesse commerciale pourrait passer ainsi de 15,3 km/h en moyenne actuellement à 16,99 km/h quand la vitesse de consigne passe du niveau bas au niveau haut.

Le facteur "Demande" a un effet supérieur en valeur absolue au facteur "Vitesse" mais négatif égal à - 2,06 km/h. Cette influence négative est évidente. Lorsque la demande passe du niveau bas au niveau haut en moyenne la VECO diminue de 2,06 km/h c'est à dire pourrait passer de 15,3 km/h vitesse commerciale actuelle à 13,22 km/h en moyenne.

Le facteur "Flux" a un effet positif égal à 0,30 km/h sur la vitesse commerciale. La valeur de la vitesse commerciale pour ce facteur pourrait passer ainsi de 15,3 km/h en moyenne actuellement à 15,60 km/h quand le "Flux " passe du niveau bas au niveau haut.

Le facteur "Tps_montée" a un effet négatif égal à - 0,73 km/h sur la vitesse commerciale, qui pourrait passer de 15,3 km/h actuellement à 14,57 km/h quand ce facteur passe du niveau bas au niveau haut.

Le facteur "Tps mort" a un effet négatif égal à - 1,5 km/h. Cette influence négative est évidente. Lorsque le temps mort passe du niveau bas au niveau haut, la VECO diminue de 15,3 km/h à 13,8 km/h.

Comment obtenir la meilleure VECO à partir de ce plan ?

La combinaison qui maximise la VECO est effectuée selon le tableau suivant, la vitesse obtenue avec ces niveaux de facteur est de 20,1 km/h en moyenne relevée dans l'histogramme des résultats du plan d'expérience :

Facteurs	A Vitesse	B Flux	C Demande	D Tps montée	E Tps mort
Niv. Max	+1	+1	-1	-1	-1
Niv.actuel	-1	-1	-1	+1	+1

La vitesse commerciale obtenue à partir des niveaux des différents facteurs simulés est de 15,3 km/h.

A partir de l'histogramme des résultats du plan d'expériences nous pouvons donner l'incidence de chaque facteur sur cette vitesse commerciale actuelle, ainsi:

- si tps mort E baisse de 50%, on augmente la VECO de : 1,50 km/h.
 - si tps montée D baisse de 13%, on augmente la VECO de: 0,73 km/h.
 - si on accroît le débit B de 33,3%, on augmente la VECO de: 0,30 km/h.
 - si on accroît la vitesse dés. de 34,6%, on augmente la VECO de: 1,69 km/h
- soit un total de: 4,22 km/h

qui est ajouté à la VECO actuelle de 15,3 km/h, ce qui donne une VECO maximum de 19,52 km/h.

Un calcul similaire pourrait être fait pour d'autres combinaisons dans les limites de chaque niveau de ce plan d'expériences.

7.2.4 Analyse de la capacité de la ligne sud exploitée avec des autobus en site propre

Sur le tronçon faisant l'objet de la simulation avec les autobus, lorsqu'on retient les 3 carrefours principaux sans prise en compte pour les autobus avec un cycle de 90 sec. et 60% de temps de vert par cycle, la VECO obtenue avec les caractéristiques actuelles (A, B et C au niveau -1) est de 16,1 km/h. Si le facteur A passe au niveau +1 (10,5 m/s), la VECO passe de 16,1 km/h à 17,5 km/h. Le nombre d'autobus (108/h/sens) dissuade les riverains de traverser la plateforme des autobus, les véhicules plus petits accélèrent plus rapidement, la VECO augmente.

Nous recherchons les limites de capacité du tronçon étudié exploité avec des autobus (véhicules de 11 mètres de longueur d'une capacité unitaire de 100 passagers) (cf § 7.1.4 Analyse de la capacité de la ligne sud avec le métro léger).

On a établi 3 courbes sur le graphe 6 "Vitesse commerciale en fonction du débit horaire des autobus" sur le tronçon :

- la 1^{ère} courbe (étoile) est obtenue en prenant une vitesse désirée de 10,5 m/s, un temps mort de 10,15 sec. et un temps de montée de 2 sec/pass. pour des autobus sans convoi avec 6 places dans chaque station. Le niveau de demande est de 8424 passagers qui montent. Cette 1^{ère} courbe décroît avec l'augmentation du flux d'autobus, de 100 à 210

autobus/h la vitesse commerciale décroît de 19,3 à 15,5 km/h. Le phénomène de queue apparaît au delà de 164 bus/h. Au delà de 192 bus/h on constate que le phénomène de queue s'est accentué (au droit de la station Ibn Sina 24 autobus attendent à cause de 2 feux en entrée et sortie de station), cette station est dans la simulation avec le métro léger un goulot d'étranglement pour de bonnes conditions d'exploitation. Il y a 4 autres stations avec 6 autobus en attente au moins une fois dans l'heure de simulation. Cette courbe représente la meilleure situation (temps mort minimum et temps de montée minimum) mais il n'y a pas d'organisation en convois : cette réduction doit être obtenue autrement c'est à dire au niveau de l'arrêt (niveau du quai, répartition des usagers en fonction de leur destination).

- la 2^{ème} courbe (croix) est obtenue en prenant une vitesse désirée de 10,5 m/s, un temps mort de 20,31 sec. et un temps de montée de 2,3 sec. ce qui représente les temps mort et de montée actuels. Elle décroît de la même façon que la précédente en fonction de l'augmentation du flux d'autobus /h de 100 à 192, de 17 km/h à 14,5 km/h. Le même phénomène de queue apparaît nettement : à 136 bus/h il y a une queue de 12 bus sur une station pendant l'heure, à 164 bus/h il y a une queue de 23 bus dans une station pendant l'heure, pour ces deux niveaux de flux les autres stations ont au moins une fois des queues entre 5 et 8 autobus pendant l'heure.

Le graphe 7 des performances où nous établissons la relation entre la vitesse commerciale et le rapport (Flux S/E) flux de sortie estimé divisé par flux d'entrée (connu) sur le tronçon, montre que pour un flux de 108 autobus la saturation n'est pas atteinte, la vitesse commerciale reste située entre 16 et 17 km/h cette variation est normale vu les interférences entre les véhicules. Par contre pour un flux de 192 autobus, le graphe montre que la vitesse commerciale chute de 17 à 11,41 km/h. Cette variation est due au phénomène de queue qui apparaît.

- la 3^{ème} courbe (carré) est obtenue en prenant une vitesse désirée de 10,5 m/s, un temps mort de 10,15 sec. et un temps de montée de 2 sec. avec une organisation en convoi complet de 6 autobus. Cette courbe montre une variation de la vitesse commerciale entre 16,1 km/h pour un flux de 108 véhicules, à 14,15 km/h pour un flux de 220 autobus. L'organisation en convois permet de réduire le temps d'arrêt en station (temps de montée et temps mort). Cette courbe montre que pour un même flux d'autobus, l'organisation en convoi donne une vitesse commerciale plus basse (perte de temps pour la formation de convois) : cette comparaison se fait entre la courbe 3 et la courbe 1 (même vitesse désirée, même temps d'arrêt). Lorsque le flux d'autobus augmente, la vitesse commerciale reste stable en un premier temps (de 110 à 160 autobus/h) au delà la vitesse commerciale commence à chuter moins rapidement qu'avec une exploitation sans convoi et la capacité passe à 220 bus/h sur ce tronçon. Pour un flux de 192 bus/h il apparaît une queue de 3 convois à Ibn Sina, tandis que dans les autres stations il y a au moins une queue de 1 convoi en attente dans une station dans l'heure.

La différence entre la courbe 3 et la courbe 2 réside au niveau du temps d'arrêt en station car il y a l'organisation de la formation de convois qui doit réduire le temps mort et le temps de montée. Si on compare ces deux courbes, on observe que l'intérêt de l'organisation en convois apparaît au delà d'un flux de 155 bus/h, nombre de bus en dessous duquel le temps perdu pour la formation du convoi est supérieur au temps d'arrêt en station (temps mort et temps de montée au niveau haut), pour la courbe 2 la vitesse commerciale est plus élevée que sur la courbe 3 jusqu'au flux de 155 autobus/h. L'utilité de la formation de convois pour ce couloir n'apparaît qu'au delà d'un flux supérieur à 155 autobus.

En conclusion, sur le tronçon de la ligne sud du métro léger de Tunis, la simulation d'une exploitation avec des autobus fait apparaître que pour un même niveau de demande, pour des caractéristiques d'implantation d'arrêts identiques mais pour un nombre différents de carrefours il est difficile de comparer ces deux systèmes qui diffèrent aussi sur les points suivants :

- vitesse de consigne supérieure pour l'autobus.
- prise en compte au feux pour le métro léger.

- caractéristiques des véhicules différentes.

Néanmoins les scénarios envisagés permettent d'extraire quelques indications comparatives entre les deux systèmes.

Le plan d'expériences effectué pour l'autobus montre que la VECO obtenue pour l'ensemble des scénarios reste inférieure à celle obtenue dans le plan d'expériences effectué pour le métro léger : ceci est dû en partie à la signalisation des carrefours et au nombre de carrefours. Pour le métro léger il y a 3 carrefours équipés de prise en compte (les autres carrefours étant protégés dans l'exploitation par métro léger). Pour l'autobus il y a 8 carrefours sans prise en compte et sans optimisation de leur gestion (onde verte). La vitesse commerciale des autobus peut être améliorée par la mise en place d'une onde verte et la suppression de carrefours en rabattant la circulation générale par des latérales au site propre vers les carrefours plus importants.

Une simulation de l'exploitation des autobus sur le site ayant 3 carrefours avec des cycles de feux de 90 sec. sans onde verte montre que la VECO augmente de 15,3 à 16,1 km/h, cette VECO était de 17,3 km/h avec le métro léger.

Si la vitesse de consigne passe de 7,8 m/s (Métro léger) à 10,5 m/s (vitesse des autobus à Porto Alegre), vitesse plus représentative pour des véhicules sur pneus, la VECO passe à 17,5 km/h. Ceci nous permet de dire que 108 autobus/h peuvent transporter le même niveau de demande avec la même VECO que les 15 rames de métro léger.

Avec une vitesse désirée de 10,5 m/s, sur le site du métro léger avec **trois carrefours**, la saturation apparaît à 200 bus soit 15 600 pas./h/sens avec une VECO de 15,1 km/h à comparer avec 30 rames soit 16 848 pas./h/sens avec une VECO de 15,5 km/h.

Ces 2 niveaux de capacité et VECO nous semblent comparable néanmoins le métro léger pourrait arriver à un niveau de flux plus important (40 rames) grâce à la prise en compte aux carrefours.

Le niveau de contraintes des 2 systèmes est très différent, nous comparons 40 rames à 200 autobus soit une rame chaque 90 sec. et un autobus chaque 18 sec.

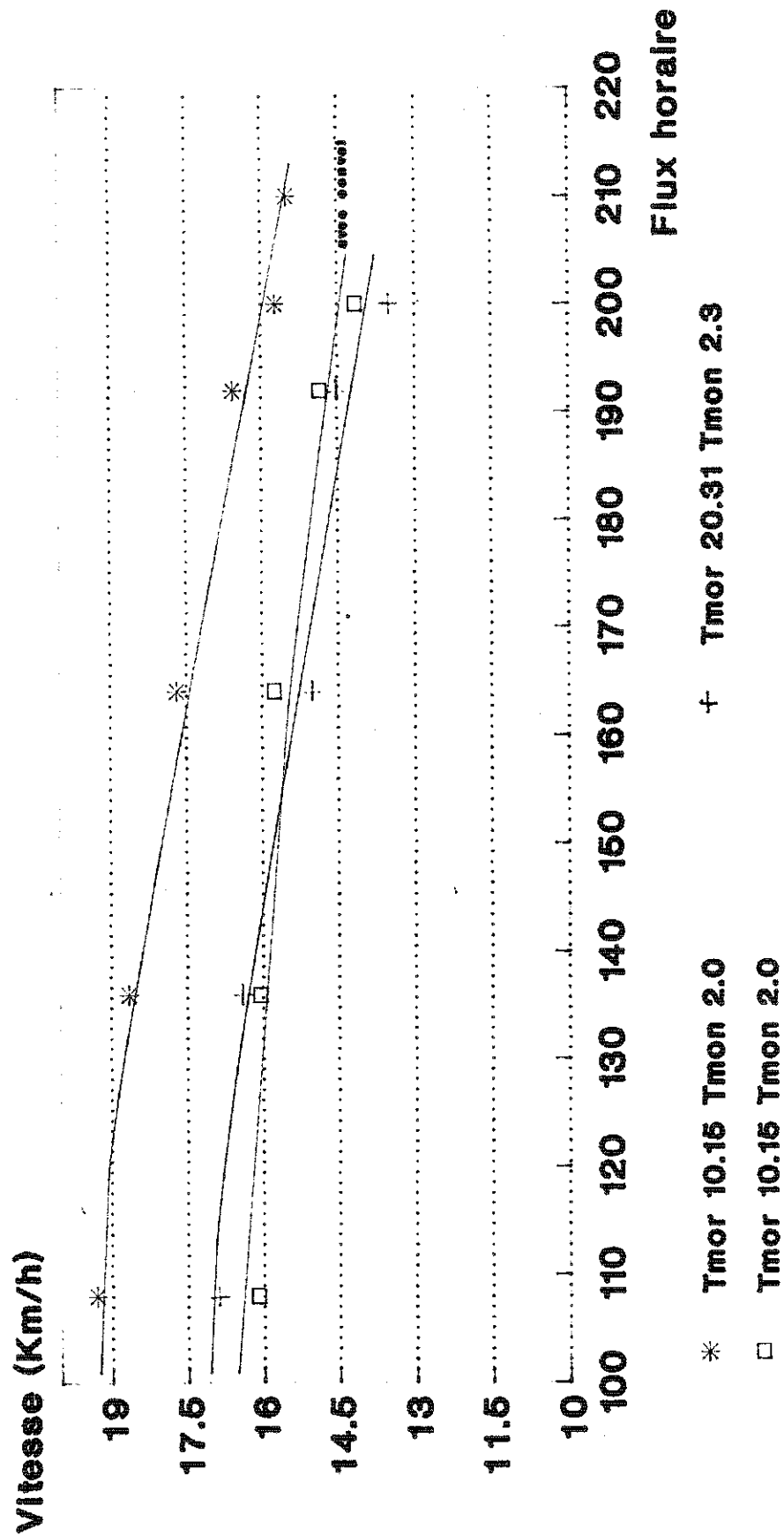
Pour le tronçon comportant **8 carrefours** au lieu de 3 le métro léger a une VECO de 15,8 km/h, avec un flux de 15 rames/h, la demande et les caractéristiques nécessaires au modèle ayant des valeurs actuelles. Par contre pour l'autobus avec une vitesse désirée de 7,8 m/s, la VECO est de 15,3 km/h.

