

LES PERFORMANCES D'EXPLOITATION DU MÉTRO LÉGER DE TUNIS

F. Kühn INRETS

F. Dutra Michel UFRGS

Résumé

L' INRETS a engagé un programme de recherche sur les potentialités des métros légers dans les villes en développement en liaison avec le TRL et l'Université Fédérale de Rio Grande do Sul (UFRGS): cette recherche s'appuie sur une synthèse de différentes expériences de métros légers en exploitation qui doit préciser en un premier temps les performances des technologies intermédiaires et notamment leur capacité en fonction des divers paramètres à identifier, dans un deuxième temps, cette recherche vise à une évaluation comparative de la technologie tramway avec les autres options technologiques de transport de masse (autobus en site propre et métro).

Dans le cadre d'un protocole de coopération entre la France et la Tunisie, l'INRETS et la SMLT ont engagé une étude d'évaluation a posteriori du métro léger de Tunis dont l' analyse technico-économique des performances a débuté en 1992 sous la forme d'une étude en coopération.

La SMLT exploite le réseau de métro léger de Tunis, en extension constante depuis 1985, comportant actuellement 4 lignes d'un linéaire total de 30 km.

Présentation de l'étude

Cette étude porte sur les performances du métro léger de Tunis et les paramètres suivants:

- la vitesse commerciale
- le temps de circulation entre arrêts
- la fréquence d'exploitation
- la distance entre arrêts
- les conditions de trafic
- les temps d'arrêts
- la capacité offerte.

Après avoir effectué de nombreux comptages, définis les tronçons les plus chargés du réseau, nous avons décidé de simuler l'exploitation du métro léger sur 2 tronçons, l'un entre les stations Ouardia et Barcelone sur la ligne 1, l'autre entre les stations Ariana et Mandela sur la ligne 2: la simulation se faisant dans le sens le plus chargé à l'heure de pointe du matin.

Cette simulation nous a permis d'évaluer l'incidence d'une réduction du temps mort et donc du temps d'arrêt en station sur la vitesse commerciale et de l'augmentation de la vitesse de consigne sur la vitesse commerciale.

Le réseau de métro léger de Tunis

Le réseau prioritaire

Le réseau actuel du métro léger de Tunis est constitué de 4 lignes formant un réseau en "Y" d'une longueur d'axes d'environ 30 km.

Les trois branches de l'Y correspondent aux axes préférentiels d'une urbanisation dense, elles sont orientées:

- vers le Sud : Kabaria et Ben Arous.
- vers le Nord : El Menzah et Ariana.
- vers l'Ouest : Le Bardo, Den Den et Ibn Khaldoun.

Le tronçon central, constitué d'une boucle à voie unique, traverse l'hypercentre et assure la liaison entre le noeud principal du réseau (station République) et la Gare SNCFT située à la Place de Barcelone.

Ces simulations nous permettent d'estimer les limites de capacité du réseau dans le cas où aucun travaux d'amélioration n'est effectué et dans le cas où des travaux de protection complémentaire du site sont effectués.

La ligne sud ou ligne N°1 suit l'axe orienté sud - nord, relie la banlieue sud de Ben Arous, en passant par le centre à la station de correspondance de Barcelone située près de la gare centrale des chemins de fer (SNCFT), au terminus de Tunis Marine situé près de la gare du TGM, chemin de fer de banlieue exploité par la SMLT.

Le tronçon le plus chargé de cette ligne se situe entre la station Ouardia et la station Barcelone, il a été retenu pour l'étude de simulation des performances de la ligne sud.

La ligne nord ou ligne 2 suit l'axe orienté centre - nord, relie la banlieue nord d'Ariana au centre, le terminus actuel se situe à la station Barcelone. Le tronçon le plus chargé se situe entre la station Ariana et la station de correspondance République située au nord du centre : pour l'étude de simulation des performances de la ligne nord, nous avons retenu le tronçon situé entre Ariana et Mandéla.

La ligne ouest ou ligne 4 suit l'axe orienté centre - ouest, relie provisoirement le quartier du Bardo à l'ouest de la Médina en passant par la station République, au terminus de Tunis Marine. Le tronçon le plus chargé se situe entre les stations Bab Saadoun et République : ce tronçon est aussi emprunté par la ligne 3.

La ligne nord ouest ou ligne 3 suit l'axe précédent de Barcelone à Bab Saadoun, puis s'oriente vers le nord jusqu'au terminus d'El Intilaka : le tronçon le plus chargé se situe entre les stations République et Bab Saadoun.

