

L'intérêt de la voie unique dans une ville moyenne

Suite aux réflexions menées au sein du PRDTTT (Programme de Recherche et de Développement Technologique dans les Transports Terrestres) en 1989, le groupe de travail "Transports Automatiques Légers" avait retenu l'idée de trouver un moyen de déplacer rapidement des personnes dans des zones de dimension et de densité moyenne. C'est ainsi que l'utilisation de la voie unique avait été évoquée pour la desserte de villes moyennes, pour la traversée de zones vertes ou d'obstacles naturels, mais également pour le rabattement sur des réseaux d'armature dans la périphérie des grandes villes. Il restait à en démontrer la faisabilité technique et financière, c'est dans ce cadre qu'a été menée l'étude VULCAIN.

Les métros conventionnels ne sont pas bien adaptés à la desserte des villes moyennes et de la périphérie des très grandes villes, sites qui peuvent se satisfaire de systèmes de transport plus légers et d'une moindre capacité. Les systèmes utilisant de la voie unique font partie de cette famille, et en particulier, le métro automatique exploité en site propre intégral et le tramway en site partagé peuvent répondre à de tels besoins.

A la demande du SERT (Service des Etudes, de la Recherche et de la Technologie du Ministère de l'Équipement, du Logement, des Transports et de l'Espace), l'INRETS-CRESTA (Institut National de Recherche sur les Transports et leur sécurité), la METRAM (Société d'Ingénierie des Transports Urbains de Lyon) et le CETU (Centre d'Etude des Tunnels) ont achevé en 1992 une étude appelée VULCAIN (Voie Unique pour Ligne Complémentaire à Automatisme Intégral).

L'étude VULCAIN avait pour objectif la comparaison entre un système de métro automatique à voie double et un système à voie unique, dans le domaine de l'exploitation, mais également de l'évaluation des coûts d'investissement d'infrastructure et de système. Cet article en reprend quelques résultats complétés par une approche tramway.

La première partie présente une étude bibliographique sur les systèmes de transport utilisant de la voie unique ainsi que les aspects exploitation d'une



Facilité d'insertion de la voie unique. (Tsol Lausanne)

telle ligne. La deuxième partie met l'accent sur la comparaison entre un système à voie double et un système à voie unique en matière de coûts d'infrastructure. La troisième partie présente ce que nous avons appelé un AP2S (Avant Projet Sommaire Simplifié) pour un éventuel projet VULCAIN à réaliser dans la ville du Havre.

L'évaluation financière proposée permet la comparaison d'investissements pour la mise en œuvre de deux systèmes en site propre utilisant l'automatisme intégral et l'automatisme avec conducteur, ainsi que d'un système en site banalisé, le tramway.

LA VOIE UNIQUE

Etude bibliographique

Cette étude bibliographique, qui a pour but la recherche, dans le monde, des systèmes de transport automatiques ou en conduite manuelle, circulant sur une voie unique partielle ou intégrale, ne tient pas compte des liaisons interurbaines de type SNCF.

Afin de mieux cibler les capacités et les fréquences de tels systèmes, nous avons réalisé des regroupements suivant leurs spécificités : systèmes automatiques ou en conduite manuelle, systèmes circulant en boucle (dont le

monorail), systèmes exploités en navette, systèmes comportant des portions de voie unique.

Le tableau ci-après présente la synthèse de cette recherche bibliographique qui ne se veut pas exhaustive.

Ainsi, trente quatre systèmes ont été répertoriés dans le monde, ils totalisent 85 kilomètres de voie unique sur une longueur totale de lignes de 100 kilomètres en exploitation automatique (soit 85 %) et 96 kilomètres de voie unique sur une longueur totale de lignes de 224 kilomètres en mode manuel (soit 42 %).

des interstations varie entre 300 mètres et 1 100 mètres.

Le métro léger appelé TSOL parcourt en 19 minutes la distance entre Flon et Renens CFF en empruntant de nombreux ouvrages d'art (tunnel, tranchée couverte et six ponts), l'intervalle étant de 10 minutes avec une possibilité à 7,5 minutes.