En résumé, les vitesses commerciales selon le système au niveau de la saturation apparaissent dans le tableau suivant :

Carrefour	Métro léger	Autobus
8 feux	30 rames	192 bus
	VECO : 15,45 km/h Capacité : 16848 pas./h/sens	14,5 km/h 14976 pas./h/sens
3 feux	30 rames	200 bus
	VECO : 15,50 km/h Capacité : 16848 pas./h/sens	15,1 km/h 15600 pas./h/sens

VITESSE / FLUX

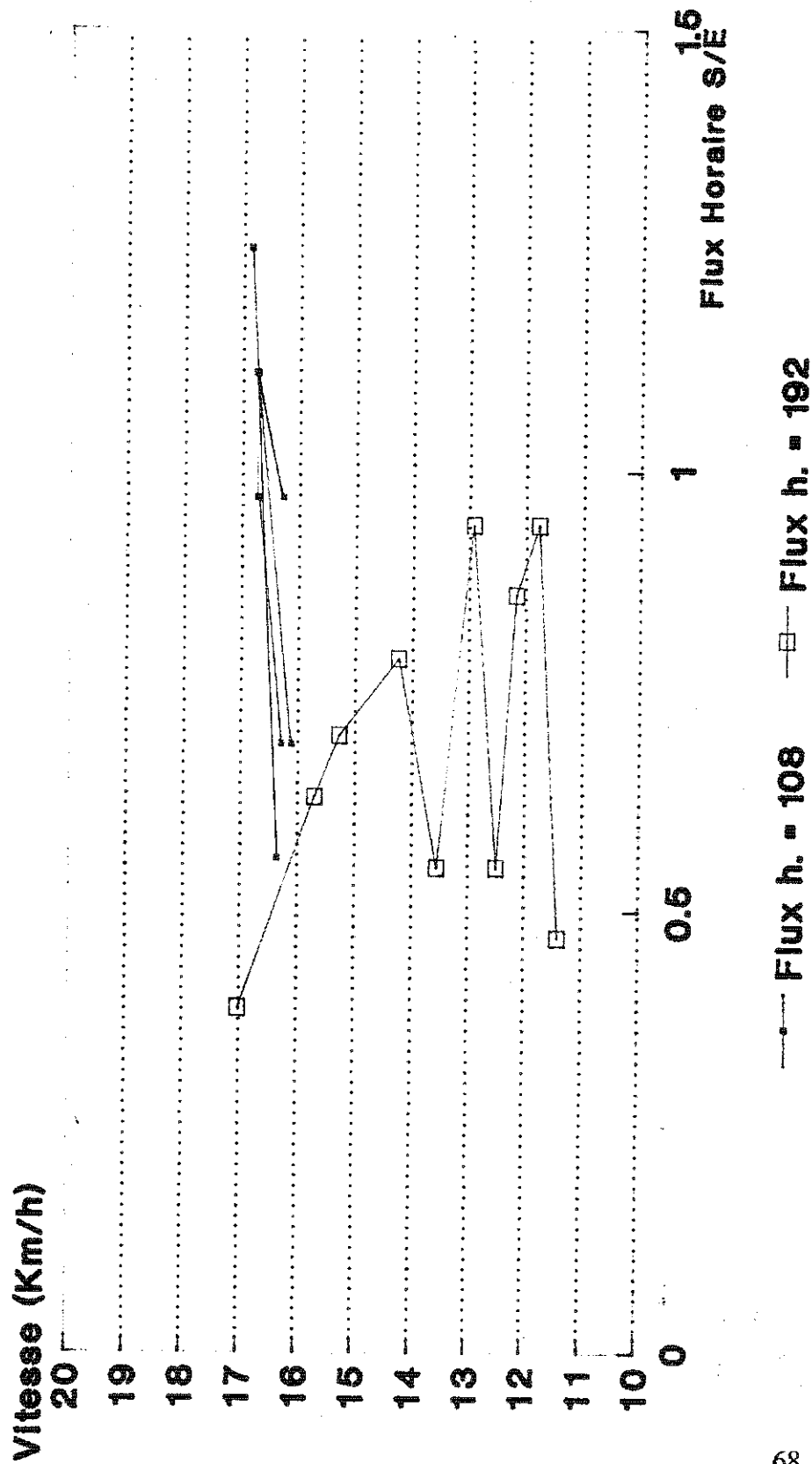
LIGNE SUD - BUS



Graphique 6

PERFORMANCE

LIGNE SUD - BUS



8. Etude des performances d'exploitation sur un couloir fictif

8.1 Recherche d'un couloir

Ce couloir sert de base pour effectuer des études comparatives (capacité, vitesse commerciale, coûts, etc) de métros légers et d'autobus circulant en site propre, respectivement sur des "tramways" et "busways". Il est nécessaire d'identifier les conditions géométriques existantes dans différentes villes.

Pour le système de bus, les données sont obtenues à partir de l'étude du TRL (Gardner & al., 1991) et à partir de l'expérience brésilienne, mais pour le système métro léger, il a été nécessaire de faire des enquêtes auprès des réseaux implantés/en implantation en PED (Tunis) et en Europe (Leipzig, Prague, etc.).

8.1.2 Définition

Le couloir "type" est un tronçon d'axe construit pour le métro léger ou pour l'autobus en site propre, qui doit avoir les caractéristiques géométriques et d'exploitation les plus proches de la réalité et où on peut obtenir les meilleurs résultats, en ce qui concerne l'efficacité du système.

8.1.3 Objectif

L'exploitation, soit de tramways, soit d'autobus qui roulent dans des conditions de trafic mixte, se détériore rapidement, étant donné qu'ils augmentent la congestion de la circulation générale. Aussi, de nombreux réseaux adoptent des mesures pour protéger les bus et les trams de l'embouteillage et pour améliorer la qualité du service auprès des voyageurs.

Cette étude se base sur la recherche de technologies de systèmes circulant en sites séparés, c'est-à-dire des sites propres pour autobus appelés "busways", et des sites propres pour tramways ou métro léger appelés ici "tramways".

Nous pensons qu'aucune technologie n'a pu être explorée à fond dans la pratique. En effet ces technologies Busway et Tramway devraient pouvoir transporter des quantités supérieures de voyageurs à celles qu'elles transportent aujourd'hui.

Il est difficile en pratique d'effectuer des essais en vraie grandeur, aussi est-il intéressant d'utiliser les techniques mathématiques de simulation à travers les modèles informatiques dûment calibrés et validés.

C'est cette technique qui est proposée pour la réalisation de cette étude.

Le principal objectif de ce projet est de comparer deux tronçons, un pour le métro léger et un autre pour l'autobus, qui aient les caractéristiques géométriques et d'exploitation semblables. Ils devront aussi, être implantés dans des villes ayant le même niveau de développement. Dans le modèle de simulation, on considère un tronçon commun à diverses lignes et non une ligne.

En appliquant la méthode des Plans d'expériences, on cherche à savoir quels sont les facteurs plus importants sur la vitesse commerciale (VECO), permettant de décrire le couloir type de façon à ce qu'il ait les meilleures caractéristiques d'exploitation, c'est à dire, qu'il soit le plus efficace, avec la vitesse commerciale maximum.

Tout d'abord, nous devons connaître quels sont les facteurs et leurs valeurs respectives les plus fréquentes.

8.1.4 - Le projet

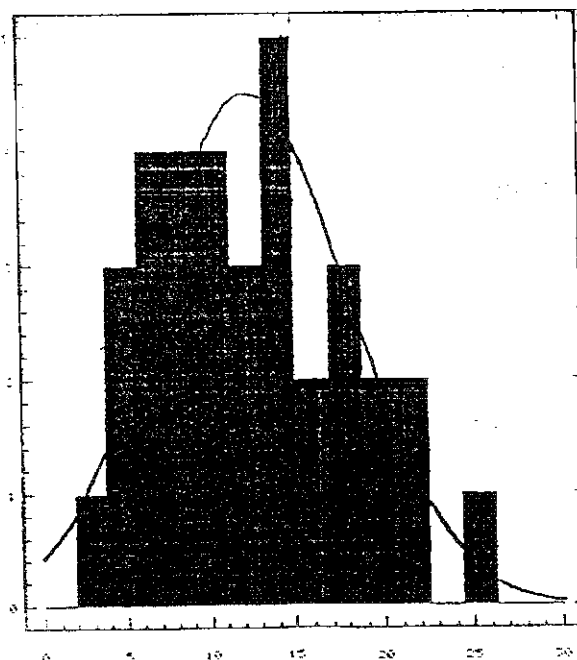
Tout d'abord nous étudions le problème relatif au métro léger. Pour ceci nous décidons quelles sont les valeurs des divers facteurs qui influencent l'exploitation d'un système de transport comme celui-ci, de façon à ne pas être très loin des valeurs possibles dans la réalité, dans le cas contraire cette étude n'aurait aucun sens.

Ce couloir doit faire la liaison d'un centre-ville à une banlieue, ensuite la simulation sera effectuée pendant une heure de pointe, dans le sens le plus chargé. Ce cas est le plus intéressant à étudier, parce qu'on connaît ainsi les possibilités du système dans les cas extrêmes.

Après une longue recherche de données concernant les caractéristiques géométriques et d'exploitation des lignes de ce système de transport exploité à travers le monde, nous avons réussi à trouver suffisamment de valeurs de paramètres pour effectuer l'étude envisagée.

A partir de toutes les longueurs de tronçons, pour lesquels nous avons eu des données, on constate, après avoir effectué une distribution normale (graphe § 5.4.1), que les valeurs les plus réalistes sont situées dans les intervalles : [6;11] km et [15;22] km. Bien qu'on ait trouvé des cas particuliers, comme par exemple : 2,97 km à Marseille et 39,79 km à Cologne.

Dans le graphe 8.1.4 ci-dessous, sont présentées les caractéristiques géométriques de quelques tronçons pour lesquels nous avons le plus de valeurs, non seulement la longueur totale du tronçon, mais aussi les distances entre stations (moyenne, max et min), les distances entre carrefours réglés par feux, le nombre respectif de stations et de feux.



Graph 8.1.4

CARACTÉRISTIQUES DE LA GÉOMÉTRIE DE LA VOIE

VILLE	LIGNE	LONGUEUR(Km)	DIST. STATION (m)			DIST. FEUX (m)			Nb STATIONS	Nb FEUX
			Moy	Min	Max	Moy	Min	Max		
Grenoble	1	8.651	432.55	223	688	261	66	627	21	33
Nantes	1	10.6	497	258	873	543.2	237	2025	22	16
Nantes	2	5.35	421	238	608	267	88	1089	13	19
St Etienne	—	7.055	294	110	450	211.4	52	461.6	25	28
Boulogny	—	9.058	452.9	247	800	213	29	793	21	45
Lille	Roubaix	11.038	501.7	229	763	220	—	—	23	50
Lille	Tourcoing	11.623	528.3	154	947	264	—	—	22	44
Budapest	1	14.27	541	250	1120	—	—	—	25	—
Budapest	2	8.14	493	330	730	—	—	—	16	—
Budapest	3	17.74	518	230	1070	—	—	—	26	—
Budapest	7	18.7	486	250	820	—	—	—	38	—
Marseille	68	2.97	297	135	825	279	100	555	11	7
Tunis	Sud	9.5	790	460	1250	715	217	1213	12	3
Cologne	18	39.79	948	—	—	—	—	—	43	—
Cologne	4	21.1	728	—	—	—	—	—	30	—
Bâle	16	5.5	320	—	—	—	—	—	18	—
Bâle	14	13.4	430	—	—	—	—	—	32	—
Dusseldorf	—	15.1	750	350	1000	—	—	—	14	—
Stuttgart	—	17.25	556	289	1024	507	—	—	31	34

tableau 8.1.4

Après avoir rassemblé ces données, nous décidons de faire l'étude sur un tronçon de 7 km de long qui est plus concentré dans le centre urbain. Nous devons effectuer ultérieurement l'étude d'un tronçon de 20 km faisant la liaison du centre-ville à une zone de banlieue plus éloignée. Nous construirons différents plans d'expériences pour chacun des tronçons et ensuite ferons la comparaison. (le modèle Busway peut effectuer la simulation d'un tronçon de 20 km s'il n'utilise pas l'interface graphique.

8.1.5 Description des facteurs

Dans l'expérimentation pour la mise en oeuvre (simulation) du couloir type, nous avons les facteurs nécessaires suivants pour caractériser un tronçon de métro léger, à partir desquels nous cherchons les effets respectifs sur la VECO. Ces facteurs sont les suivants:

Facteur 1 - Vitesse moyenne désirée ("Vde");

Facteur 2 - Le temps mort dans les stations ("Tmor");

Facteur 3 - Le temps moyen de montée par voyageur ("Tmont");

Facteur 4 - La demande maximum de passagers par heure ("Dem");

Facteur 5 - Le flux de véhicules à l'heure ("Flux");

Facteur 6 - Distance moyenne entre stations ("Dst")

Facteur 7 - Distance moyenne entre feux ("Dfeu");

Facteur 8 - La longueur du véhicule ("Lgv").

La variable Réponse est la Vitesse Commerciale (VECO).

Facteur 1 - Pour la définition des niveaux de la vitesse désirée, on s'est basé seulement sur les données de la ligne sud du réseau de Tunis et d'une ligne du réseau de Grenoble. Ainsi, sur ces deux lignes les valeurs de ce facteur varient entre 10m/s et 13m/s. On définit, de cette façon 5 niveaux uniformément distribués dans l'intervalle [7;16] (m/s), puisque bien que la moyenne des valeurs connues soit plus basse, on trouve parfois des valeurs dans les extrêmes de cet intervalle (tableau 8.1.5.a).

Ville	Relevé	Vitesse désirée (m/s)
Grenoble	1	10,5
Grenoble	2	10,11
Tunis	1	13,42
Tunis	2	11,43
Tunis	3	10,67
Tunis	4	11,66
Tunis	5	12
Tunis	6	12,93

tableau 8.1.5.a

Facteur 2 - Le temps mort varient entre [4;30] secondes, il dépend du comportement des passagers. Ces valeurs ont été obtenues à partir d'autres études déjà effectuées et aussi, à partir de nos connaissances de la ligne sud du métro de Tunis.

Facteur 3 - Pour les temps moyens de montée, on s'est basé sur la connaissance des temps réalisés sur la ligne sud de Tunis et à partir de données d'autres études déjà effectuées (HCM du TRB et TRL).

Les cas différents suivants ont été défini :

- Paiement avant l'entrée dans le véhicule => 1,5 à 2,5 s
- Composter le ticket dans le composteur => 2 à 3 s
- Paiement dans le véhicule => 3 à 4 s

Ainsi, nous définissons 5 niveaux uniformément distribués dans l'intervalle [1,5;4].

Dans le modèle de simulation les valeurs utilisées pour ce facteur sont celles qui se réalisent au niveau de la porte la plus chargée, puisque c'est celle-ci qui définit le temps d'arrêt du véhicule dans la station.

Facteur 4 - Pour le facteur "Demande", nous définissons les deux niveaux extrêmes entre 7500 et 20000 personnes par heure, par sens. Le premier, c'est le niveau le plus souvent obtenu dans la réalité dans un couloir avec ces caractéristiques et le niveau plus haut correspond aux valeurs théoriques trouvées dans la bibliographie, où cette valeur est donnée comme la capacité théorique possible d'un tronçon. Dans la réalité, le TRL a trouvé une valeur maximum égale à 16500 voyageurs à l'heure (Leipzig). On a défini 5 niveaux comme pour les autres facteurs. Dans le tableau 8.1.5.b, on peut observer quelques chiffres sur le nombre de montées et descentes pour les différentes heures de pointe, le matin et le soir, et dans différentes villes. En ce qui concerne les valeurs réelles, nous n'avons que les valeurs obtenues par enquête dans les réseaux de Tunis et Lille.

Facteur 5 - Le flux de véhicules à l'heure est de 10 dans les lignes de faible affluence ainsi qu'aux heures creuses, mais ce nombre peut arriver à 60, aux heures de pointe, donc dans ce cas les véhicules sont injectés avec 1 minute d'intervalle. Ce facteur est aussi défini en 5 niveaux distribués dans cet intervalle.

NOMBRE DE VOYAGEURS QUI MONTENT ET DESCENDENT							
VILLE	STATIONS	MOUVEMENT	HEURE DE POINTE	VOYAGEURS/H		TRAMS/HEURE	
			Matin/Soir	Montees	Descentes		
Tunis Sud	Ouerdia	Montee	Matin	1188	17	15	
	Kabaria	Montee	Matin	2250	126	15	
	Barcelone	Descente	Matin	387	4776	15	
Lille				1337	1383	16	
	Gare	Descente	Matin				
	Gare	Montee	Soir	1515	1208	19	
	Roubaix Place	Montee	Matin	515	188	8	
	Roubaix Place	Montee	Soir	746	722	9	
	Tourcoing	Montee	Matin	390	243	8	
Budapeste	Arpad Hid	Descente	Matin	850	2583	21	
	Marx ter	Montee	Soir	1026	591	29	
	Blaha L. ter	Montee	Soir	1168	931	31	
Prague	Branik	Montee	Matin	510	0	24	

tableau 8.1.5.b

Facteur 6 - Les distances entre stations varient dans la plupart des cas dans l'intervalle [200; 1250] mètres, bien qu'il y ait toujours des cas extrêmes. Aussi nous définissons ce facteur à 5 niveaux, où le niveau le plus bas est égal à 400m et le niveau le plus haut à 1000m et les 3 autres niveaux sont distribués dans l'intervalle [400;1000] d'une façon uniforme. Le choix de ces niveaux s'effectue à partir des cas identifiés les plus nombreux. Pour chaque niveau de ce facteur on a défini le nombre total de stations dans chaque tronçon (tableau 8.1.5.c).