Ces deux dernières lignes ne font pas l'objet de la présente étude de simulation des performances, la ligne 4 étant partiellement exploitée jusqu'à la place du Bardo en attendant l'achèvement des travaux du souterrain sous la Place qui permettront de relier les stations actuellement exploitées en terminus provisoires de Bouchacha et 20 Mars, au terminus ouest de Den Den.

L'exploitation

Le Schéma d'exploitation

- Ligne 1 ou ligne Sud : Tunis Marine - Ben Arous.

A l'heure de pointe, en banlieue Sud entre le terminus Ben Arous et Ouardia 6 circulent 5 rames par heure et par sens, entre Ourdia 6 et Place de Barcelone 15 rames à l'heure, puis entre la Place de Barcelone et le Terminus Tunis Marine 5 rames à l'heure.

- Ligne 2 ou ligne Nord : Ariana - Place de Barcelone

A l'heure de pointe, entre le terminus Ariana situé en banlieue Nord et la station de correspondance République, circulent 10 rames à l'heure, entre la station République et Barcelone circulent 6 rames : 4 rames à l'heure rebroussent à la station République.

- Ligne 3 ou ligne Nord-Ouest : Intilaka - Place de Barcelone

A l'heure de pointe, entre le terminus Intilaka et la station Ibn Khaldoun circulent 8 rames par heure et par sens, entre la station Ibn Khaldoun et la station Bab Saadoun 11 rames par heure et par sens, entre Bab Saadoun et République 18 rames à l'heure par sens (avec 7 rames de la ligne 4), au delà de la station République les 11 rames de la ligne 3 circulent sur la boucle centrale jusqu'au terminus de la Place de Barcelone.

- Ligne 4 ou ligne Ouest : 20 Mars - Tunis Marine

A l'heure de pointe, en banlieue ouest entre le terminus 20 Mars et Bab Saadoun circulent 7 rames par heure et par sens, au delà s'ajoutent les 11 rames qui arrivent de Intilaka et Ibn Khaldoun soit 18 rames jusqu'à la station République puis 7 rames jusqu'au terminus de Tunis Marine.

En résumé, l'offre par ligne peut s'écrire:

- Ligne Sud ou ligne 1 : l'offre entre la place de Barcelone et Ouardia 6 est de 15 rames par sens à l'heure de pointe soit un intervalle de 4 mn. Au delà de Ouardia jusqu'à Ben Arous et au

delà de la place de Barcelone jusqu'à Tunis Marine l'offre est de 5 rames par sens à l'heure de pointe soit un intervalle de 12 mn.

Une rame de 2 véhicules offre 572 places (6 pas./m²) ou 728 (8 pas./m²): l'offre sur cette ligne se situe à l'heure de pointe entre 8 580 places et 10 920 places.

- **Ligne Nord ou ligne 2 :** l'offre entre le terminus Ariana et la station République est de 10 rames à l'heure de pointe par sens soit un intervalle de 6 mn. Entre la station République et la place de Barcelone l'offre est de 6 rames par sens à l'heure de pointe soit un intervalle de 10 mn.

L'offre sur cette ligne se situe entre 5 720 places et 7 280 places.

- **Ligne Nord Ouest ou ligne 3 :** l'offre entre le terminus Intilaka et Ibn Khaldoun est de 8 rames à l'heure de pointe par sens soit un intervalle de 7,5 mn: elle se situe entre 4 576 places et 5 824 places; entre Ibn Khaldoun et Bab Saadoun l'offre est de 11 rames et se situe entre 6 292 places et 8 008 places soit un intervalle de 5,45 mn; entre Bab Saadoun et République l'offre est de 18 rames et se situe entre 10 296 places 13 104 places soit un intervalle de 3,33 mn.

- **Ligne Ouest ou ligne 4 :** l'offre entre le terminus 20 Mars et Bab Saadoun est de 7 rames par sens à l'heure de pointe soit un intervalle de passage de 8,57 mn, l'offre se situe entre 4004 places et 5096 places; au delà de Bab Saadoun ces rames s'ajoutent aux rames de la ligne Nord Ouest jusqu'à République. Au delà de la station République ces 7 rames empruntent la boucle centrale jusqu'au "triangle Hached" puis se dirigent vers Tunis Marine tandis que les 11 rames de la ligne Nord Ouest circulent sur la boucle centrale jusqu'au terminus de la Place de Barcelone .

Au niveau de la boucle centrale, le flux de rames en provenance de République, circulant dans la rue de Paris est de 24 rames à l'heure de pointe soit un intervalle de 150 secondes.