La particularité de ces lignes est le nombre important de passages à niveau sur le tracé : 9 dont 4 avec barrières automatiques à Neuchâtel et 17 dont 13 avec barrières automatiques à Lausanne.

appareils de voie situés de part et d'autre de la station permettant le branchement de la voie double à la voie unique.

Le fonctionnement du système impose donc une attente mutuelle des rames dans une station, en effet, le véhicule devant quitter la station doit attendre la rame venant en sens inverse. Ainsi le temps d'attente est maximum pour la rame qui attend le véhicule parcourant l'interstation la plus longue, notons T_m ce temps. Pour assurer un flux nominal du système et éviter les attentes prolongées dues à une accumulation de

| TYPE | AUTOMATIQUE | | | MANUEL | | |
|------------------------|-------------|---------------|------------------------|---|---------------|------------|
| | Nbre | Implantation | Longueur | Nbre | Implantation | Longueur |
| Boucle | 5 | Parc loisirs | 1,4 à 22 km | 2 | Milieu Urbain | |
| | 2 | Aéroport | 1,1 à 1,8 km | | | |
| | 3 | Milieu Urbain | 3,2 à 4,6 km | | | |
| Navette | 2 | Aéroport | 0,6 à 2,2 km | 5 | Milieu Urbain | |
| | 8 | Milieu Urbain | 0,3 à 4,5 km | | | |
| Portion de voie unique | 1 | Milieu Urbain | 3,5/6,4 km (boucle) | (les 5 réseaux totalisent 197 km dont 35 % de voie unique en moyenne) | Milieu Urbain | |
| | 1 | Milieu Urbain | 2,5/15 km (extrémités) | | | |
| Voie unique intégral | 1 | Aéroport | 20,9 km | 4 | Milieu Urbain | 2,9 à 8 km |

Nota : X km de voie unique / Y longueur totale des lignes ou des réseaux

Ces chiffres font apparaître que beaucoup de petits systèmes automatiques font appel à la voie unique, essentiellement dans certains sites particuliers tels que les aéroports et les parcs de loisirs, mais la voie unique est globalement assez peu utilisée dans les systèmes de transport urbain.

Les systèmes exploités en mode manuel et utilisant la voie unique sont relativement peu nombreux et sont pour la grande majorité des tramways. Parmi les quatre lignes utilisant de la voie unique intégrale, deux sont situées au Japon, deux le sont en Europe et se situent dans les villes suisses de Neuchâtel et de Lausanne.

La ligne n° 5 de Neuchâtel (Neuchâtel Centre-Boudry) a une longueur de 9 kilomètres et comporte 12 stations. La vitesse commerciale y est de 27 km/h avec un intervalle de 15 minutes qui pourrait atteindre 10 minutes en déplaçant un point de croisement.

Quant à la ligne de Lausanne, elle a été ouverte en 1991, elle s'étire sur 7,8 kilomètres et comporte 15 stations dont 12 en voie double. La longueur

Afin d'assurer la sécurité, un système de block automatique, qui comprend un dispositif d'arrêt automatique des trains en cas de franchissement d'un feu rouge, équipe les deux lignes à voie unique.

Exploitation

Le système à voie unique, que nous appellerons système VULCAIN, est un moyen de transport en commun, soit en site propre à conduite automatique intégrale ou à conduite automatique avec conducteur, soit en site banalisé à conduite manuelle qui assure un service omnibus. Sa particularité est donc de fonctionner en voie unique avec le croisement des rames en stations.

Il doit permettre d'écouler en charge normale des trafics inférieurs à 8 000 passagers par heure et par sens. Le fonctionnement en voie unique consiste à faire rouler les véhicules dans les deux sens sur une seule voie, le croisement étant réalisé au droit des stations par dédoublement de la voie. Un tel fonctionnement nécessite deux

rames, l'ensemble des véhicules doit s'asservir sur une horloge de période T_m . Ainsi T_m peut être considéré comme le cycle de base du fonctionnement de VULCAIN et permet de déterminer le meilleur intervalle sur la ligne en voie unique.