STATIONS		FEUX	
Distance(m)	Nombre	Distance(m)	Nombre
400	8	200	8
550	9	400	10
700	11	600	12
850	13	800	18
1000	18	1000	35

tableau 8.1.5.c

Facteur 7 - Les distances entre carrefours régulés par feux varient de 70 m à 2 km. Sur les réseaux identifiés précédemment, la distance moyenne entre feux est située dans l'intervalle [200;1000] mètres. Pour ce facteur, on a défini 5 niveaux uniformément distribués dans l'intervalle cité. Pour chacun des niveaux il faut trouver le nombre de feux qui seront placés sur chacun des tronçons (Tableau 8.1.5.c).

Dans ce cas, le métro léger a la priorité aux feux ou au moins sur une grande partie d'entr'eux. Il y a deux situations importantes en ce qui concerne la position du feu par rapport à une station, où l'influence du feu se fait remarquer.

-- Si le feu est placé avant la station, le vert est donné au véhicule, seulement s'il n'y a aucun véhicule arrêté dans la station.

-- Si le feu est placé après la station, la prise en compte du véhicule est donnée dans la station. Le feu reste rouge pendant les premières 15 secondes après l'entrée du véhicule dans la station, ensuite le vert est donné pour le passage du véhicule.

Le feu reste toujours 30 secondes rouge au minimum, entre deux verts.

Donc, la distribution de l'implantation des feux par rapport aux stations peut influencer la VECO. Il serait intéressant d'introduire un facteur en relation avec le type de priorité dans le plan, mais actuellement nous n'avons pas de données nous informant dans ce domaine.

Facteur 8 - La longueur du véhicule la plus répandue est de 30 mètres (elle varie de 1 à 2 mètres), mais aux heures de pointe l'exploitation du système s'effectue souvent avec des rames doubles, on a donc des rames de 60 mètres, certains réseaux sont exploités avec des véhicules de longueur située entre 15 et 30 mètres, mais ces valeurs sont assez rares pour être considérées. Ce facteur a été défini à 2 niveaux : 30 et 60 mètres.

Nous présentons ci-dessous le tableau 8.1.5.d des 5 niveaux correspondants pour les facteurs 1 à 7.

FACTEURS							
Niveaux	V désirée	Tps morts	Tps montée	Demande	Flux	Dist station	Dist feux
	(m/s)	(s)	(s)	unités	veh	(m)	(m)
-2	2	4	15	7500	10	400	200
-1	8.75	10.5	21.3	10625	22	850	400
0	11.5	17	27.6	13750	35	700	600
1	13.75	22.5	33.8	16875	47	850	800
2	15	30	44	20000	60	1000	1000

tableau 8.1.5.d

Remarque :

Le modèle de simulation exige une distance entre l'origine où est inscrit le véhicule et la première station ou le premier feu, ceci dépend par lequel des deux commence le tronçon, et exige aussi que le tronçon soit terminé par un feu.

S'il y a un problème dans la simulation, c'est à dire, s'il n'était pas possible d'exécuter le modèle en raison de l'excès de flux et une petite distance entre l'origine et la première station, on réduit le nombre de voyageurs qui monte dans la première station et on l'augmente dans la deuxième station, ainsi le véhicule s'arrête dans la première station pendant un temps d'arrêt inférieur.

8.1.6 - Définition du Plan d'expériences utilisé

Le Plan d'expériences utilisé dans cette étude pour rechercher les facteurs qui influencent la VECO, se réfère au plan " Second Order Composite Designs" qui présente un cube fortement fractionné (Simoes L.,1993).

Ces projets constituent le croisement d'un "cube" (les traitements avec les niveaux (-1,+1,-1,,+1,-1)) avec une étoile (les traitements avec les niveaux (0, 0, -2, +2,0,)) et encore quelques points centrés (0, 0, , 0). En général, ces plans sont utilisés quand on veut étudier tous les termes linéaires et quadratiques (entre les termes quadratiques on inclue les interactions de deux facteurs) . Pour évaluer toutes les interactions de deux facteurs le "cube" est présenté complet ou faiblement fractionné. Dans cette étude le cube est présenté fortement fractionné.

La régression multiple et l'analyse de la variance associées sont les méthodes de base pour l'analyse, puisque la régression multiple est pratique à l'utilisation et flexible, c'est à dire, on peut additionner de nouvelles données et l'analyse peut être complétée sans aucun problème. L'analyse de la variance est pratique pour indiquer quelle est l'importance relative de chaque facteur sur la VECO.

Désavantage : les interactions ne peuvent pas être toutes évaluées.

Avantage : le nombre d'essais exigé est considérablement plus petit.

8.2 Etude du cas du métro léger

8.2.1 Un plan d'expériences pour l'exploitation du métro léger

Nous nous intéressons ici à l'étude d'un tronçon de 7 km de longueur.

La matrice d'expériences utilisée pour cette étude est dans le tableau T 8.2.1 a ci-après.

MATRICE DE L'EXPERIMENTATION							
Traitement	V désirée	Tps_morts	Tps_montée	Demande	Flux	Dist_station	Dist_feux
	(m/s)	(s)	(s)	unites	veh	(m)	(m)
1	11.5	17	2.75	13750	35	700	600
2	9.25	10.5	2.13	10625	22	550	400
3	13.75	10.5	2.13	10625	47	550	800
4	9.25	23.5	2.13	10625	47	850	400
5	13.75	23.5	2.13	10625	22	850	800
6	9.25	10.5	3.38	10625	47	850	800
7	13.75	10.5	3.38	10625	22	850	400
8	9.25	23.5	3.38	10625	22	550	800
9	13.75	23.5	3.38	10625	47	550	400
10	9.25	10.5	2.13	16875	22	850	800
11	13.75	10.5	2.13	16875	47	850	400
12	9.25	23.5	2.13	16875	47	550	800
13	13.75	23.5	2.13	16875	22	550	400
14	9.25	10.5	3.38	16875	47	550	400
15	13.75	10.5	3.38	16875	22	550	800
16	9.25	23.5	3.38	16875	22	850	400
17	13.75	23.5	3.38	16875	47	850	800
18	16	17	2.75	13750	35	700	600
19	7	17	2.75	13750	35	700	600
20	11.5	30	2.75	13750	35	700	600
21	11.5	4	2.75	13750	35	700	600
22	11.5	17	4	13750	35	700	600
23	11.5	17	1.5	13750	35	700	600
24	11.5	17	2.75	20000	35	700	600
25	11.5	17	2.75	7500	35	700	600
26	11.5	17	2.75	13750	60	700	600
27	11.5	17	2.75	13750	10	700	600
28	11.5	17	2.75	13750	35	1000	600
29	11.5	17	2.75	13750	35	400	600
30	11.5	17	2.75	13750	35	700	1000
31	11.5	17	2.75	13750	35	700	200
32	11.5	17	2.75	13750	35	700	600

Tableau T 8.2.1 a

Dans cette matrice tous les niveaux extrêmes ne se croisent pas, seuls les 3 niveaux du milieu se croisent; il est impossible de faire un plan factoriel complet, étant donné qu'il y a des traitements impossible à réaliser à cause des contraintes existantes dans l'exploitation d'un métro léger. Ainsi, cette matrice rassemble les cas les plus importants et tous les traitements peuvent être simulés.

Cette matrice a été construite pour tous les facteurs, sauf la "Long_véhicule", qui a 2 niveaux. Donc la matrice complète doit avoir une autre colonne, où les 32 premiers traitements correspondent au niveau "-1" et les 32 derniers au niveau "+1".

Pour ce plan nous devons définir 9 couloirs différents, tous de la même longueur, mais avec un nombre différent de stations et de feux, avec des distances entre stations et des distances entre feux différentes. Les coordonnées respectives d'emplacement des feux et des stations, sont choisies aléatoirement pour chaque couloir, mais en n'oubliant pas que dans le centre les stations et les feux sont plus proches que dans la banlieue : ces données sont rassemblées dans le tableau T 8.2.1 b ci-après.

LES EMPLACEMENTS DES STATIONS ET FEUX DANS LES DIFFERENTS COULOIRS A SIMULER									
COULOIR 1	COULOIR 2	COULOIR 3	COULOIR 4	COULOIR 5	COULOIR 6	COULOIR 7	COULOIR 8	COULOIR 9	
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	
345 St	203 St	278 St	375 Fx	500 St	480 St	267 St	345 St	152 Fx	4021 St
719 Fx	375 Fx	444 St	500 St	594 Fx	719 Fx	519 St	784 St	253 Fx	4045 Fx
799 St	454 St	594 Fx	562 Fx	944 Fx	966 St	719 Fx	1030 Fx	338 Fx	4442 Fx
986 Fx	562 Fx	716 St	980 Fx	1038 St	986 Fx	801 St	1237 St	400 St	4735 Fx
1237 St	716 St	934 Fx	1038 St	1381 Fx	1365 Fx	986 Fx	1359 Fx	422 Fx	5267 St
1365 Fx	960 Fx	1037 St	1278 Fx	1528 St	1507 St	1067 St	1792 St	502 Fx	5439 Fx
1792 St	1037 St	1341 Fx	1528 St	2189 St	1852 Fx	1292 St	2312 St	630 Fx	6726 Fx
1852 Fx	1278 Fx	1418 St	1561 Fx	2342 Fx	2798 St	1365 Fx	2822 Fx	702 Fx	6000 Fx
2322 St	1408 St	1781 St	2086 Fx	2965 St	2823 Fx	1558 St	3426 St	784 St	6076 St
2823 Fx	1561 Fx	2342 Fx	2189 St	2989 Fx	3306 Fx	1829 St	3605 Fx	843 Fx	6304 Fx
3306 Fx	1781 St	2607 St	2440 Fx	3614 Fx	3922 Fx	1852 Fx	4021 St	917 Fx	6595 Fx
3426 St	2086 Fx	2959 Fx	2877 Fx	3696 St	4372 Fx	2197 St	4412 Fx	1019 Fx	6809 Fx
3922 Fx	2440 Fx	3457 St	2965 St	4930 Fx	4623 St	2519 St	6267 St	1166 Fx	6595 Fx
4021 St	2607 St	3634 Fx	3209 Fx	5224 St	5356 Fx	2745 Fx	6056 St	1237 St	6809 Fx
4372 Fx	2877 Fx	3949 St	3534 Fx	6388 Fx	5587 St	2835 St	6199 Fx	1355 Fx	6886 St
5267 St	3209 Fx	4484 St	3686 St	6820 St	6467 Fx	3306 Fx	6809 St	1557 Fx	7000 Fx
5356 Fx	3457 St	4930 Fx	3889 Fx	7000 Fx	6829 St	3611 St	7000 Fx	1712 Fx	
6056 St	3534 Fx	5336 St	4258 Fx		7000 Fx	3922 Fx		1792 St	
6467 Fx	3879 Fx	5338 Fx	4958 Fx			4049 St		1858 Fx	
6809 St	3959 St	5323 St	5224 St			4372 Fx		2079 Fx	
7000 Fx	4258 Fx	7000 Fx	5334 Fx			4546 St		2312 St	
	4484 St		5754 Fx			4980 St		2348 Fx	
	4958 Fx		6679 Fx			5356 Fx		2549 Fx	
	5334 Fx		6820 St			5896 St		2730 Fx	
	5575 St		7000 Fx			6376 St		3006 Fx	
	5754 Fx					6467 Fx		3272 Fx	
	6679 Fx					6860 St		3426 St	
	6823 St					7000 Fx		3553 Fx	
	7000 Fx							3734 Fx	

Tableau T 8.2.1 b

Comme pour le projet réalisé sur le réseau de Tunis, il est nécessaire d'utiliser pour le modèle de simulation une distribution du nombre de montées dans chaque véhicule par porte. Cette distribution est basée sur la distribution de la ligne 2 (Nord) du réseau du métro de Tunis (tableau T 8.2.1c ci-après), car elle a la caractéristique d'être la plus chargée au centre-ville; d'après les données obtenues et ce cas nous intéresse. Selon les différentes valeurs des différents facteurs : Nombre de stations, Flux, Demande et Longueur du véhicule, nous construisons les 20 tableaux qui sont au § 8.2.1 en annexe ("Fl"="Flux" et "De"="Demande").

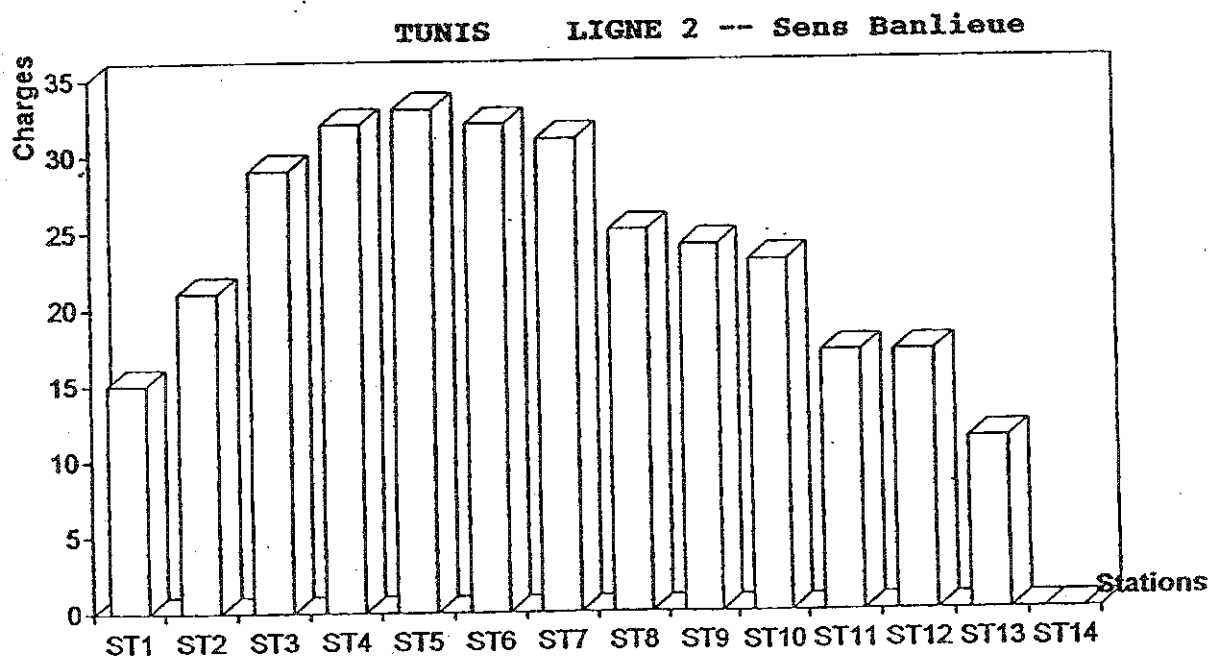


Tableau T 8.2.1 c

Après une analyse préliminaire des données, nous constatons que dans l'intervalle en étude, les facteurs "Vde" et "Lgv" ont un effet à peu près linéaire, par contre les facteurs "Tmor", "Flux", "Tmont", "Dst", "Dfeu" et "Dem" ont un effet à peu près carré. Les interactions, d'une façon générale, ont des effets faibles. Cette analyse préliminaire a été effectuée en utilisant la méthode par Régression Multiple. Pour savoir quelle est la relation entre chaque facteur et la VECO, c'est à dire, si chaque facteur a un effet linéaire ou carré, nous nous basons sur les termes qui sont significatifs.

Les résultats de la simulation pour chaque traitement sont au tableau T. 8.1.2 d ci-après, nous avons effectué 3 répétitions de chacune des simulations.