Ce nombre de rames se partage en 6 rames (ligne 2) et 11 rames (ligne 3) se dirigeant vers la place de Barcelone et 7 rames (ligne 4) se dirigeant vers Tunis Marine.

Au bout de la rue de Paris on trouve le triangle Hached-Carthage sur lequel passent les différentes lignes 2, 4, 3, et 1. Les 24 rames en provenance de République se répartissent entre la direction de la place de Barcelone (lignes 2 et 3) et la direction de Tunis-Marine (ligne 4).

Les rames de la ligne 1 en provenance de la place de Barcelone et se dirigeant vers Tunis-Marine et inversement passent aussi dans ce carrefour soit (10 rames) ainsi que 7 rames de la ligne 4 en provenance de Tunis-Marine et se dirigeant vers la place de Barcelone. Il y a 41 rames qui passent dans ce carrefour à l'heure de pointe soit un intervalle de passage dans le carrefour de 87,8 secondes.

La mise en service des antennes de Den Den et d'Ibn Khaldoun vont entraîner une évolution du trafic à court terme. En effet, l'antenne Bab Saadoun - Den Den sera desservie par 10 rames/h/sens (7 actuel.), l'antenne d'Intilaka par 10 rames (8 actuel.), l'antenne d'Ibn Khaldoun par 5 rames, ce qui porte le nombre de passages entre Ibn Khaldoun et Bab Saadoun à 15, entre

Bab Saadoun et République à 25. La desserte de l'Ariana par la ligne 2 reste inchangée, le nombre de rames circulant sur la boucle centrale est porté à 31(24 actuel.).

Au niveau du "triangle Hached", les 31 rames venant de la station République circulant sur la boucle centrale se répartiront en 15 rames L3 allant à Barcelone, 10 rames L4 allant à Tunis Marine et 6 rames L2 allant à Barcelone. Ce carrefour sera aussi sollicité par les rames de L1 venant de Barcelone et allant à Tunis Marine soit 5 rames/h/sens, le retour des 5 rames L1 et des 10 rames L4 venant de Tunis Marine et se dirigeant vers Barcelone. C'est donc 51rames/h/sens qui passeront dans le carrefour "triangle Hached" soit un intervalle moyen de passage de 70,58 secondes.

Ce niveau d'offre devrait entraîner une congestion du trafic au niveau du triangle Hached-Carthage aux heures de pointe avec 51 passages de rames contre 41 passages actuellement, en dehors des sorties et rentrées au dépôt situé à Tunis-Marine si un système de régulation des rames qui se présentent dans ce carrefour n'est pas mis en place à court terme.

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 différencierées 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.

Ces véhicules d'abord au nombre de 78, sont complétés par une commande de 43 véhicules qui est en cours de livraison.

La capacité unitaire d'un élément est de 286 places dont 52 assises (6 voy/m^2) ou 364 places (8 voy/m^2), 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 17 472 places (21 rames).

La simulation de l'exploitation d'une ligne de métro avec le modèle Busway

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 et possède une interface 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 de 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 effectué 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 échantillonées 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.

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 peloton 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.

Caractéristiques du modèle Busway

Le but de ce modèle est de prendre les informations concernant l'agencement physique du tronçon et d'engendrer individuellement des véhicules en leur attribuant les caractéristiques de distribution de trafic. Les paramètres d'entrée, dans la majorité des cas, ont été obtenus à partir d'observations effectuées sur site.

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 tant dans les conditions géométriques de la voie (par exemple, étudier la distance entre feux ou entre stations), que dans les conditions de contrôle de feux (priorité au métro léger dans les intersections), dans les

conditions de montée/descente (par exemple, l'influence de la différence de niveau entre le véhicule et le quai de la station), ainsi que dans les conditions de trafic.

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).

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

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.

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.

À 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, 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.

Validation du modèle Busway

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 et la ligne nord 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.

Conclusion

Les plans d'expériences effectués pour simuler l'exploitation des lignes sud et nord nous ont permis d'évaluer le gain encore possible de vitesse commerciale et d'estimer la limite de capacité de ces lignes au delà de laquelle les conditions d'exploitation ne sont plus acceptables d'une part pour la qualité du service aux usagers, d'autre part pour la bonne gestion de l'exploitant.

Dans cette étude, on ne retiendra pas la précision des résultats car la simulation et le modèle ont leurs limites notamment en ce qui concerne les hypothèses sur le temps d'arrêt en station (temps de montée fixe par passagers, distribution du nombre de passagers qui monte ramenée à une porte), la logique des feux introduite qui ne reflète pas complètement la réalité, il n'y a pas de possibilité d'ajouter une branche sur le tronçon simulé, etc.