Le fonctionnement de la voie unique reposant sur le croisement des rames en station, à un instant donné toutes les rames se trouvent en interstation. C'est pourquoi, le nombre maximum de rames supportées par une ligne à voie unique en fonctionnement nominal est égal au nombre d'interstations. Si le nombre de véhicules est augmenté, il est constaté une augmentation de leur temps d'attente et par conséquent une diminution de l'intervalle moyen.

Le cycle de base étant fixé par le temps de parcours de l'interstation la plus longue et la capacité maximale de rames étant limitée par le nombre d'interstations, VULCAIN est donc un système de transport dont le plus petit intervalle entre rames est imposé par le tracé de la ligne. Le nombre de stations et la distance entre les stations impo-

sent donc, de manière immuable, la meilleure fréquence.

C'est pourquoi, pour faire face à l'augmentation de trafic à long terme, une exploitation en rames doubles ou avec des trains de longueurs variables est envisageable. Il est à noter que, dans cette étude, le dimensionnement de l'infrastructure des stations tient compte de cette évolution.

Le schéma "Exemple de fonctionnement d'une ligne à voie unique" permet de mieux cerner le fonctionnement d'une ligne à voie unique. Il s'agit d'une ligne VULCAIN idéale à stations équidistantes et à temps d'arrêt en station égaux. En conséquence, les rames quittent les stations et y arrivent avec une parfaite synchronisation. (figure 1).

En heures creuses, le nombre de véhicules peut être inférieur au nombre d'interstations, ce qui aura pour effet d'augmenter l'intervalle par multiple de cycles. C'est pourquoi, dans certaines configurations, le système ne peut pas proposer aux utilisateurs des intervalles réguliers. En conséquence, il paraît intéressant de mettre en œuvre une signalétique voyageur qui puisse comporter l'heure d'arrivée de la prochaine rame.

Le fonctionnement nominal du système VULCAIN est caractérisé par un débit maximal et un intervalle minimum. Pour cela, le système de régulation de trafic ou d'aide à l'exploitation doit faire respecter aux rames le cycle de base pour assurer leur croisement en station, tout en tenant compte des spécificités de la ligne.

En effet, les stations n'étant pas équidistantes, les temps de parcours des interstations diffèrent, de plus, les temps d'arrêt en station varient selon le volume d'échange de voyageurs. Enfin, un écart trop important entre ces différents paramètres provoquerait des temps d'attente trop élevés.

C'est pourquoi une optimisation d'exploitation d'une ligne à voie unique doit permettre une homogénéisation globale des temps de parcours de toutes les interstations, par modification des consignes de vitesse en interstation en ralentissant les rames dans les interstations de faible longueur et en accélérant les véhicules dans les interstations les plus longues. L'objectif de cette uniformisation est de tenter de gommer les différences de longueurs d'interstation en créant artificiellement des stations équitempo-