Trait	VITESSE COMMERCIALE (m/s)							
	Véhicule= 60m				Véhicule= 30m			
	Rep 1	Rep 2	Rep 3	R1+R2+R3	Rep 1	Rep 2	Rep 3	R1+R2+R3
1	22.9	23.2	22.8	68.9	21.5	21.4	21.5	64.4
2	21.2	20.6	20.7	62.5	18.9	19.7	19.1	57.7
3	27.2	26.8	27.6	81.6	26	25.9	25.8	77.7
4	21.9	20.8	21.6	64.3	20.8	20.6	21	62.4
5	25.8	25.5	26.1	77.4	23.1	23.3	24	70.4
6	23.1	23.5	22.5	69.1	20	20.9	20.7	61.6
7	26.8	26.9	26.7	80.4	21.8	22.6	23.4	67.8
8	18.3	18	17.7	54	16	14.5	16.3	46.8
9	22	22	22	66	18.4	20	19.6	58
10	24.2	22.5	23.4	70.1	23.4	24.3	22.9	70.6
11	29.1	29.6	29.6	88.3	27.6	27.6	28.1	83.3
12	19.5	18.2	19	56.7	18.7	18.7	17.7	55.1
13	21.5	21.5	21.5	64.5	19	19.9	20.1	59
14	18.7	18.2	18.3	55.2	19.3	19.7	19.2	58.2
15	24.1	23.9	24.6	72.6	20.5	21	20.2	61.7
16	19.7	19.7	19.4	58.8	15.3	18.1	17.1	50.5
17	24.4	26	24.7	75.1	18.7	20.9	20.7	60.3
18	27.1	27	26.7	80.8	24.1	24.5	24.3	72.9
19	18.2	17.1	17	52.3	16.7	16.5	15.7	48.9
20	20.8	20.4	20.8	62	18.6	19.1	19.5	57.2
21	27.2	26.4	26	79.6	24.3	24.4	22.6	71.3
22	22.5	22	22.1	66.6	18	19.2	18.5	55.7
23	24.1	23.3	22.8	70.2	23.1	22.7	22	67.8
24	23.3	22.9	22.5	68.7	21.3	21.1	21.1	63.5
25	23.6	23	23.1	69.7	22.2	21.3	22.1	65.6
26	21.8	22.5	21.4	65.7	18.9	18	18.3	55.2
27	19.7	20.1	20	59.8	15.4	16.4	16.6	48.4
28	25.5	24	25.1	74.6	23.4	23	23.2	69.6
29	17.9	17.6	17.7	53.2	16.9	16.7	16.6	50.2
30	24.1	23.7	23.5	71.3	22.2	22	21.6	65.8
31	21.6	21.2	21	63.8	20.5	20.2	19.9	60.6
32	22.9	23.2	22.8	68.9	21.5	21.4	21.5	64.4

Tableau T 8.2.1 d

8.2.2 - Obtention des résultats

Après application de la méthode par régression linéaire multiple, le modèle obtenu est le suivant :

Facteur	Coefficient
Constante	21,44
Vitesse désirée	2,05
Temps mort	- 1,41
Temps mort ²	0,338
Distance	- 1,42
Distance ²	- 0,131
Longueur véhicule	0,99
Temps de montée	- 0,951
Temps de montée ²	0,133
Flux	0,51
Flux ²	- 0,517
Long veh.*Tps mont.	0,376
Distance entre feux	0,342
Distance entre feux ²	0,158
Demande	- 0,166
Demande ²	0,283
Long. véh. * Vit. dés.	0,339
Vit. dési. * Tps mort	- 0,274
Tps mort * Tps mont.	0,259
Flux * Tps de montée	- 0,218
Long. véh. * Distance	0,151

$$R^2 = 0,9348$$

Les termes qui n'apparaissent pas dans le tableau, comme par exemple "Vde²" ou "Vde * Tmor" ont un effet non significatif et peuvent être alors considérés comme nuls.

A partir du "coefficient" de chaque facteur, on peut voir si l'effet du facteur respectif sur la VECO est positif ou négatif et aussi mesurer l'importance des facteurs sur la variable réponse.

Ce modèle peut être utilisé pour prévoir la VECO pour n'importe quelle combinaison de traitements. Il faut introduire les valeurs des niveaux correspondantes à la valeur de chaque facteur "Vde", ..., "Lgv" dans l'équation correspondante au modèle obtenu et on obtient la valeur estimée de la VECO.

L'importance de chaque facteur peut être observée dans la figure suivante :

Facteur (effet linéaire + quadratique)	"Effet"
Vde	24,6
Tmor	17,5
Dst	17,2
Lgv	13,7
Tmont	11,6
Flux	9,6
Lgv * Tmont	4,5
Dfeu	4,5
Dem	4,2
Lgv * Vde	4,1
Vde * Tmor	2,7
Tmor * Tmont	2,6
Flux * Dfeu	2,1
Lgv * Dst	1,8

La valeur "Effet" calculée est égale à la racine carré de la variance, cette valeur est proportionnelle à l'effet du terme correspondant. Ainsi la figure ci-dessus nous donne une très bonne idée de l'importance des facteurs sur la VECO.

Cet "Effet" ne correspond pas à celui obtenu quand on applique la technique des plans d'expérience pour l'analyse des résultats, puisque cet "Effet" ne nous dit pas si les facteurs ont une influence négative ou positive sur la VECO, et il ne mesure pas, pour chacun des facteurs, la variation de la VECO quand on passe du niveau bas au niveau haut ou vice-versa. Donc cette valeur nous aide simplement à connaître la relation entre les différents effets de chaque facteur sur la VECO.

Comme on s'y attendait les facteurs "Vde", "Tmor", "Tmont", "Flux", "Dst" et "Lgv" ont un effet important sur la VECO, tous les termes restants qui sont dans la figure ci-dessus ont un effet modéré sur la VECO et les termes qui n'apparaissent pas ont un effet moindre sur la VECO.

Il est aussi intéressant de vérifier quelles sont les valeurs des facteurs qui maximisent la VECO, en utilisant des procédures d'optimisation standards.

Ils nous apparaissent comme étant les suivants :

"Vde"	= maximum	(16 m/s)
"Tmor"	= minimum	(4 s)
"Tmont"	= minimum	(1,5 s/voy)
"Dem"	= minimum	(7500 voy/h/sens)
"Flux"	= 0,087	(36 veh/h)
"Dst"	= maximum	(1000 m)
"Dfeu"	= maximum	(1000 m)
"Lgv"	= maximum	(60 m)

Donc, si dans le couloir de 7 Km de longueur à chaque facteur sont attribuées les valeurs obtenues ci-dessus, on aurait un tronçon de métro léger où la vitesse commerciale est maximum. En utilisant les niveaux correspondants de chaque facteur aux valeurs optimales, trouvées ci-dessus, dans le modèle obtenu précédemment, on trouve la valeur maximale pour la VECO égale à 41,47 km/h.

8.2.3 - Analyse des résultats

Nous ne sommes pas surpris des résultats obtenus car nous connaissons l'importance de "Vde" et de "Dst". Par contre, l'effet du temps mort se trouve au même niveau que l'effet de la distance entre stations, ce fait appelle notre attention!

Nous pourrions discuter des niveaux choisis pour le facteur "Tmor", mais une récente étude du TRL sur le métro léger attribue à ce facteur, à partir d'une relation entre le nombre de passagers qui monte et le temps d'arrêt dans la station, des valeurs dans l'intervalle [8;25] secondes, tant pour les autobus que pour le métro léger. Donc, en considérant le grand décalage entre les niveaux de ce facteur on constate que son effet sur la VECO est tout à fait raisonnable.

Un autre fait qui appelle l'attention sur les résultats obtenus est le petit effet du facteur "Dfeu" sur la VECO, en effet dans cette étude on a considéré que les véhicules ont presque la priorité absolue, les feux n'influencent pas la performance du métro, puisque il n'y a pas de temps perdu aux feux.

Ainsi, on doit refaire le plan d'expériences en considérant un facteur défini par la priorité à 2 niveaux :

- Les feux ont une onde verte pour le métro et donc dans ce cas le métro pourra s'arrêter aux feux.

- Prise en compte au feu, où le vert serait anticipé en éliminant le rouge (ainsi le véhicule aurait un passage déterminé au feu) ou le vert serait prolongé.

Pour les autres facteurs, nous n'avons pas de remarques à faire, puisque les résultats sont semblables à ceux obtenus dans l'étude du métro de Tunis. Ils sont semblables à ceux qu'on attendait en nous basant sur ce qui se passe en réalité sur d'autres réseaux.

8.2.4 - Conclusion

Cette étude n'est pas encore complète car nous n'avons pas des données suffisantes pour que les résultats soient tout à fait fiables, surtout en ce qui concerne les temps d'arrêt dans les stations et aux feux. Nous n'avons pas le type de prise en compte le plus utilisé pour le contrôle des feux. Il faut donc faire continuer des enquêtes pour obtenir d'autres relevés.

En ce qui concerne la demande nous devons augmenter le nombre de données auprès d'autres réseaux qui ont des stations ayant une très grande affluence d'usagers.

Aussi, cette étude devrait être poursuivie en utilisant un nombre supérieur de données, pour que les résultats reflètent vraiment tous les genres de réseaux répandus dans le monde. Il faudra ajouter aussi au plan d'expériences effectué un autre facteur "qualitatif" qui distingue les types de priorité du métro léger aux feux.

Une étude semblable à celle-ci effectuée pour un tronçon de 7 km devra être réalisée pour un tronçon de 20 km. Puis les résultats obtenus dans les deux études devront être comparés.

8.3 Etude du cas de l'autobus en site propre

8.3.1- Les différentes phases

- a. Obtention des données sur place pour les systèmes d'autobus roulant en site séparé.

- b. Définition d'un couloir sur lequel se déroule la simulation.

Ce couloir servira de base pour effectuer des études comparatives (capacité, vitesse commerciale) de métros légers et d'autobus circulant en site séparé, respectivement sur des "tramways" et "busways".

Il est nécessaire d'identifier les conditions géométriques existantes dans différentes villes: pour le système d'autobus, les données sont obtenues à partir de l'étude du TRL (Gardner et Al; 1991) et à partir de l'expérience brésilienne.

Ce couloir est un tronçon construit pour l'autobus circulant en site séparé, qui doit avoir les caractéristiques géométriques et d'exploitation les plus proches de la réalité et où on peut obtenir les meilleurs résultats en ce qui concerne l'efficacité du système.

8.3.2 - Objectif

Comme pour la recherche d'un couloir permettant l'exploitation du métro léger (cf § 8.1.3) nous recherchons le couloir exploité par un système d'autobus en site propre.

En appliquant la méthode des Plans d'expériences, on cherche à savoir quels sont les facteurs les plus importants sur la vitesse commerciale, permettant de décrire un couloir d'autobus de façon à ce qu'il ait les meilleures caractéristiques d'exploitation, c'est à dire, qu'il soit le plus efficace, avec la vitesse commerciale maximum.

Tout d'abord, nous devons connaître quels sont les facteurs et les valeurs respectives qui leur sont attribuées.

La justification de l'utilisation de la technique des plans d'expériences et du modèle de simulation Busway se trouve dans le rapport (SIMOES, 1993).

8.3.3 - Le projet

Nous étudions ici le problème relatif au système autobus, une étude semblable a été effectuée pour le métro léger (cf § 8.1). Pour cette étude nous devons décider quelles sont les valeurs des divers facteurs qui influencent l'exploitation de ce système de transport, de façon à ce qu'on ne soit pas très loin des valeurs obtenues dans la réalité.

Ce couloir doit faire la liaison d'un centre-ville à une banlieue, ensuite la simulation sera effectuée pendant une heure de pointe, dans le sens le plus chargé. Ce cas est le plus intéressant à étudier car on connaîtra ainsi les possibilités du système dans les cas extrêmes.

Après une recherche de données de toutes les caractéristiques géométriques et d'exploitation de lignes, pour ce système de transport, déjà en exploitation dans le monde, nous avons réussi à trouver suffisamment de valeurs de paramètres pour la réalisation de l'étude envisagée.

Dans le tableau suivant sont présentées les caractéristiques géométriques de quelques tronçons, celles relevées par le T.R.L., où est présentée non seulement la longueur totale des tronçons, mais aussi les distances moyennes entre stations et distances moyennes entre carrefours régulés par feux.

Ville	Ligne	Longueur (km)	Dist. moy stations (m)	Dist moy feux (m)
Abidjan	Blvd de la République	1.27	400	160
Ankara	Besevhr-Dkimevi	3.6	310	410
Belo Horizonte	Av.Cristiano Machado	8.57	610	920
Curitiba	Eixo Sul	9.5	430	430
Istanbul	Taksim-Zincirlikuyu	2.27	310	410
Porto Alegre	Assis Brasil	4.5	580	410
Porto Alegre	Farrapos	2.8	560	390
Sao Paulo	Av.9 Julho/S.Amaro	7.9	600	530

Source Gardner & al.,1991.

8.3.4 - Description des facteurs

En utilisant l'expérimentation pour la mise en oeuvre (simulation) du couloir, nous avons les facteurs nécessaires suivants pour caractériser un tronçon d'autobus et à partir desquels on souhaite connaître les effets respectifs sur la VECO. Les facteurs concernés sont les suivants:

- Facteur 1 - Flux ("Flux").
- Facteur 2 - Temps mort ("Tmor").
- Facteur 3 - Temps montée par voyageur ("Tmon").
- Facteur 4 - Demande ("Dem").
- Facteur 5 - Vitesse désirée ("Vde").
- Facteur 6 - Distance moyenne entre stations ("Dst").
- Facteur 7 - Distance moyenne entre feux ("Dfeu").
- Facteur 8 - Type de Véhicule ("Tvéh").
- Facteur 9 - Type de feux ("Tfeu")

La variable Réponse est la Vitesse commerciale (VECO).

Facteur 1 - Le flux de véhicules par heure, par sens, est de l'ordre de 100 dans les lignes de faible affluence et dans les heures creuses, mais il peut augmenter à plus de 350, dans les heures de pointe, comme c'est le cas sur la ligne de Porto Alegre qui est exploitée avec un flux de 378 veh./h/sens (Tableau A). Ce facteur est aussi défini en 5 niveaux distribués dans l'intervalle (150 ; 350).

Ville	Flux (h/sens)	Demande (h/sens)
Abidjan	204	19500
Ankara	91	7300
Belo Horizonte	216	15800
Curitiba	94	9900
Istanbul	169	10700
Porto Alegre	326	26100
Porto Alegre	378	17500
Sao Paulo	230	20300

Tableau A

Facteur 2 - Le temps mort varie entre [5;30] secondes, il dépend du comportement des passagers, dans les stations. Ces valeurs ont été obtenues à partir d'autres études déjà effectuées, on peut le constater dans les données suivantes :

Ville	Temps mort(s)
Abidjan	10,3
Bangkok	9,8
Ankara	23,0
Belo Horizonte	5,2
Istanbul	9,3
Hong Kong	13,1
Sao Paulo	8,6
Singapour	8,4

Facteur 3 - Pour les temps moyens de montée, on s'est basé sur la connaissance d'autres études déjà effectuées (HCM du TRB et TRL).

Les cas différents suivants ont été définis :

- Paiement avant l'entrée dans le véhicule => 1,5 à 2,5 s
- Composter le ticket dans le composteur => 2 à 3 s
- Paiement dans le véhicule => 3 à 4 s

Ainsi, on a défini 5 niveaux uniformément distribués dans l'intervalle [1,5;4] s.

Dans le modèle de simulation les valeurs utilisées pour ce facteur sont celles qui sont obtenues sur une seule porte, puisque dans les autobus il n'y a qu'une porte pour monter et

une autre porte pour descendre. C'est à partir de la porte utilisée pour monter que nous définissons le temps d'arrêt du véhicule dans la station, puisque ce mouvement prend plus de temps que la descente. Le tableau suivant présente les valeurs du temps total d'arrêt en station par rapport au nombre de montées et descentes.