La validation de la simulation de l'exploitation du tronçon de la ligne sud et de la ligne nord montre que la simulation s'approche néanmoins de la réalité (cf § 4.7a f et 4.7b f), les résultats de la simulation et de la réalité ont des valeurs similaires en moyenne mais il y a des différences au niveau des écarts types, la simulation donnant des écarts types plus faibles c'est à dire une situation optimiste de l'exploitation. Par contre les différents résultats obtenus nous montrent comment évolue les performances du système notamment la vitesse commerciale en fonction des différents facteurs, nous signalent l'apparition de queue et la saturation future d'une ligne lorsqu'on augmente le nombre de rames et la demande correspondante.

La vitesse commerciale

Sur la ligne sud la valeur de chaque facteur intervenant (vitesse, flux, demande, temps de montée et temps mort) a été choisie de manière à être effectivement appliquée dans un avenir proche.

La vitesse de consigne pondérée qui est actuellement de 7,8 m/s ou 28,08 km/h est augmentée de 18,5% soit 9,25 m/s ou 33,3 km/h. Cette vitesse pourra être obtenue en limitant les conflits en priorité sur les longues interstations.

L'augmentation du nombre de rames de 33,3%, c'est à dire baisser l'intervalle de 4 à 3 mn est réalisable si le parc le permet et si une régulation est mise en place.

L'augmentation de la demande de 50% par rapport à la valeur actuelle est possible avec l'accroissement de l'urbanisation, le prolongement vers El Mourouj et l'attractivité que va entraîner l'amélioration de la qualité de service offerte par le métro léger.

Le temps moyen de montée qui est de 2,3 sec. actuellement peut diminuer de 13% en réorganisant les montées - descentes au droit de chaque porte sur les quais de station.

Le temps mort qui est actuellement en moyenne de 20,31 sec. pourrait être diminué de 50% soit un temps mort de 10,15 sec.niveau qui pourrait être obtenu par la mise en application de nouvelles mesures (formation des conducteurs, organisation, information des usagers,etc.).

Pour les 32 combinaisons possibles des facteurs de ce plan d'expériences nous avons obtenu une moyenne de la vitesse commerciale de 18,74 km/h variant de 16,1 à 21,6 km/h. La combinaison qui représente l'exploitation actuelle avec les facteurs vitesse, flux et demande au niveau actuel (-1) et les facteurs temps de montée et temps mort au niveau futur (+1) a donné une vitesse commerciale moyenne de 17,3 km/h.

Si dans un avenir proche les facteurs vitesse, temps mort et temps de montée changent de niveau, les facteurs demande et flux restant inchangés, on obtient un accroissement de la **vitesse commerciale de 3,91 km/h. soit 22,6%** de la vitesse commerciale actuelle.

De la même façon si nous faisons le calcul pour la ligne nord :

La valeur des facteurs vitesse, flux, et temps de montée est identique à celle des facteurs de la ligne sud. Le temps mort qui est actuellement en moyenne de 13,86 sec. pourrait être diminué de 54,6% soit un temps mort de 6,29 sec..

Pour les 32 combinaisons possibles des facteurs de ce plan d'expériences nous avons obtenu une moyenne de la vitesse commerciale de 19,82 km/h variant de 17,5 à 22,4 km/h. La combinaison qui représente l'exploitation actuelle avec les facteurs vitesse, flux et demande au niveau actuel (-1) et les facteurs temps de montée et temps mort au niveau futur (+1) a donné une vitesse commerciale moyenne de 18,1 km/h.

Si dans un avenir proche les facteurs vitesse, temps mort et temps de montée changent de niveau, les facteurs demande et flux restant inchangés, on obtient un accroissement de **la vitesse commerciale de 4,15 km/h. soit 22,9%** de la vitesse commerciale actuelle.

Si on se projette dans l'avenir, après avoir effectué un certain nombre de modifications, un accroissement de 30% de la vitesse désirée (18,5% à court terme) couplé à une réduction du temps d'arrêt de 50% (31,47% à court terme) peuvent augmenter **la vitesse commerciale de 34% sur la ligne sud et 32% sur la ligne nord**.