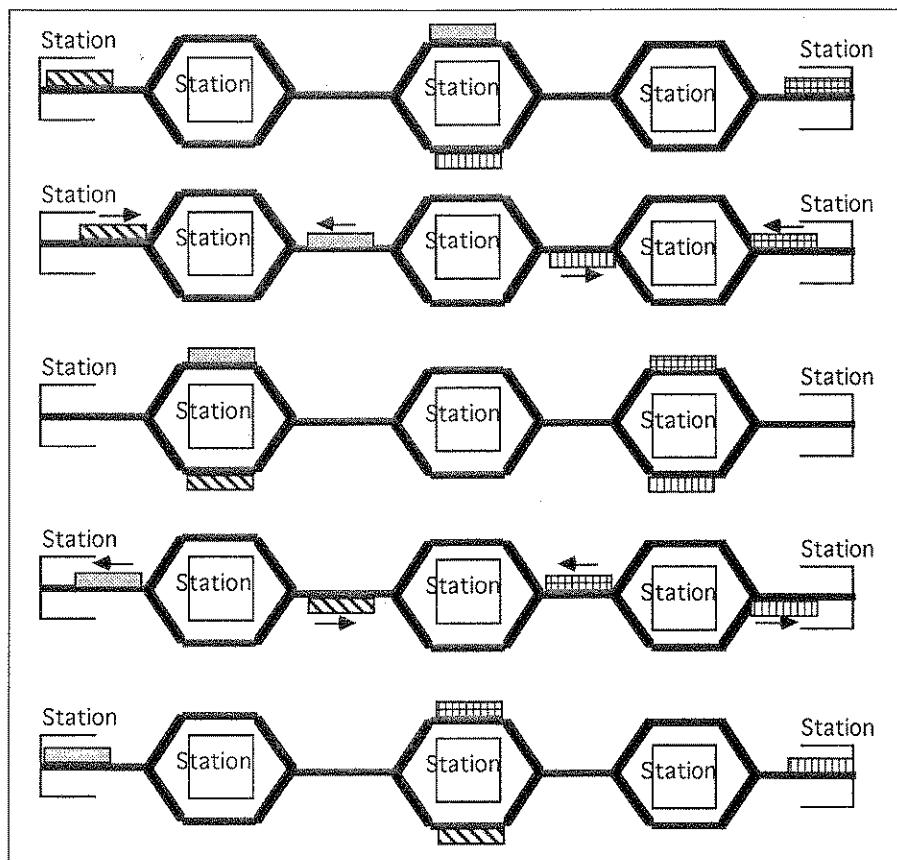


Figure 1 : exemple de fonctionnement d'une ligne à voie unique.

relles afin de se rapprocher du cycle de base de la ligne VULCAIN. Pour améliorer ce processus, il est également envisageable, dans la mesure du possible, de modifier les temps d'arrêt en station, soit par augmentation, soit par diminution.

Une fois cette homogénéisation réalisée, la politique de régulation envisagée repose sur une idée simple : autoriser une rame à partir dès que l'interstation aval est libre et que son temps d'arrêt en station est écoulé. Comme la rame part de la station dès que son itinéraire est disponible, cette politique est dite "adaptative à autorisation d'itinéraire".

Pour faire face à des perturbations de faible amplitude, le système de régulation doit permettre un retour rapide du mode dégradé au mode nominal. En tenant à jour des tables d'horaires théoriques de passage des rames en station, le système de régulation de trafic doit calculer un horaire théorique de passage des prochaines rames afin d'examiner les potentialités de conflit, dans le cas où deux rames sont amenées à s'y croiser. Pour cela, cette fonction utilise les degrés de liberté d'exploitation (consigne de vitesse par interstation et durée des arrêts en station) pour recalculer dynamiquement

l'horaire réel des rames sur l'horaire théorique. Ce calcul doit être réalisé pour au moins chacune des stations où se localise le conflit, voire pour la totalité des stations.

Les quelques principes énoncés sont purement théoriques et visent à une optimisation de l'exploitation d'un système de transport à voie unique. Cependant, dans la pratique, leur application même partielle ne porterait ses fruits que sur un site protégé, en effet, le site partagé ne peut qu'entraîner des incidents hors système qui nuiraient à la régularité de l'exploitation de la ligne. Il est à noter que la présence des deux appareils de voie à chaque station permet d'imaginer un certain nombre de modes dégradés qui ne sont pas envisageables avec un système de transport à voie double. Par hypothèse, la banalisation des voies, même en station, permet une circulation dans les deux sens de marche, ainsi, en cas de blocage sur la ligne, il peut être envisagé des services partiels en n'importe quel point. Cependant, cette relative souplesse n'intéresse heureusement qu'un faible pourcentage d'heures d'exploitation. En mode nominal, un incident en ligne peut se révéler plus ou moins rapidement bloquant pour l'ensemble de la ligne.

C'est pourquoi, l'exploitation d'un système de transport à voie unique réclame une grande disponibilité des équipements mais également des hommes. Ainsi, la disponibilité des équipements pourrait être réalisée par une redondance ou par une possibilité de fonctionnement en mode secours. En outre, une force d'intervention rapide et efficace constituée d'agents techniciens et de conducteurs motivés pourrait compléter ce dispositif de disponibilité.