Ville	Station	Nb.montées par véh.	Nb.descentes par véh.	Tps total d'arrêt(s)	Tps Montée/ descente(s)
Ankara	Kizilay	54,8	16,7	173	109
Ankara	Maltepe	10,2	2,6	46	44
Bangkok	Vict.Monum.	11,4	7,1	29	28
Bangkok	Prachatipok	2,4	1,4	13	11
Singapore	Raffel's Quay	1,2	12,5	23	21
Singapore	Suangoon Road	2,5	1,6	60	40
Belo Horizonte	Pimenta Veiga	5,6	0,2	14	14
Curitiba	Portao	4,3	13,2	21	20
Istanbul	Osmanbey	2,7	28,9	35	28
Istanbul	Tusitlar	2,5	3,0	29	14
Istanbul	Sisli Cami	7,9	7,0	45	26
Istanbul	Harbiye	8,5	3,8	47	29
Sao Paulo	Est. Unidos	6,4	1,0	24	22
Hong Kong	King's Road	1,0	10,1	19	19

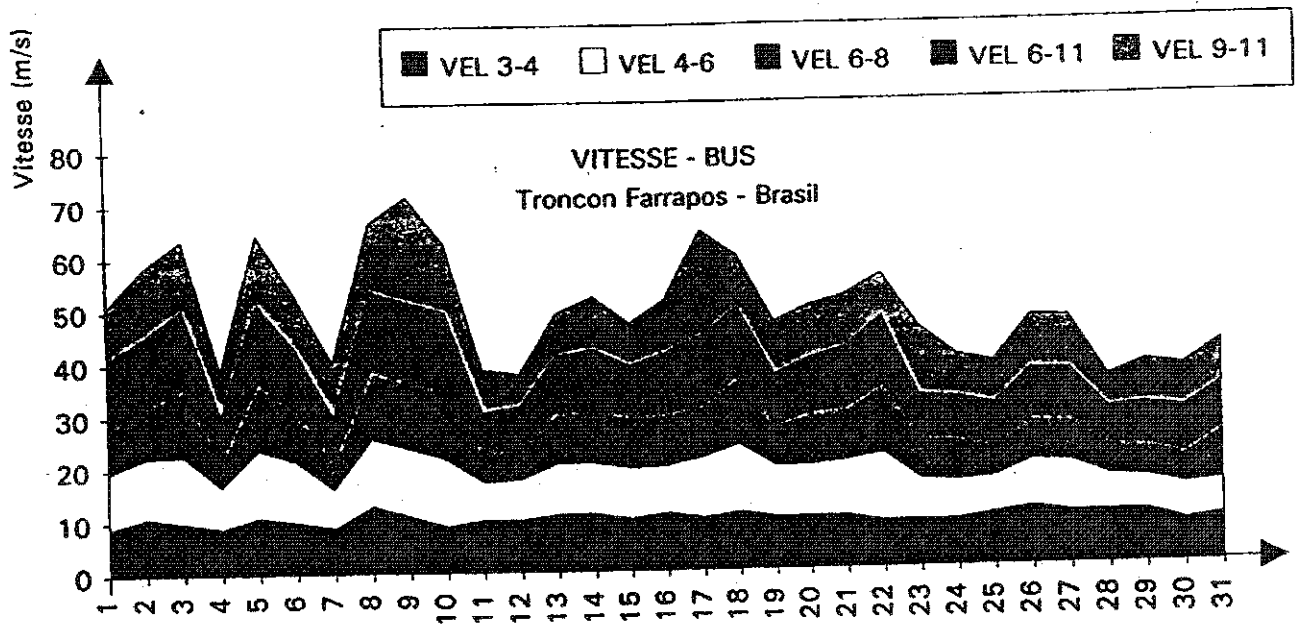
Source Gardner (1991)

Facteur 4 - Pour le facteur "Demande", on a défini les deux niveaux extrêmes entre 7500 et 25000 personnes par heure et par sens. Le premier, c'est le niveau le plus souvent obtenu dans la réalité dans un couloir avec ces caractéristiques et le niveau plus haut correspond à la valeur la plus élevée parmi les valeurs réalisées. On a défini 5 niveaux comme pour les autres facteurs. Dans le tableau suivant, on peut observer quelques chiffres sur les flux et demandes, à l'heure de pointe, dans différentes villes. Le tableau A montre des valeurs réalisées, tant pour le facteur "Dem" comme pour le facteur "Flux".

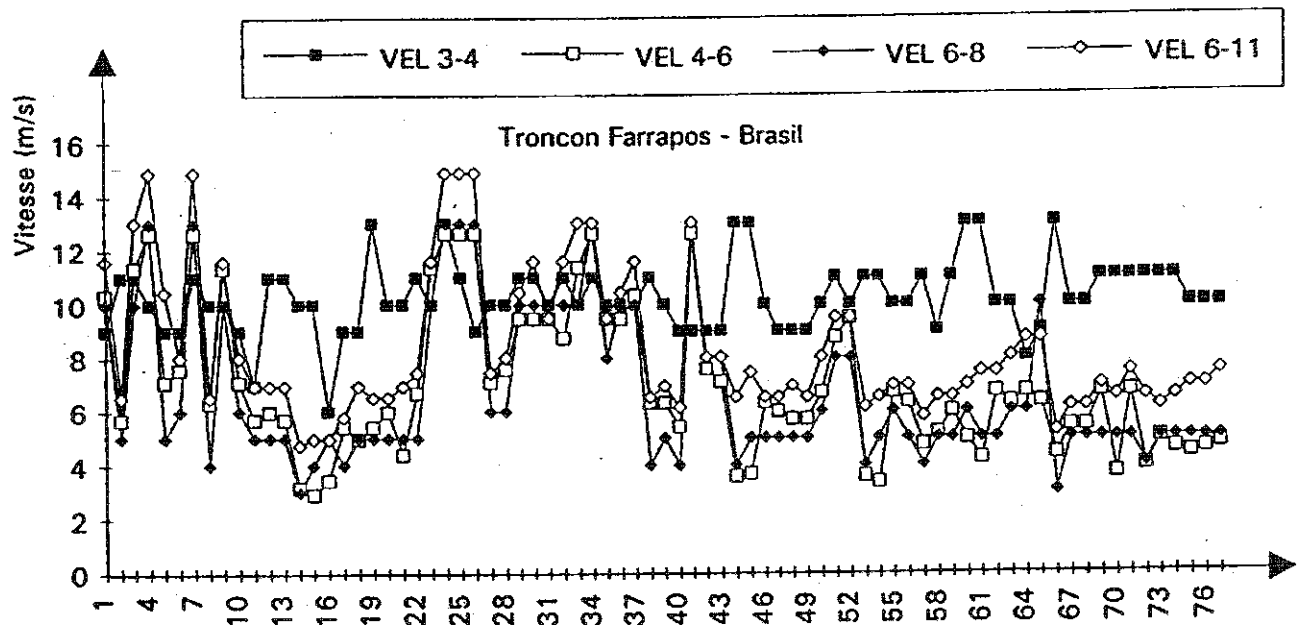
Facteur 5 - Pour la définition des niveaux de la vitesse désirée, on s'est basé seulement sur les données de la ligne Farrapos. Ainsi, sur un tronçon de ce couloir qui a été divisé en 10 parties par 11 points de chronométrage, les valeurs de ce facteur varient entre 6 m/s et 20 m/s. On définit, de cette façon 5 niveaux uniformément distribués dans l'intervalle [6;16.6] (m/s), puisque bien que la moyenne des valeurs connues soit plus basse, on trouve parfois des valeurs dans les extrêmes de cet intervalle. Le tableau 1 et les graphiques 1 et 2 ci-après, présentent les valeurs obtenues, où nous considérons que les véhicules observés circulent en trafic libre.

VITESSES OBSERVEES DANS UN TRONCON DE FARRAPOS					
	VITESSES (m/s)				
N	Point 3-4	Point 4-6	Point 6-8	Point 6-11	Point 9-11
2	9	10.33	10	11.58	10
22	11	11.36	10	13.03	13
26	10	12.62	13	14.89	13
39	9	7.57	6	8.02	8
40	11	12.62	13	14.89	13
55	10	11.36	10	11.58	10
68	9	7.1	6	8.02	10
121	13	12.62	13	14.89	13
128	11	12.62	13	14.89	20
130	9	12.62	13	14.89	13
134	10	7.1	6	7.45	8
135	10	7.57	6	8.02	6
137	11	9.47	10	10.43	8
138	11	9.47	10	11.58	10
148	10	9.47	10	9.48	8
149	11	8.74	10	11.58	10
151	10	11.36	10	13.03	20
155	11	12.62	13	13.03	10
162	10	9.47	8	9.48	10
167	10	9.47	10	10.43	10
168	10	10.33	10	11.58	10
184	9	12.62	13	13.03	8
188	9	7.57	8	8.02	13
189	9	7.1	8	8.02	8
208	10	6.68	6	8.02	8
209	11	8.74	8	9.48	10
210	10	9.47	8	9.48	10
220	10	6.68	6	6.95	6
243	10	6.31	6	8.02	8
244	8	6.68	6	8.69	8
245	9	6.31	10	8.69	8
MOYENNE	10.03	9.49	9.32	10.68	10.32
MAX	13.00	12.62	13.00	14.89	20.00
MIN	8.00	6.31	6.00	6.95	6.00
ECARTYPE	0.98	2.26	2.56	2.60	3.28

tableau 1



graphique 1



graphique 2

Couloir Farrapos

VITESSE (m/s)

	Point 3-4	Point 4-6	Point 6-8	Point 6-11	Point 9-11
Moy	10.03	9.49	9.32	10.68	10.32
Max	13	12.62	13.00	14.89	20.00
Min	8	6.31	6.00	6.95	6.00
Ecart	0.98	2.26	2.56	2.6	3.28

Valeurs des vitesses chronométrées dans un tronçon de la ligne Farrapos.

Facteur 6 - Les distances moyennes entre stations varient dans la plupart des cas dans l'intervalle [300; 600] mètres, bien qu'il y ait toujours des cas aberrants. Nous avons donc défini ce facteur à 5 niveaux, où le niveau plus bas est égal à 300 m et le niveau plus haut à 600 m et les 3 autres niveaux sont distribués dans l'intervalle [300;600] d'une façon uniforme. Le choix de ces niveaux s'effectue à partir des cas identifiés les plus nombreux. Pour chaque niveau de ce facteur nous définissons le nombre total de stations dans chaque tronçon.

Dist. moy. stations (en m)	Nombre de stations
300	23
375	18
450	15
525	13
600	11

Facteur 7 - Les distances entre carrefours régulés par feux varient de 160 m à 920 m. A partir des réseaux identifiés précédemment, on va situer la distance moyenne entre feux dans l'intervalle [200;1000] mètres. Pour ce facteur, nous définissons 5 niveaux uniformément distribués dans l'intervalle cité. Pour chacun des niveaux il faut trouver le nombre de feux qui seront placés sur chacun des tronçons.

Dist. moy. feux (en m)	Nombre de feux
200	34
400	17
600	11
800	8
1000	7

La distribution des feux par rapport aux stations peut influencer la VECO.

Facteur 8 - Le type de véhicule est un facteur qualitatif, défini à 3 niveaux, ceux que l'on utilise le plus souvent. Ce facteur fait la distinction entre 3 différentes manières d'ordonnement des véhicules dans la circulation et en conséquence dans l'arrêt en station.

Facteur 9 - Le type de prise en compte des véhicules aux feux est aussi un facteur qualitatif, défini à 3 niveaux, qui différencie les temps d'arrêt aux feux par les véhicules, de façon à ce que chaque feu soit vert quand le véhicule passe, on a calculé les "offsets" (tableaux 4.1 à 4.5 en annexe), pour les différents niveaux de vitesse de consigne.

La longueur du véhicule la plus répandue est de 11 mètres, c'est avec cette valeur que nous allons effectuer l'étude. Ci-dessous, on peut regarder les caractéristiques essentielles des principaux types d'autobus urbains rencontrés actuellement sur le marché mondial, retenus à partir des réponses au questionnaire adressé par l'UITP à divers réseaux.

PAYS	Longueur des véhicule		
	2 essieux (m)	3 essieux (m)	Petite capacité (m)
Allemagne	11,25	17,1	5,87
Belgique	11,22	17,5	6,39
Espagne	10,5	16,42	--
France	11	17,2	5,8
Italie	11	--	6,54
Japon	10,76	--	6,2
Pays-bas	11,52	--	--
Royaume-Uni	10,84	--	--
Suede	11,6	17,2	--
USA	11,4	--	6,2
Hongrie	--	16,5	--
MOYENNE	11,1	17	6,2

Source: UITP (1978)

Nous présentons ci-dessous le tableau des 5 niveaux correspondants pour les facteurs F1 jusqu'à F9.

Facteurs

Niveaux	F1 (véh/h/sens)	F2 (s)	F3 (s)	F4 (pas/h/d)	F5 (m/s)	F6 (m)	F7 (m)	F8 (typ conv)	F9 (régul.)
-2	150	5,00	1,50	7500	6,00	300	200		
-1	200	11,25	2,13	11875	8,65	375	400	s.c.o.	s.ov(90)
0	250	17,50	2,75	16250	11,30	450	600	a.c.c.	a.ov(60)
1	300	23,75	3,38	20625	13,95	525	800	a.c.i.	a.ov(90)
2	350	30,00	4,00	25000	16,60	600	1000		

Notations

s.c.o. = Sans Convoi - 6 véhicules max. à l'arrêt
 a.c.c. = Avec Convoi Complet - 6 véhicules de 3 groupes AA BB CC
 a.c.i. = Avec Convoi Incomplet - 5 véhicules max en attente d'entrer dans le couloir, et/ou le tps max. d'attente pour entrer dans le couloir est de 60 secondes.

s.ov (90) = Sans Onde Verte, avec un cycle de 90 secondes.

a.ov (60) = Avec Onde Verte, avec un cycle de 60 secondes.

a.ov (90) = Avec Onde Verte, avec un cycle de 90 secondes.

8.3.5 - Définition du Plan d'expériences utilisé

Le Plan d'expériences utilisé dans cette étude pour rechercher quels sont les facteurs qui influencent la VECO, suit l'idée du plan "Second Order Composite Designs" (Box et Draper, 1987) qui présente un cube fortement fractionné, il est identique à celui décrit au § 8.1.6 pour le couloir exploité par métro léger.

Cette étude enveloppe 9 facteurs, dont 7 peuvent être analysés à divers niveaux et 2 qui doivent être étudiés exactement à 3 niveaux.

Donc le plan suggéré est : la combinaison entre un plan factoriel $2^{(9-4)}$ (32 traitements), plus une étoile incomplète (14 traitements), plus quelques points centrés (2 traitements).

Ainsi, on obtient la matrice d'expériences suivante qui contient 48 traitements (cf matrice de l'expérimentation au § 8.3.5 de l'annexe :

Trait	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
3	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1
4	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1
5	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1
6	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1
7	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1
8	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1
9	1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1
10	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1
11	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1
12	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
13	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1
14	-1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1
15	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	1
16	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	1
17	1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
18	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1
19	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1
20	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1	1
21	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1
22	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1
23	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1
24	-1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1
25	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1
26	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1
27	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1
28	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1
29	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1
30	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1
31	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1
32	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1
33	1	1	1	1	1	1	1	1	1
34	2	0	0	0	0	0	0	0	0
35	-2	0	0	0	0	0	0	0	0
36	0	2	0	0	0	0	0	0	0
37	0	-2	0	0	0	0	0	0	0
38	0	0	2	0	0	0	0	0	0
39	0	0	-2	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	2	0	0	0	0	0
41	0	0	0	-2	0	0	0	0	0
42	0	0	0	0	2	0	0	0	0
43	0	0	0	0	-2	0	0	0	0
44	0	0	0	0	0	2	0	0	0
45	0	0	0	0	0	-2	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0	2	0	0
47	0	0	0	0	0	0	-2	0	0
48	0	0	0	0	0	0	0	0	0

L'étoile est incomplète, parce que les expériences où le niveau d'un des facteurs est égal à 2 ou -2 et tous les autres sont égaux à 0, sont effectuées seulement pour les 7 premiers facteurs, puisque les 2 autres ne sont qu'à 3 niveaux.

Pour obtenir une meilleure estimation du terme d'erreur et des coefficients de régression, on a effectué 3 répétitions de chaque traitement, donc, ce projet exige $48 \times 3 = 144$ observations. Les niveaux des facteurs F8 et F9 ont été choisis de façon à ce que -1 soit le niveau où, à notre avis, la VECO aura une valeur plus faible et +1 où la VECO aura une meilleure valeur.