La capacité des lignes sud et nord

L'analyse de la limite de la capacité à partir de la vitesse commerciale et du phénomène de queue pour la ligne sud montre que dès que l'on augmente le flux de 15 à 20 rames/h il y a baisse de la vitesse commerciale de 0,84 km/h et l'apparition d'une queue d'une rame dans 5 stations sur 8. Si on compare la vitesse commerciale avec le rapport Flux S/E (Flux de sortie estimé/Flux d'entrée connu) pour un flux de 30 rames/h (16 848 pas./h/sens) le graphe 2 montre qu'il y a une grande variation de la VECO de 1,93 km/h et un début de perturbation (3 rames en attente à Ibn Sina et une rame en attente dans 4 stations sur 8), le Flux S/E se situant de part et d'autre de la valeur 1.

La même analyse pour la ligne nord montre que lorsque le flux augmente de 5 à 25 rames il n'y a pas de variation sensible de la vitesse commerciale qui est d'environ 18,2 km/h. Pour un flux de 30 rames/h (13 440 pas/h/sens) nous constatons un phénomène de queue de 1 rame maximum en attente pour accéder à la station voisine (pour 5 stations sur 11 dans le cas d'une bonne régulation).

Si on compare la vitesse commerciale avec le rapport Flux S/E pour un flux de 30 rames/h, le graphe 7 montre qu'il n'y a pas une grande variation de la vitesse commerciale (1,5 km/h) mais il y a une variation de l'estimation du rapport Flux S/E se situant de part et d'autre de la valeur 1: c'est le début de la perturbation. Cette perturbation est moins importante que sur la ligne sud car pour le même nombre de rames à l'heure, le niveau de demande est de 16 848 pas./h/sens sur la ligne sud et de 13 440 pas./h/sens sur la ligne nord ce qui engendre des temps d'arrêt différents en station.

En définitive, les différentes simulations de l'exploitation des tronçons les plus chargés des lignes sud et nord montrent qu'il est encore possible d'obtenir des gains de vitesse commerciale, de régularité (réduction des écarts types), que ces tronçons ne sont pas saturés car on pourrait doubler le nombre de rames à l'HP sur la ligne sud et le tripler à l'HP sur la ligne nord.

A court terme, avec une amélioration de la vitesse de consigne de 18,6%, une réduction du temps d'arrêt en station de 31,5% on obtiendrait un gain de vitesse commerciale de l'ordre de 20% ce qui est non négligeable en coût d'exploitation; les mesures à prendre étant effectuées d'abord au niveau de l'information des usagers et des conducteurs, au niveau de l'organisation des échanges en station et de la protection du site pour les interstations les plus longues.

Ce gain pourrait être porté à plus de 30% avec une augmentation de la vitesse de consigne de 30%, une diminution du temps d'arrêt de 50% par rapport à la situation actuelle, à moyen terme.

Ces mesures étant progressivement étendues à l'ensemble du réseau, permettraient un important gain de capacité en véhicule X km et donc un gain en coût d'investissement et d'exploitation.

BIBLIOGRAPHIE

- BONZ M. (1983) Insertion et réalisation de l'infrastructure des métros légers dans le tissu urbain, 45e Congrès International Rio de Janeiro commission 7.
- BOUKHRIS, T. (1992) Schéma d'exploitation du réseau de métro léger de Tunis.
- 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.
- GARDNER G. , KUHN F., RUTTER J..(Project Report PR LRT V4 1993), The performance and potential of light rail transit in Developing Cities. TRL.
- GIPPS, P.G. (1981) A behavioural car-following model for computer simulation. Transportation Research, 15B.
- GHANDRI S. (1993) Un modèle de simulation pour le métro léger de Tunis, rapport de stage effectué à l'INRETS-CRESTA, INRETS-SMLT 93.
- GLAYRE P. (1987) Régulation des conflits rail-route sur le métro léger de Tunis, dans TEC N°81, Paris.
- HUG, (1985) Vitesse de circulation des rames ligne sud, note de SETEC - SOTUETEC.
- 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.
- NANNI L. & RIBEIRO J.L., (1992) Planejamento e Avaliação de Experimentos 2a. edição UFRGS
- SIMOES, L.O.(1993) Tramway * Busway, rapport de stage de DESS d'Ingénierie et numérique Université de Lille I effectué à l'INRETS - CRESTA.
- SMLT, (1992) Règlement Interne de Circulation des Métros.
- TRB, Special Report N°209 Highway Capacity Manual, chapter 12 Transit capacity.
- UITP (1989) Orientations des Métros légers, thèses et thèmes, Commission des Métros légers, Bruxelles.
- BEN YOUSSEF C. (1993) Schéma d'exploitation du réseau de métro léger de Tunis.