ETUDE DES INFRASTRUCTURES : ASPECTS TECHNIQUES ET ECONOMIQUES

Pour illustrer au mieux la comparaison en matière d'infrastructures, nous reprenons ici certains résultats de l'étude de VULCAIN qui porte sur trois types de matériel.

Les hypothèses de l'étude

L'étude comporte une évaluation comparative des coûts de génie civil et de Voirie et Réseaux Divers (V.R.D.) en voie double et en voie unique pour 3 types de matériel roulant. Nous avons retenu le VAL 206, le VAL 256 et le MAGGALY que nous appellerons M1, M2, M3 et qui ont pour dimensions respectives : 2 mètres, 2,50 mètres et 3 mètres en largeur et 26 mètres, 14 mètres et 36 mètres en longueur. Cette évaluation a été réalisée pour 4 méthodes de construction :

- La tranchée couverte
- Le tunnel circulaire réalisé au tunnelier à front pressurisé
- Le tunnel traditionnel
- Le viaduc

L'étude est réalisée sur des modules station + interstation variant de 600 à 1 200 m. La longueur des quais des stations a été choisie en fonction du type de matériel roulant, par analogie avec le matériel existant, et en partant de la contrainte permettant le stationnement d'une rame double, soit pour un dépannage par accostage d'une deuxième rame, soit pour prévoir une augmentation de la capacité de la ligne. Ainsi la longueur des quais est respectivement de 52 mètres pour le matériel M1, 28 mètres pour M2 et 72 mètres pour M3. Compte tenu du gabarit de l'ordre de 2,50 mètres et de la longueur des caisses de l'ordre de 30 mètres, le compromis est de considérer le tramway comme un matériel de type panaché M2-M3.

La longueur des zones de raccordement voie unique - voie double de part et d'autre des stations provient des contraintes géométriques des branchements ferroviaires et des conditions de confort.

Des hypothèses simplificatrices ont été faites pour la définition des terrains, pour les niveaux de la nappe phréatique et pour la configuration des réseaux des services publics et de la voirie. Ainsi les coûts de génie civil en tranchée couverte sont étudiés pour les types de terrain les plus fréquemment rencontrés c'est-à-dire les terrains avec ou sans eau (cohésion interne = 0 MPa et $j = 30^\circ$) et les terrains cohérents avec ou sans eau (cohésion interne = 0,05 MPa et $j = 20^\circ$). Pour la méthode de réalisation au tunnelier nous retenons le terrain granulaire avec eau. Afin d'estimer le coût déviation de réseaux, nous avons établi une coupe type en milieu urbain comprenant une voirie de largeur 18 m entre bâtiments, un collecteur d'assainissement axé sous la chaussée, et des réseaux d'eau, de gaz, d'électricité... sous les deux trottoirs. Cette coupe est présentée sur la figure 2.

Le coût de déviation des réseaux et de remise en état de la chaussée devient :

Voie unique : 1 collecteur, autres conduites, voirie 8 m² : 20 000 F/ml

Voie double : 2 collecteurs, autres conduites, voirie 13 m² : 35 000 F/ml

Ainsi en section courante, l'économie réalisable peut être de 40 %. Le tableau ci-dessous présente à titre d'exemple, un tronçon de 1000 m avec une station.

Nous pouvons ainsi obtenir 35 % d'économie théorique.