Les résultats de la simulation pour chaque traitement sont au tableau 4 ci-dessous :

VITESSE COMMERCIALE (Km/h)			
Vehicule = 11 m			
Trait	Rep 1	Rep 2	Rep 3
1	15.1	14.6	15.4
2	17.2	16.4	16.6
3	15.2	15	15.3
4	14.7	14.5	14.9
5	12.1	11.5	11.5
6	13	12.6	12.8
7	15	14.9	15
8	12.5	12.4	12.4
9	13.7	13.4	13.4
10	14.1	13.5	13.6
11	13.6	14.1	13.7
12	12.6	12.7	12.3
13	14.2	14.1	13.9
14	13.9	13.7	14
15	12.3	11.9	11.8
16	11.4	11.6	11.2
17	11.5	11.4	11.4
18	18.4	18.6	18.8
19	16.4	16.4	16.4
20	14.4	14.2	14.2
21	17.9	18	18
22	20.9	20.7	21.3
23	15	14.9	15.3
24	14.5	14.7	14.6
25	13.2	13.3	13.3
26	18.2	17.4	18.9
27	16.9	16	16.5
28	16.4	15.7	16.7
29	12.8	12.9	13.1
30	12.8	14	13.3
31	15.9	16.1	16.3
32	13.6	13.5	14.2
33	13.6	13.7	13.7
34	14.3	14.2	14.3
35	15.3	14.6	14.4
36	12.9	13	13.6
37	17.4	16.8	17.6
38	13.5	13.6	14
39	16.5	16.4	16
40	13.6	13.5	13.3
41	16.5	16.2	16.7
42	16.9	16.3	17.7
43	10.8	10.8	11.2
44	15.9	15.7	15.1
45	13.5	13.3	12.9
46	16	15.7	15.7
47	13.6	13.6	13.5
48	15.1	14.6	15.4

tableau 4

Dans cette matrice on a l'avantage que tous les niveaux extrêmes ne se croisent pas; seulement les 3 niveaux du milieu se croisent, puisqu'il est impossible de faire un plan factoriel complet, étant donné qu'il y a des traitements qui ne seraient pas possibles à réaliser à cause des contraintes existantes dans l'exploitation d'un autobus. Ainsi, cette matrice rassemble les cas les plus importants et tous les traitements peuvent être simulés.

Les interactions de 3 facteurs ou plus sont supposées non significatives. Donc pour la matrice choisie, les interactions qu'on peut analyser sont :

- toutes les interactions de 2 facteurs.
- pour le facteur "Vde", aussi les interactions de 3 facteurs.

Les interactions de 2 facteurs les plus importantes à étudier sont :

Dst*Dfeu	Tmon*Dem	Dem*Dfeu
Dst*Tveh	Flux*Dst	Dem*Tveh
Tmor*Tmon	Tmor*Dst	Flux*Dem
Flux*Tveh	Tmor*Dem	Dem*Dst
Tmor*Tveh		

L'attribution du facteur F5 au facteur "Vde" a été effectuée parce que c'est à ce facteur que nous nous intéressons le plus. Dans la matrice choisie, le facteur F5 est dans une situation privilégiée, puisque son effet et l'effet de leurs interactions seront estimés avec une grande précision. Les autres facteurs ont été attribués de façon à ce qu'aucune paire d'interactions d'intérêt ne soit confondue.

Nous devons définir pour ce plan, 9 couloirs différents, tous de la même longueur, mais avec des nombres différents de stations et de feux, suivant les différentes distances entre stations et les distances entre feux. Les coordonnées respectives d'emplacement des feux et des stations, choisies aléatoirement pour chaque couloir, mais en n'oubliant pas que dans le centre les stations et les feux sont plus proches que dans la banlieue, sont rassemblées dans le tableau 3, en annexe.

Il est nécessaire de faire pour le modèle de simulation une distribution du nombre de montées dans chaque véhicule. Cette distribution est basée sur la distribution de la ligne de Farrapos, puisque dans les données que nous avons sur cette ligne, elle a la caractéristique d'être la plus chargée au centre-ville, et ce cas nous intéresse. Suivant les différentes valeurs des différents facteurs : Nombre de stations, Flux, Demande et Longueur du véhicule, nous avons construit les tableaux 5.1-5.5 qui sont en annexe.

Remarques :

Le modèle de simulation exige une distance entre l'origine où le véhicule est inséré et la première station ou le premier feu, ceci dépend par quel des deux équipements commence le tronçon, le modèle exige aussi que le tronçon soit terminé par un feu.

S'il y a un problème dans la simulation, c'est à dire, s'il n'était pas possible d'exécuter le calcul à cause de l'excès de flux et une petite distance entre l'origine et la première station, on réduit le nombre de voyageurs qui monte dans la première station et on l'augmente dans la deuxième station, ainsi le véhicule s'arrête dans la première station pour une durée de temps inférieure. La position des feux par rapport aux stations a aussi beaucoup d'influence sur l'exploitation d'une ligne, donc pour pouvoir simuler les traitements qui concernent les différents cas, où le temps mort, le flux et la demande sont dans leurs niveaux hauts, on doit changer parfois l'emplacement du feu ou de la station qui cause des problèmes.

8.3.6 - Obtention des résultats

Après une analyse préliminaire des données, nous avons constaté que dans l'intervalle en étude, le facteur "Vde" est le seul à avoir un effet quadratique. Tous les autres facteurs : "Tmor", "Flux", "Tmon", "Dst", "Dfeu" et "Dem", "Tveh", "Tfeu" ont un effet linéaire. Les interactions, d'une façon générale, ont des effets faibles. Cette analyse préliminaire a été effectuée en utilisant la méthode par Régression Multiple. Pour savoir quelle est la relation entre chaque facteur et la VECO, c'est à dire, si chaque facteur a un effet linéaire ou carré, nous basons sur les termes qui sont significatifs.

Après application de la méthode par régression linéaire multiple, le modèle obtenu est le suivant :

$$\begin{aligned} \text{VECO} = & 14,81 - 0,27 * \text{Flux} - 0,95 * \text{Tmor} - 0,64 * \text{Tmon} - 0,64 * \text{Dem} \\ & + 1,23 * \text{Vde} - 0,23 * \text{Vde}^2 + 0,48 * \text{Dst} + 0,8 * \text{Dfeu} - 0,65 * \text{Tve} \\ & - 0,1 * \text{Tfeu} + 0,21 * \text{Dst} * \text{Dfeu} + 0,1 * \text{Dst} * \text{Tveh} + 0,14 * \text{Flux} * \text{Dem} \\ & + 0,21 * \text{Tmor} * \text{Dem} - 0,2 * \text{Flux} * \text{Vde} - 0,14 * \text{Tmon} * \text{Dem} \\ & - 0,22 * \text{Tmor} * \text{Vde} - 0,09 * \text{Tmon} * \text{Dst} - 0,11 * \text{Dem} * \text{Dst} + 0,1 * \text{Vde} * \text{Dst} \\ & - 0,17 * \text{Dem} * \text{Dfeu} + 0,16 * \text{Vde} * \text{Dfeu} + 0,16 * \text{Dem} * \text{Tveh} \\ & - 0,28 * \text{Vde} * \text{Tveh}. \end{aligned}$$

Facteur	Coefficient
Constante	14,81
F1 : Flux	- 0,27
F2 : Tmor	- 0,95
F3 : Tmon	- 0,64
F4 : Dem	- 0,64
F5 : Vde	- 1,23
Vde ²	- 0,23
F6 : Dst	0,48
F7 : DFeu	0,80
F8 : Tveh	- 0,65
F9 : Tfeu	- 0,10
F6 * F7	0,21
F6 * F8	0,10
F1 * F4	0,14
F2 * F4	0,21
F1 * F5	- 0,20
F3 * F4	- 0,14
F2 * F5	- 0,22
F2 * F6	- 0,09
F4 * F6	- 0,11
F5 * F6	0,10
F4 * F7	- 0,17
F5 * F7	0,16
F4 * F8	0,16
F5 * F8	- 0,28

Les termes qui n'apparaissent pas dans le tableau, comme par exemple "Tmon*Tmor" ou "Tveh*Tmor" ont un effet non significatif et peuvent être alors considérés comme nuls.

A partir du "coefficient" de chaque facteur, on peut voir si l'effet du facteur respectif sur la VECO est positif ou négatif et aussi mesurer l'importance des facteurs sur la variable réponse. Le signal indique qu'une augmentation d'un certain facteur va produire une augmentation ou une diminution dans la VECO.

Ce modèle peut être utilisé pour prévoir la VECO pour n'importe quelle combinaison de traitements. Il faut introduire les valeurs des niveaux correspondants à la valeur de chaque facteur "Vde", ..., "Lgv" dans l'équation correspondante au modèle obtenu et on obtient la valeur estimée de la VECO.

Le facteur qui a le plus grand effet sur la VECO est "Vde", donc on a bien attribué ce facteur au facteur F5. Ce facteur a un effet positif sur la VECO.

8.3.7 - Présentation des résultats

L'importance de chaque facteur peut être observée dans la figure suivante :

Facteur (effet linéaire + quadratique)		"Effet"
F5: Vde	*****	15,55
F2: Tmor	*****	10,36
F7: Dfeu	*****	8,78
F4: Dem	*****	7,01
F3: Tmon	*****	6,99
F8: Tveh	*****	6,36
F6: Dst	*****	5,27
F1: Flux	*****	2,93
F5*F8	*****	2,75
F2*F5	*****	2,16
F6*F7	*****	2,10
F2*F4	*****	2,10
F1*F5	*****	2,00
F4*F7	*****	1,67
F4*F8	*****	1,59
F5*F7	*****	1,57
F3*F4	****	1,36
F1*F4	****	1,34
F4*F6	***	1,08
F9: Tfeu	***	1,00
F6*F8	***	1,00
F5*F6	***	0,94
F2*F6	**	0,86

La valeur "Effet" calculée est égale à la racine carrée de la variance, cette valeur est proportionnelle à l'effet du terme correspondant. Ainsi la figure ci-dessus nous donne une très bonne idée de l'importance des facteurs sur la VECO.

Cet "Effet" ne correspond pas à celui obtenu quand on applique la technique des plans d'expérience pour l'analyse des résultats, puisque cet "Effet" ne nous dit pas si les

facteurs ont une influence négative ou positive sur la VECO, et il ne mesure pas, pour chacun des facteurs, la variation de la VECO quand on passe du niveau bas au niveau haut ou vice-versa. Donc cette valeur nous aide carrément à connaître la relation entre les différents effets de chaque facteur sur la VECO.

8.3.8 - Les valeurs Optimales

Il est aussi intéressant de vérifier quelles sont les valeurs des facteurs qui maximisent la VECO, en utilisant des procédures d'optimisation standards.

Ces valeurs nous paraissent être les suivantes :

"Vde"	= maximum	(16,6 m/s)
"Tmor"	= minimum	(5 s)
"Tmon"	= minimum	(1,5 s/voy)
"Dem"	= minimum	(7500 voy/h/sens)
"Flux"	= minimum	(150 veh/h/sens)
"Dst"	= maximum	(600 m)
"Dfeu"	= maximum	(1000 m)
"Tveh"	= minimum	(s.c.o.)
"Tfeu"	= indifférent	

Donc, si dans ce couloir de 7 Km de longueur à chaque facteur sont attribuées les valeurs obtenues ci-dessus, on aurait un tronçon d'autobus où la vitesse commerciale est maximum. En utilisant les niveaux correspondants de chaque facteur aux valeurs optimales, trouvées ci-dessus, dans le modèle obtenu précédemment, on calcule la valeur maximale pour la VECO égale à 31,12 Km/h.

8.3.9 - Analyse des résultats

Nous ne sommes pas surpris par les résultats obtenus, puisqu'on s'attendait déjà à l'importance de "Vde" et de "Tmor".

Les facteurs "Vde", "Tmor", "Tmon", "Dfeu", "Dst", "Dem" et "Tveh" ont un effet important sur la VECO, tous les termes restants qui sont dans la figure ci-dessus ont un effet petit ou modéré sur la VECO et les termes qui n'apparaissent pas ont un effet moindre sur la VECO.

Le seul facteur qui a un effet quadratique significatif est "Vde", mais cet effet n'est pas prononcé. Tous les facteurs restants ont un effet à peu près linéaire sur la VECO.

Tous les facteurs principaux ont un effet prononcé sur la VECO, sauf "Flux" qui a un effet modéré sur la VECO et "Tfeu" qui a un effet petit sur la VECO. Aucune interaction a un effet prononcé sur la VECO.

8.3.10 - Conclusion

Nous nous attendions à l'effet très petit du facteur "Tfeu" parce que les 3 niveaux attribués à ce facteur ne sont pas très différents en réalité, étant donné que les calculs d'"offsets", (pour qu'il y ait une onde verte de cycles de 60 ou 90 secondes)), ont été basés sur la vitesse de consigne (désirée) pour ce tronçon de 7 km: nous travaillons avec un grand flux de véhicules qui s'arrêtent à chaque station, l'ensemble des véhicules ne profite pas de la même onde verte. D'autres hypothèses pourraient être testées, par exemple une autre longueur de cycle de feux, une prise en compte individuelle pour quelques feux, un autre type de calcul de l'onde verte, etc.

En comparant cette étude avec celle faite pour le métro léger (Simoes, 93), cette comparaison bien que simple car les niveaux des facteurs sont un petit peu différents, nous permet néanmoins de faire les premières remarques suivantes :

- En moyenne, les valeurs obtenues pour la VECO, dans la présente étude sont plus basses, l'autobus roule donc à une vitesse inférieure à celle du métro léger.
- Dans l'étude du métro léger, presque tous les facteurs avaient des effets quadratiques sur la VECO, nous constatons le contraire maintenant.
- La variabilité observée sur le tronçon exploité avec l'autobus est inférieure à celle observée sur le tronçon exploité avec le métro léger.

Les résultats des deux études coïncident sur les points suivants :

- Les facteurs "Vde" et "Tmor" sont ceux qui ont le plus grand effet sur la VECO et l'interaction entr'eux est relativement importante.
- Les effets des facteurs "Dst" et "Tmon" sont à peu près les mêmes dans les deux études.

Les différences évidentes entre les deux études sont :

- Pour l'autobus le facteur "Dfeu" a un effet important sur la VECO, par contre pour le métro léger ce facteur a un effet simplement modéré sur la VECO. Ceci est dû au fait que dans l'étude pour le métro léger la priorité des véhicules aux feux était presque toujours obtenue, donc n'ayant pas d'arrêts à ces endroits, l'emplacement des feux n'a donc pas d'influence.
- Pour l'autobus le facteur "Dem" a un effet plus important sur la VECO que le métro léger, ceci provient d'une augmentation de la demande de 20 000 pas./h./sens pour le métro léger à une demande de 25 000 pas./h./sens pour l'autobus
- Dans cette étude l'effet du facteur "Flux" est modéré, au contraire de ce qui s'est passé pour le métro léger.

9. Conclusion Générale

Après une description des systèmes de transport urbain par autobus en site propre et des systèmes exploités par le métro léger nous rappelons la définition de quelques paramètres d'exploitation d'un système de transport.

Nous décrivons ensuite les possibilités du modèle Busway développé par (Lindau 1988) et les adaptations qui lui ont été apportées au CRESTA pour simuler l'exploitation du métro léger. Le calibrage et la validation du modèle ont été effectués sur un cas concret : l'exploitation du métro léger sur la ligne sud du réseau de métro de Tunis. Pour ce faire, nous avons retenu un tronçon de 6123 mètres, le plus chargé du réseau à l'heure de pointe et étudié les performances du métro léger. Ensuite nous avons simulé sur le même tronçon, avec la même demande de passagers, une exploitation avec des autobus en site propre (le site étant identique nous n'avons pas pu donner la priorité aux feux, on a donc dû ajouter 5 carrefours où normalement le métro léger a la priorité absolue).

L'utilisation des plans d'expériences nous a permis d'estimer les effets de chaque facteur et toutes les interactions possibles des facteurs sur la vitesse commerciale dans le cas du métro léger et le cas de l'autobus en site propre.

Une analyse de la capacité de la ligne sud exploitée avec le métro léger et avec l'autobus a permis de voir les limites de chacun des deux systèmes lorsque la demande augmente et la ligne est saturée : le métro léger permet une exploitation plus souple lorsque la demande est importante (de l'ordre de 20 000 pas.h/sens). En effet le niveau de contraintes est différent, on a 200 autobus/h d'un côté et 40 rames de métro de l'autre, contraintes qui se répercutent sur la gestion des carrefours. Cette comparaison effectuée sur un tronçon de 6 km dans le contexte particulier de Tunis ne nous permet pas de tirer de conclusion plus large qui pourrait s'appliquer à n'importe quel réseau; aussi nous avons recherché un couloir représentatif de l'exploitation du métro léger et de l'autobus en site propre.

La mise en oeuvre de l'onde verte pour l'autobus ou la prise en compte des véhicules de la circulation transversale permet d'améliorer l'exploitation de l'autobus et donc la vitesse commerciale. Par contre le métro léger pour qui les concepteurs ont généralement prévu dès sa mise en exploitation une prise en compte aux carrefours à feux se voit contraint par la circulation transversale aux carrefours au delà de 30 rames/h car la prise en compte ne devient plus possible si on souhaite maintenir les flux transversaux.