Le cadre en tranchée couverte

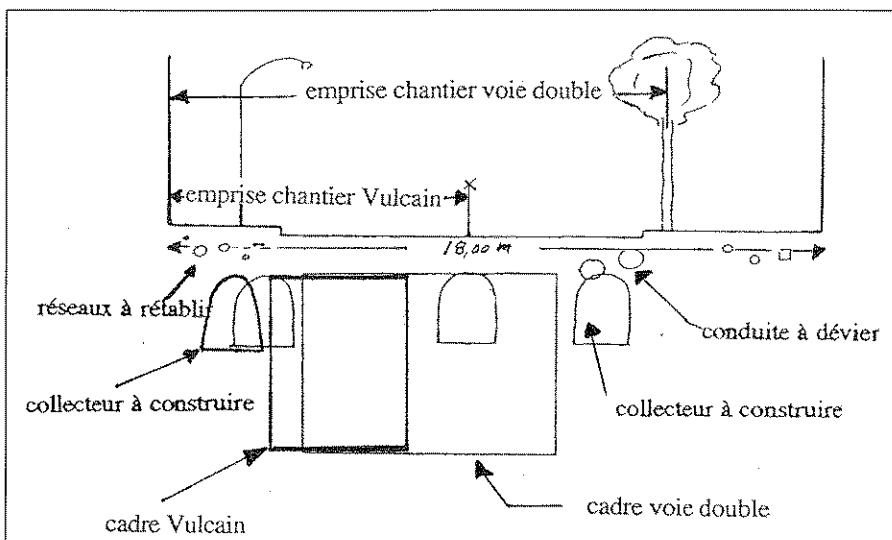
Nous considérons une étanchéité extérieure au cadre, la hauteur de pose sur les piédroits dépendant du niveau de la nappe phréatique. Nous nous limitons à 2 cas de niveaux d'eau : le niveau de nappe de protection en exploitation et le niveau de nappe maximum de protection en phase chantier.

Le prédimensionnement tient compte des soutènements, du bouchon étanche, et de la géométrie du cadre, et ce en fonction, la nature des terrains, du niveau de la nappe phréatique, de la profondeur de fouille, ainsi que du procédé d'exécution.

L'estimation a été réalisée à l'aide d'un bordereau de prix et du logiciel METROS développé par la SEMALY. Les différents coûts en F/ml de section courante réalisée en tranchée couverte superficielle pour les 3 types de matériel, pour 4 types de terrain, en voie double et en voie unique apparaissent dans la figure 3, l'économie théorique entre l'ouvrage à voie unique et l'ouvrage à voie double se situe entre 30 et 40 %.

| | | | |
|-------------|--------------------------|-------------------------|---------------------|
| Voie unique | 820 m x 20 000 = 16,4 MF | | |
| Voie double | 120 m x 35 000 = 4,2 MF | 940m x 35 000 = 32,9 MF | |
| Station | 60 m x 45 000 = 2,7 MF | | 2,7 MF |
| | VULCAIN | 23,3 MF | Voie double 35,6 MF |

Figure 2 : coupe type d'une voirie urbaine.



| | Terrain cohérent avec eau | | | Terrain granulaire avec eau | | | Terrain cohérent sans eau | | | Terrain granulaire sans eau | | |
|----|---------------------------|--------|---------|-----------------------------|--------|---------|---------------------------|--------|---------|-----------------------------|--------|---------|
| | Voie | | Rapport | Voie | | Rapport | Voie | | Rapport | Voie | | Rapport |
| | double | unique | VD/VU | double | unique | VD/VU | double | unique | VD/VU | double | unique | VD/VU |
| M1 | 76 800 | 50 900 | 1.51 | 71 900 | 46 000 | 1.56 | 38 300 | 26 000 | 1.47 | 45 300 | 28 800 | 1.57 |
| M2 | 91 100 | 59 000 | 1.54 | 82 800 | 51 900 | 1.6 | 46 100 | 29 000 | 1.59 | 53 000 | 32 500 | 1.63 |
| M3 | 91 200 | 59 300 | 1.54 | 84 300 | 53 600 | 1.57 | 47 000 | 29 200 | 1.61 | 54 500 | 33 500 | 1.63 |

Figure 3 : cadre en tranchée couverte superficielle (coût en F/ml)

Le tunnel circulaire réalisé au tunnelier

Des comparaisons économiques sont effectuées entre la solution monotube et bitube avec les hypothèses suivantes :

- utilisation d'un seul tunnelier dans les deux cas, ce qui renchérit la solution monotube pour le terme fixe,
- estimation sur les quantités mises en place en ce qui concerne le terme proportionnel à la longueur,
- prise en compte de la sur-profondeur des stations.

Les résultats sont présentés dans la figure 4, exprimés en kF HT, Val. Janv. 1991 pour le terme fixe et kF/ml pour le terme proportionnel ce qui permet d'établir le coût d'un tronçon de tunnel monotube ou bitube.

L'application sur un tronçon de 2 000 m avec 2 stations pour les matériaux M1, M2 et M3, est donnée par les figures 5 et 6.

En conclusion, l'utilisation d'un tunnelier de petit diamètre pour la voie unique apparaît intéressante économiquement malgré la contrainte des zones de raccordement à réaliser à ciel ouvert.

Ainsi, l'économie sur le gros œuvre est de l'ordre de 13 à 16 %. De plus, au niveau fonctionnel le tube de petit diamètre nécessitant moins de charge permet de minimiser la profondeur des stations.

Les stations

Dans le système VULCAIN, outre leur fonction d'échanges voyageurs, les stations permettent le croisement des trains, elles sont donc prévues à deux voies.

Ceci implique que les stations sont identiques pour les systèmes voie double et voie unique, mais que des zones de raccordement sont nécessaires pour passer de la voie unique à la voie double.

| Matériel | M1 | M2 | M3 | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Diamètre intérieur | 6,80 m | 4,65 m | 7,80 m | 5,15 m | 8,35 m | 5,30 m |
| Mise à disposition matériel d'excavation Amenée et montage sur le site | 48 000 | 34 000 | 56 000 | 37 000 | 60 000 | 39 000 |
| Repli matériel | 10 000 | 10 000 | 10 000 | 10 000 | 10 000 | 10 000 |
| Terme fixe (KF) | 2 000 | 2 000 | 2 000 | 2 000 | 2 000 | 2 000 |
| Excavation | 60 000 | 46 000 | 68 000 | 49 000 | 72 000 | 51 000 |
| Bentonite | 20,5 | 11 | 24 | 13 | 30 | 13 |
| Youssouirs | 3 | 2 | 4 | 2 | 4 | 2 |
| Injection bourrage | 26,4 | 18,7 | 29,7 | 19,9 | 32 | 21 |
| Béton rechargement | 5 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 |
| Divers | 3,6 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 |
| Terme proportionnel (KF/ml) | 5,5 | 3,3 | 6,3 | 4,1 | 8 | 4 |

Figure 4. Tunnel circulaire réalisé au tunnelier.

| MATÉRIEL M1 | | MATÉRIEL M2 | |
|---------------------|-----------------------------------|--------------|-----------------------------------|
| Ø 6,80 m : | tunnelier : 60 000 + 64 x 2 000 = | Ø 7,80 m: | tunnelier : 68 000 + 74 x 2 000 = |
| | station 2u x 34 = | | station 2u x 42 = |
| | | | 84 MF |
| | | | 300 MF |
| Ø 4,65 m : | tunnelier : 46 000 + 39 x 2 000 = | Ø 5,15 m : | tunnelier 49 000 + 43 x 2 000 = |
| | station 2u x 30 = | | station 2u x 37 = |
| | | | 74 MF |
| | | | Raccordements 2u x 18 = |
| | | | 52 MF |
| | | | 261 MF |
| | | | |
| | | | |
| Δ Coût | | % d'économie | |
| En section courante | | 64 MF | |
| Globalement | | 36 MF | |
| | | 14 % | |

Figure 5. Tunnel circulaire. Tronçon de 2 000 mètres avec 2 stations.

| | | |
|--------------------------------|--|-------------------------------------|
| $\varnothing 8,35 \text{ m:}$ | tunnelier : $72\ 000 + 84 \times 2\ 000 =$ station 2u $\times 70 =$ | 240 MF 140 MF 380 MF |
| $\varnothing 5,30 \text{ m :}$ | tunnelier $51\ 000 + 44 \times 2\ 000 =$ station 2u $\times 63 =$ Raccordements 2u $\times 27 =$ | 139 MF 126 MF 54 MF 319 MF |
| | | |
| | $\Delta \text{Coût}$ | % d'économie |
| En section courante | 101 MF | 42 % |
| Globalement | 61 MF | 16 % |

Figure 6. Tunnel circulaire. Tronçon de 2 000 mètres avec 2 stations : Matériel M3.