La poursuite de cette recherche devra permettre d'établir les plans d'expériences relatifs aux hautes capacités pour ces deux systèmes de transport et d'évaluer les facteurs qui ont le plus d'influence sur la vitesse commerciale et de déterminer lequel des deux systèmes offre la plus grande capacité avec une qualité de service équivalente.

Dans le dernier chapitre nous tentons d'analyser les deux systèmes sur des situations fictives (représentatives de ce que l'on constate pour le métro léger et l'autobus en site propre sur le plus grand nombre de réseaux). Nous retenons un couloir de 7 km dans un centre urbain et établissons un plan d'expériences pour chaque système : nous évaluons l'importance de chaque facteur sur la vitesse commerciale et établissons une équation pour chaque système qui permet de calculer la vitesse commerciale dans différents scénarios (combinaisons différentes des facteurs).

La gestion des carrefours reste un élément important pour une comparaison sur un même niveau de ces deux systèmes.

En définitive, les premiers résultats de cette recherche des performances de deux systèmes de transport de capacité intermédiaire permettent de dégager les variables qui ont le plus d'influence sur les performances en terme de vitesse commerciale en utilisant les possibilités d'un modèle, initialement développé pour l'exploitation des autobus, pour simuler l'exploitation du métro léger pour différents scénarios.

BIBLIOGRAPHIE

- 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.
- BOX, G.E.P. & DRAPER, N.R. (1986) Empirical Model - Building and Response Surfaces
- 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.
- GARDNER G., P. R. CORNWELL et J. A. CRACKNELL (1991) "Performance of high-capacity bus systems". Transport Research Laboratory - TRL Research Report 329.
- GARDNER G., KUHN F. (1992) "Appropriate mass transit in developing cities", Communication 6ième WCTR, Lyon 92.
- GARDNER G., KUHN F., RUTTER J. (1993, Project Report PR LRT V4), The performance and potential of light rail transit in Developing Cities. TRL.
- 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.
- HEUNEMANN G., and al. (1993), Priorité aux autobus dans les zones denses, Rapport 5, 50e Congrès International Sydney 93, UITP.

- HUGONNARD J.C. (1992) Perspectives d'avenir du métro léger, RGCF 111è année oct.92.
- ITC, International Transit Compendium, Light Rail Transit, vol.IV, N°2.
- KUHN F. (1986) Les transports guidés de surface : situation actuelle et perspectives, tome 2 onze réseaux de tramways et de métros légers en Europe, INRETS-CRESTA.
- KUHN F. (1987) Les transports guidés de surface : situation actuelle et perspectives, synthèse INRETS N°4.
- KUHN F. (1988) Les transports guidés de surface : situation actuelle et perspectives, tome 4 Les réseaux Français, INRETS-CRESTA.
- KUHN F. (1989) Quels transports en site propre après 1992 ?, in Revue Le Rail Fev.92.
- KUHN F. (1990) Evolution et perspectives du marché du métro léger, Colloque ISTED, Dunkerque juin 90.
- KUHN F., MICHEL F.D. (1993) Les performances d'exploitation du métro léger de Tunis, INRETS-SMLT.
- 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 ? Actes IV de la Conférence sur les transports urbains dans les Pays en Développement, CODATU IV Jakarta.
- LINDAU L.A. (1988) Busway, unpublished technical paper.
- LINDAU L.A. (1992) Sistemas de transporte urbano de média capacidade : uma analise comparativa enfocando as tecnologias VLT e ônibus, ANPET 92.
- LOHRMANN K.D., SCHAFFER H., DE GRAAFF C.J., (1993), Priorité des métros légers aux feux de signalisation, Rapport 4, 50e Congrès International Sydney 93, UITP.
- MICHEL F.D., KUHN 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.
- RATP (1977) Autobus en site propre.
- SAPORTA G. (1978) Théories et méthodes de la statistique.
- 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.

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.

ANNEXES

5. Le modèle BUSWAY

5.6 Calibrage du modèle Busway

5.6.1 Calibrage en vue d'une simulation de l'exploitation du métro léger

Dt. Réelle	METRO 215			METRO 231			METRO 205		
	Vitesse = 6,7m/s			Vitesse = 6,0 m/s			Vitesse = 7,5m/s		
	rac=0,03	rac=0,02	rac=0,015	rac=0,03	rac=0,02	rac=0,015	rac=0,03	rac=0,02	rac=0,015
60	72	62.83	56	65.91	57.92	51.93	59.99	54.56	47.84
80	91.66	81.74	74.13	89.56	80.91	74.02	85.5	74.71	66.66
100	124.86	114.36	105.9	119.46	110.41	103.06	122.33	110.27	103.4
120	152.02	141.38	132.55	149.52	140.32	131.22	144.92	132.55	122.52
180	225.31	214.41	205.31	209.46	200.26	192.46	219.6	206.8	196.13
240	291.04	280.1	271.04	275.46	266.26	258.46	286.2	273.3	262.5
260	311.41	300.51	291.11	294	284.8	277.06	306.67	293.77	282.97
ACE	0.634	0.517	0.448	0.6	0.489	0.424	0.67	0.547	0.474
Dt. Réelle	METRO 228			METRO 224			METRO 221		
	Vitesse = 7,3m/s			Vitesse = 8,0m/s			Vitesse = 8,5m/s		
	rac=0,03	rac=0,02	rac=0,015	rac=0,03	rac=0,02	rac=0,015	rac=0,03	rac=0,02	rac=0,015
60	85.93	75.26	61.86	47.29	38.96	33.53	64.86	54.42	47.28
80	107.42	96.04	87.25	61.45	51.71	44.96	88.49	76.25	67.42
100	150.91	138.82	129.13	91.5	79.74	70.98	121.4	107.58	97.06
120	181.18	168.98	158.88	117.18	104.4	94.48	151.56	136.93	122.22
180	260.31	248.01	237.61	186.48	172.58	161.19	222.81	207.5	194.78
240	335.57	323.25	312.77	258.86	244.76	232.96	294.45	279	266
260	352.66	340.26	329.86	275.74	261.64	249.74	311.36	295.86	282.91
ACE	0.662	0.54	0.467	0.693	0.56	0.489	0.71	0.583	0.5

Tableau 1

5.6.2 Calibrage en vue d'une simulation des convois d'autobus

R ² = 0,986								
DIST REAL	BUS 1	BUS 2	BUS 3	BUS 4	BUS 5	BUS 6	BUS 7	BUS 8
20	14	--	19	14	14	14	--	16
40	39,1	35,1	44,1	39,6	39,1	40,2	30,5	25,2
133	136,7	118,6	131,7	131,1	126,7	125,2	119,1	99,3
153	156,7	144,2	141,7	152	146,7	147,3	152,2	121,6
246	256,7	258,6	267,3	261,7	246,7	257,9	251,3	222,7
266	--	272	279,9	276,5	276,6	268,3	271,7	244,2
286	284,5	294,8	298,7	295,8	295,1	297,4	284,1	274,1
310	292,4	316,7	321,7	303	312,6	306,7	284,5	289,7
330	310,4	342,5	347,5	335,1	338,7	333,9	284,5	311,2
350	326,7	361,1	365,8	352,5	356,6	352	284,5	--

Tableau 2

Tableau des résultats du calibrage

Comparaison entre réalité et simulation des positions des 8 véhicules : le Bus 1 est à 20 mètres de l'origine en réalité tandis que dans la simulation il se situe à 14 mètres, etc.

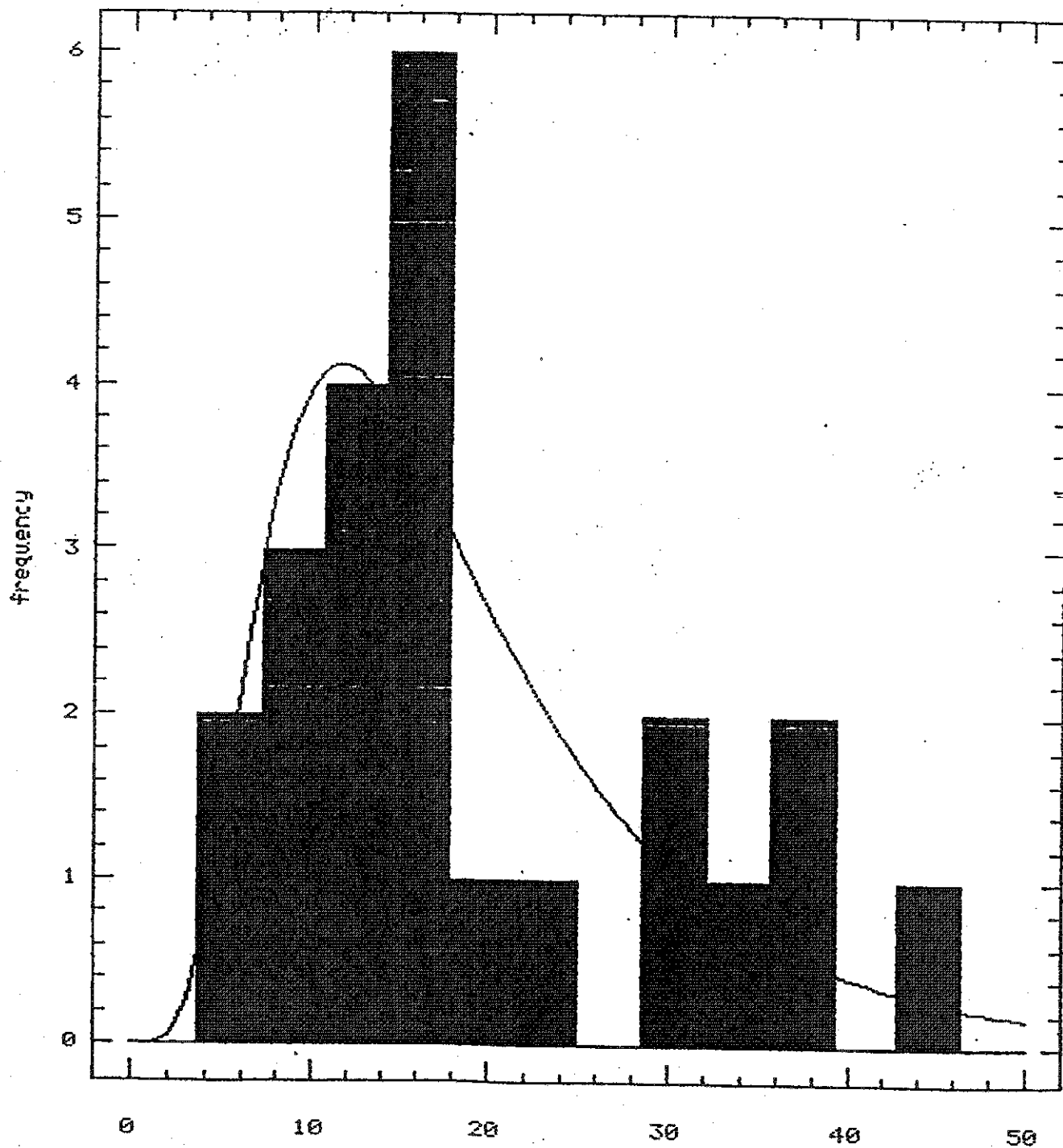
7. Etude des performances d'exploitation sur un couloir existant

7.1 Etude du cas du métro léger

7.1.1 Validation du modèle Busway

e) Stations : temps mort dans les stations

Les résultats sont obtenus en établissant une distribution des données relevées avec l'hypothèse que cette distribution est de type Logarithme normal selon la courbe ci-jointe :



8. Etude des performances d'exploitation sur un couloir fictif

8.2 Etude du cas du métro léger

8.2.1 Un plan d'expériences pour l'exploitation du métro léger

A partir de différentes valeurs des différents facteurs : nombre de stations, flux, demande, longueur de véhicule, nous établissons les 20 tableaux de la moyenne et écartype pour différents nombre de stations et longueurs de véhicules.

7 stations/véhicule 60m/Moy

FI10;De4500	FI35;De13750
18.43	8.79
12.62	6.02
5.9	2.82
2.19	1.04
4.1	1.96
4.72	2.25
8.34	3.98

7 stations/véhicule 60m/Ecart

FI10;De4500	FI35;De13750
5.25	2.51
5.13	2.45
2.96	1.41
0.48	0.23
2.12	1.01
1.73	0.83
7.16	3.42

8 stations / véhicule 60m / Moyenne

FI10;De4500	FI22;De10625	FI22;De16875	FI47;De10625	FI47;De16875
18.43	13.15	14.49	6.96	6.78
12.62	9.01	9.92	4.22	4.65
5.9	4.21	4.64	1.97	2.17
2.19	1.56	1.72	0.73	0.81
4.1	2.93	3.22	1.37	1.51
1.07	0.76	0.84	0.36	0.39
5.15	3.68	4.05	1.72	1.90
7.24	5.17	5.69	2.42	2.66

8 stations / véhicule 60 / Ecartype

FI10;De4500	FI22;De10625	FI22;De16875	FI47;De10625	FI47;De16875
5.25	3.75	4.13	1.75	1.93
5.13	3.66	4.03	1.71	1.89
2.96	2.11	2.33	0.99	1.09
0.48	0.34	0.38	0.16	0.18
2.12	1.51	1.67	0.71	0.78
0.75	0.54	0.59	0.25	0.28
1.92	1.37	1.51	0.64	0.71
6.16	4.40	4.84	2.06	2.27

10 stations / véhicule 60m / Moyenne

FI10;De4500	FI10;De13750	FI35;De7500	FI35;De13750	FI35;De20000	FI60;De13750
15.43	25.77	6.17	7.36	7.80	7.17
6.44	10.75	2.58	3.07	3.26	2.99
9.18	15.33	3.67	4.38	4.64	4.27
5.9	9.85	2.36	2.82	2.98	2.74
2.28	3.81	0.91	1.09	1.15	1.06
4.63	7.73	1.85	2.21	2.34	2.15
0.95	1.59	0.38	0.45	0.48	0.44
4.65	7.77	1.86	2.22	2.35	2.16
2.76	4.61	1.10	1.32	1.40	1.28
5.58	9.32	2.23	2.66	2.82	2.59

10 stations / véhicule 60m / Ecartype

FI10;De4500	FI10;De13750	FI35;De7500	FI35;De13750	FI35;De20000	FI60;De13750
3.87	6.46	1.55	1.85	1.96	1.80
2.76	4.61	1.10	1.32	1.40	1.28
3.75	6.26	1.50	1.79	1.90	1.74
2.96	4.94	1.18	1.41	1.50	1.38
0.88	1.47	0.35	0.42	0.45	0.41
2.22	3.71	0.89	1.06	1.12	1.03
0.52	0.87	0.21	0.25	0.26	0.24
1.66	2.77	0.66	0.79	0.84	0.77
2.24	3.74	0.90	1.07	1.13	1.04
4.92	8.22	1.97	2.35	2.49	2.29

17 stations/véhicule 60m/Moy

FI10;De4500	FI35;De13750
12.43	5.93
6	2.86
8.44	4.03
6.18	2.95
2.15	1.03
1.75	0.84
1.19	0.57
1.09	0.52
2	0.95
2.01	0.96
0.62	0.30
0.95	0.45
2	0.95
2.65	1.26
1	0.48
1.76	0.84
5.58	2.66

17 stations/véhicule 60m/Ecart

FI10;De4500	FI35;De13750
3.56	1.70
2.07	0.99
3	1.43
2.1	1.00
0.81	0.39
1.34	0.64
0.38	0.18
0.5	0.24
0.8	0.38
0.9	0.43
0.5	0.24
0.52	0.25
0.8	0.38
0.86	0.41
1	0.48
1.24	0.59
4.92	2.35

12 stations / véhicule 60m / Moyenne

FI10;De4500	FI22;De10625	FI22;De16875	FI47;De10625	FI47;De16875
15.43	11.01	12.13	5.15	5.68
6.44	4.60	5.06	2.15	2.37
9.18	6.55	7.22	3.07	3.38
4.15	2.96	3.26	1.39	1.53
1.75	1.25	1.38	0.58	0.64
1.19	0.85	0.94	0.40	0.44
1.09	0.78	0.86	0.36	0.40
4.01	2.86	3.15	1.34	1.48
1.57	1.12	1.23	0.52	0.58
4.65	3.32	3.66	1.55	1.71
2.76	1.97	2.17	0.92	1.02
5.58	3.98	4.39	1.86	2.05

12 stations / véhicule 60m / Ecartype

FI10;De4500	FI22;De10625	FI22;De16875	FI47;De10625	FI47;De16875
3.87	2.76	3.04	1.29	1.42
2.76	1.97	2.17	0.92	1.02
3.75	2.68	2.95	1.25	1.38
1.62	1.16	1.27	0.54	0.60
1.34	0.96	1.05	0.45	0.49
0.38	0.27	0.30	0.13	0.14
0.5	0.36	0.39	0.17	0.18
1.72	1.23	1.35	0.57	0.63
1.02	0.73	0.80	0.34	0.38
1.66	1.18	1.31	0.55	0.61
2.24	1.60	1.76	0.75	0.82
4.92	3.51	3.87	1.64	1.81

8.3 Etude du cas de l'autobus en site propre

8.3.4 Description des facteurs

Le type de prise en compte des véhicules aux feux est défini à 3 niveaux, on a calculé les offsets pour les différents niveaux de vitesse de consigne dans les tableaux 4.1 à 4.5 suivants :

Offsets pour onde verte (60)			
11 Feux	Vde = 11,3 m/s	Vde = 16,6 m/s	Vde = 6 m/s
Offset 1	30	20	56
Offset 2	5	44	2
Offset 3	44	11	19
Offset 4	26	39	35
Offset 5	23	18	22
Offset 6	20	57	10
Offset 7	21	39	5
Offset 8	26	23	7
Offset 9	34	9	14
Offset 10	44	57	28
Offset 11	19	1	25

Offsets pour onde verte (90)		
17 Feux	Vde = 8,65 m/s	Vde = 13,9 m/s
Offset 1	45	28
Offset 2	72	45
Offset 3	16	66
Offset 4	57	1
Offset 5	88	11
Offset 6	42	48
Offset 7	88	77
Offset 8	49	18
Offset 9	5	47
Offset 10	60	81
Offset 11	22	24
Offset 12	78	58
Offset 13	47	6
Offset 14	16	42
Offset 15	76	80
Offset 16	47	27
Offset 17	21	67

Offsets pour onde verte (90)		
8 Feux	Vde = 8,65 m/s	Vde = 13,9 m/s
Offset 1	89	55
Offset 2	85	19
Offset 3	1	79
Offset 4	18	55
Offset 5	30	29
Offset 6	54	9
Offset 7	76	80
Offset 8	21	67

Offsets pour onde verte (60)	
34 Feux	Vde = 11,3 m/s
Offset 1	10
Offset 2	22
Offset 3	34
Offset 4	46
Offset 5	59
Offset 6	12
Offset 7	25
Offset 8	39
Offset 9	55
Offset 10	12
Offset 11	29
Offset 12	46
Offset 13	3
Offset 14	20
Offset 15	37
Offset 16	55
Offset 17	14
Offset 18	34
Offset 19	50
Offset 20	7
Offset 21	27
Offset 22	48
Offset 23	8
Offset 24	26
Offset 25	48
Offset 26	10
Offset 27	31
Offset 28	54
Offset 29	16
Offset 30	38
Offset 31	1
Offset 32	24
Offset 33	50
Offset 34	19

Offsets pour onde verte (60)	
7 Feux	Vde = 11,3 m/s
Offset 1	20
Offset 2	42
Offset 3	7
Offset 4	31
Offset 5	3
Offset 6	32
Offset 7	19

8.3.5 Définition du Plan d'expériences utilisé

Matrice de l'expérimentation

MATRICE DE L'EXPERIMENTATION									
Trait	Flux veh	Tmor (s)	Tmon (s)	Dem unites	Vde (m/s)	Dst (m)	Dfeu (m)	Tveh	Tfeu
1	250	17.5	2.75	16250	11.3	450	600	a.c.c.	a.ov(60)
2	200	11.25	2.13	11875	8.65	525	800	a.c.i.	a.ov(90)
3	300	11.25	2.13	11875	8.65	525	400	s.c.o.	s.ov(90)
4	200	23.75	2.13	11875	8.65	375	800	s.c.o.	s.ov(90)
5	300	23.75	2.13	11875	8.65	375	400	a.c.i.	a.ov(90)
6	200	11.25	3.38	11875	8.65	375	400	a.c.i.	s.ov(90)
7	300	11.25	3.38	11875	8.65	375	800	s.c.o.	a.ov(90)
8	200	23.75	3.38	11875	8.65	525	400	s.c.o.	a.ov(90)
9	300	23.75	3.38	11875	8.65	525	800	a.c.i.	s.ov(90)
10	200	11.25	2.13	20625	8.65	375	400	s.c.o.	a.ov(90)
11	300	11.25	2.13	20625	8.65	375	800	a.c.i.	s.ov(90)
12	200	23.75	2.13	20625	8.65	525	400	a.c.i.	s.ov(90)
13	300	23.75	2.13	20625	8.65	525	800	s.c.o.	a.ov(90)
14	200	11.25	3.38	20625	8.65	525	800	s.c.o.	s.ov(90)
15	300	11.25	3.38	20625	8.65	525	400	a.c.i.	a.ov(90)
16	200	23.75	3.38	20625	8.65	375	800	a.c.i.	a.ov(90)
17	300	23.75	3.38	20625	8.65	375	400	s.c.o.	s.ov(90)
18	200	11.25	2.13	11875	13.9	375	400	s.c.o.	s.ov(90)
19	300	11.25	2.13	11875	13.9	375	800	a.c.i.	a.ov(90)
20	200	23.75	2.13	11875	13.9	525	400	a.c.i.	a.ov(90)
21	300	23.75	2.13	11875	13.9	525	800	s.c.o.	s.ov(90)
22	200	11.25	3.38	11875	13.9	525	800	s.c.o.	a.ov(90)
23	300	11.25	3.38	11875	13.9	525	400	a.c.i.	s.ov(90)
24	200	23.75	3.38	11875	13.9	375	800	a.c.i.	s.ov(90)
25	300	23.75	3.38	11875	13.9	375	400	s.c.o.	a.ov(90)
26	200	11.25	2.13	20625	13.9	525	800	a.c.i.	s.ov(90)
27	300	11.25	2.13	20625	13.9	525	400	s.c.o.	a.ov(90)
28	200	23.75	2.13	20625	13.9	375	800	s.c.o.	a.ov(90)
29	300	23.75	2.13	20625	13.9	375	400	a.c.i.	s.ov(90)
30	200	11.25	3.38	20625	13.9	375	400	a.c.i.	a.ov(90)
31	300	11.25	3.38	20625	13.9	375	800	s.c.o.	s.ov(90)
32	200	23.75	3.38	20625	13.9	525	400	s.c.o.	s.ov(90)
33	300	23.75	3.38	20625	13.9	525	800	a.c.i.	a.ov(90)
34	350	17.5	2.75	16250	11.3	450	600	a.c.c.	a.ov(60)
35	150	17.5	2.75	16250	11.3	450	600	a.c.c.	a.ov(60)
36	250	30	2.75	16250	11.3	450	600	a.c.c.	a.ov(60)
37	250	5	2.75	16250	11.3	450	600	a.c.c.	a.ov(60)
38	250	17.5	4	16250	11.3	450	600	a.c.c.	a.ov(60)
39	250	17.5	1.5	16250	11.3	450	600	a.c.c.	a.ov(60)
40	250	17.5	2.75	25000	11.3	450	600	a.c.c.	a.ov(60)
41	250	17.5	2.75	7500	11.3	450	600	a.c.c.	a.ov(60)
42	250	17.5	2.75	16250	16.6	450	600	a.c.c.	a.ov(60)
43	250	17.5	2.75	16250	6	450	600	a.c.c.	a.ov(60)
44	250	17.5	2.75	16250	11.3	600	600	a.c.c.	a.ov(60)

45	250	17.5	2.76	16250	11.3	300	600	a.c.c.	a.ov(60)
46	250	17.5	2.76	16250	11.3	450	1000	a.c.c.	a.ov(60)
47	250	17.5	2.76	16250	11.3	450	200	a.c.c.	a.ov(60)
48	250	17.5	2.76	16250	11.3	450	600	a.c.c.	a.ov(60)

8.3.5 Définition du Plan d'expériences utilisé

Les coordonnées respectives d'emplacement des feux et des stations, choisies aléatoirement pour chaque couloir sont rassemblées dans le tableau 3 suivant :

COULOIR 7		COULOIR 8		COULOIR 9	
23 Stations	11 Feux	15 Stations	7 Feux	15 Stations	34 Feux
250	335	200	900	220	117
540	700	500	1828	490	249
810	1180	820	2788	920	385
1110	1550	1200	3742	1200	524
1390	2290	1602	4783	1602	664
1680	2940	1952	5787	1972	809
1920	3630	2341	6990	2341	956
2200	4360	2753		2773	1119
2450	5125	3235		3235	1301
2680	5925	3707		3800	1487
2900	6990	4149		4119	1680
3140		4631		4721	1873
3410		5091		5071	2072
3715		5741		5741	2261
4030		6641		6641	2456
4330					2659
4660					2870
4995					3097
5350					3279
5720					3473
6090					3698
6480					3928
6900					4155
					4367
					4607
					4854
					5102
					5356
					5607
					5848
					6113
					6373
					6663
					6990

tableau 3

8.3.5 Définition du Plan d'expériences utilisé

Etablissement d'une distribution du nombre de montées dans chaque véhicule basée sur la distribution de la ligne de Farrapos (Porto Alegre) suivant les différentes valeurs des différents facteurs : nombre de stations, flux, demande et longueur du véhicule dans les tableaux 5.1 à 5.5 suivants :

Distribution du nombre de voyageurs qui monte dans chaque véhicule.														
15 STATIONS														
Fx = 250 ; De = 25000			Fx = 250 ; De = 18250			Fx = 150 ; De = 18250			Fx = 350 ; De = 18250			Fx = 250 ; De = 7500		
Moyenne	Ecart		Moyenne	Ecart		Moyenne	Ecart		Moyenne	Ecart		Moyenne	Ecart	
St1	8.54	2.3	2.45	1.50	4.08	2.49	2.49	1.07	2.75	2.59	1.07	2.56	0.69	
St2	8.04	2.3	2.83	1.50	4.72	2.49	2.49	1.07	2.59	2.59	1.07	2.41	0.69	
St3	7.5	2	2.53	1.30	4.22	2.17	2.17	0.93	1.05	1.05	0.93	2.25	0.60	
St4	9.15	2	4.95	1.30	8.25	2.17	2.17	0.93	2.25	2.25	0.93	2.75	0.60	
St5	8.3	1.5	6.10	0.98	10.17	1.63	1.63	0.70	4.93	4.93	0.70	2.49	0.45	
St6	6	1.5	5.25	0.98	8.75	1.63	1.63	0.70	6.32	6.32	0.70	1.80	0.45	
St7	4.23	1	3.45	0.65	5.75	1.08	1.08	0.46	4.04	4.04	0.46	1.27	0.30	
St8	4	1	4.30	0.65	7.17	1.08	1.08	0.46	4.93	4.93	0.46	1.20	0.30	
St9	4	1.5	4.95	0.98	8.25	1.63	1.63	0.70	3.54	3.54	0.70	1.20	0.45	
St10	3.38	1	3.55	0.65	5.92	1.08	1.08	0.46	2.54	2.54	0.46	1.01	0.30	
St11	4.32	1.5	4.16	0.98	6.93	1.63	1.63	0.70	2.97	2.97	0.70	1.30	0.45	
St12	6.62	1.5	3.65	0.98	6.08	1.63	1.63	0.70	2.61	2.61	0.70	1.99	0.45	
St13	8.54	2	5.55	1.30	9.25	2.17	2.17	0.93	3.97	3.97	0.93	2.56	0.60	
St14	7.57	2	4.92	1.30	8.20	2.17	2.17	0.93	3.51	3.51	0.93	2.27	0.60	
St15	10.2	2.3	6.63	1.50	11.05	2.49	2.49	1.07	4.74	4.74	1.07	3.06	0.69	

tableau 5.1

Distribution du nombre de voyageurs qui monte dans chaque vehicule.								
18 STATIONS								
Fx = 200 ; De = 11875		Fx = 300 ; De = 11875		Fx = 200 ; De = 20625		Fx = 300 ; De = 20625		
Moyenne	Ecart	Moyenne	Ecart	Moyenne	Ecart	Moyenne	Ecart	
St1	5.96	2	1.07	1.33	8.56	3.47	1.86	2.32
St2	4.20	1.5	1.47	1.00	9.03	2.61	1.72	1.74
St3	6.20	1.5	1.13	1.00	10.77	2.61	1.18	1.74
St4	2.70	1	1.80	0.67	7.69	1.74	2.13	1.16
St5	3.50	1.5	2.33	1.00	7.08	2.61	2.05	1.74
St6	4.20	1.5	3.13	1.00	6.56	2.61	3.71	1.74
St7	3.93	1	3.95	0.67	5.09	1.74	5.39	1.16
St8	3.92	1	3.95	0.67	5.07	1.74	5.38	1.16
St9	2.70	1	3.13	0.67	3.95	1.74	4.97	1.16
St10	1.51	1	2.01	0.67	2.62	1.74	4.75	1.16
St11	1.82	1	2.21	0.67	3.16	1.74	5.11	1.16
St12	2.10	1	2.40	0.67	3.65	1.74	4.00	1.16
St13	2.11	1	1.41	0.67	3.66	1.74	3.44	1.16
St14	2.84	1	1.89	0.67	4.93	1.74	3.29	1.16
St15	2.00	1	1.33	0.67	3.47	1.74	2.32	1.16
St16	2.50	1	1.67	0.67	4.34	1.74	2.89	1.16
St17	3.00	1.5	2.00	1.00	5.21	2.61	3.47	1.74
St18	4.07	1.5	2.71	1.00	7.07	2.61	4.71	1.74

tableau 5.2

Distribution du nombre de voyageurs qui monte dans chaque vehicule.								
13 STATIONS								
Fx = 200 ; De = 11875		Fx = 300 ; De = 11875		Fx = 200 ; De = 20625		Fx = 300 ; De = 20625		
Moyenne	Ecart	Moyenne	Ecart	Moyenne	Ecart	Moyenne	Ecart	
St1	7.96	2.3	3.31	1.53	7.04	3.99	3.69	2.66
St2	6.40	2	4.60	1.33	9.59	3.47	4.73	2.32
St3	5.20	1.5	5.47	1.00	10.03	2.61	6.02	1.74
St4	4.20	1.5	4.13	1.00	7.56	2.61	4.71	1.74
St5	5.93	1.5	4.29	1.00	9.56	2.61	7.71	1.74
St6	3.92	1	1.95	0.67	8.07	1.74	6.38	1.16
St7	3.19	1	1.46	0.67	5.80	1.74	5.54	1.16
St8	2.82	1	1.21	0.67	6.16	1.74	6.11	1.16
St9	3.10	1.2	2.07	0.80	8.38	2.08	4.59	1.39
St10	4.11	1.5	2.74	1.00	8.14	2.61	4.76	1.74
St11	2.84	1.5	1.89	1.00	5.93	2.61	3.29	1.74
St12	3.00	1.5	2.00	1.00	5.21	2.61	3.47	1.74
St13	6.57	1.5	4.38	1.00	11.41	2.61	7.61	1.74

tableau 5.3

23 STATIONS		
Fx = 250 ; Ds = 16250		
	Moyenne	Ecart
St1	4.3	2.3
St2	3.4	2
St3	4.2	2
St4	5	2
St5	5.2	2
St6	4.8	1.5
St7	5	2
St8	4.4	1.5
St9	2.2	1.5
St10	0.9	1.5
St11	0.8	1.5
St12	1.5	1.5
St13	1.2	1.5
St14	1.3	1.5
St15	1.4	1.5
St16	1.5	1.5
St17	1.9	1.5
St18	2.3	1.5
St19	1.3	1.5
St20	2.5	1.5
St21	2.5	1.5
St22	3.5	2
St23	4.3	2

tableau 5.4

11 STATIONS		
Fx = 250 ; Ds = 16250		
	Moyenne	Ecart
St1	7.3	2.3
St2	6.4	2.3
St3	8.2	2
St4	7.4	2
St5	5.1	2
St6	4.3	1.5
St7	4.9	1.5
St8	4.4	2
St9	5.6	2
St10	5.5	2
St11	6.3	2

tableau 5.5