Les stations souterraines sont réalisées selon la méthode "tranchée couverte", leur coût comprend :

- les terrassements
- les soutènements
- l'étanchement du fond de fouille
- les structures (coffrage, acier, béton)
- l'étanchéité
- les déviations des réseaux
- le rétablissement de la voirie

Les figures 7 et 8 donnent les coûts de stations superficielles et profondes, à quais latéraux pour 4 types de terrain.

Les différents coûts d'interstation de 600 m à 1 200 m pour ouvrages à voie double et à voie unique sont donnés dans les figures 9 et 10 pour les matériaux M2 et M3 dans le cas d'un cadre superficiel avec une station à quais latéraux dans un terrain granulaire avec eau. Les coûts sont exprimés en KF. Dans le cadre de l'étude complète les résultats montrent une économie de 20 à 33 % pour un cadre superficiel et une station à quais latéraux, et de 30 à 44 % pour un cadre profond et une station à quais latéraux, avec dans ce dernier cas, une sur-profondeur a été étudiée dans l'hypothèse d'une transition cadre-tunnel.

Le viaduc

Le coût d'une section courante y compris déviation des réseaux et rétablissement de la voirie pour les 3 systèmes étudiés et présentés dans la figure 11 et exprimée en F/ml.

On remarque aussi une économie de 30 % entre un viaduc à voie unique et un viaduc voie double.

Comme les stations souterraines, les stations aériennes pour une ligne à voie unique ont des ouvrages spéciaux de part et d'autre de la station pour permettre le raccordement de la voie unique à la voie double située au droit

de chaque station. Les figures 12 à 14 donnent les coûts des interstations variant de 600 à 1 200 m pour les 3 systèmes.

Il peut être ainsi réalisé une économie de 20 à 27 % entre une interstation à voie double et une interstation à voie unique dans le cas d'un ouvrage aérien. L'ensemble de ces fourchettes donne une indication sommaire des économies réalisables, en effet, des variations de prix peuvent être constatées pour cause de contraintes locales ou conjoncturelles.

| MATERIEL | STATION PROFONDE QUAIS LATERAUX coût en KF | | | |
|----------|--|----------|--------------------|----------|
| | TERRAIN COHERENT | | TERRAIN GRANULAIRE | |
| | AVEC EAU | SANS EAU | AVEC EAU | SANS EAU |
| M1 | 27 100 | 24 060 | 27 560 | 24 160 |
| M2 | 21 480 | 18 780 | 21 780 | 19 080 |
| M3 | 35 060 | 30 660 | 35 660 | 30 860 |

Figure 7. Coût d'une station profonde.

| MATERIEL | STATION SUPERFICIELLE QUAIS LATERAUX coût en KF | | | |
|----------|---|----------|--------------------|----------|
| | TERRAIN COHERENT | | TERRAIN GRANULAIRE | |
| | AVEC EAU | SANS EAU | AVEC EAU | SANS EAU |
| M1 | 22 060 | 17 060 | 19 760 | 17 360 |
| M2 | 17 480 | 13 280 | 15 480 | 13 480 |
| M3 | 29 760 | 22 060 | 25 960 | 22 460 |

Figure 8. Coût d'une station superficielle.

| INTERSTATION | 600 | 750 | 900 | 1 050 | 1 200 |
|--------------|--------|--------|---------|---------|---------|
| VOIE DOUBLE | 78 600 | 96 300 | 113 900 | 131 600 | 149 300 |
| VOIE UNIQUE | 57 200 | 68 000 | 78 800 | 89 600 | 100 400 |
| RAPPORT | 1.37 | 1.42 | 1.45 | 1.47 | 1.49 |

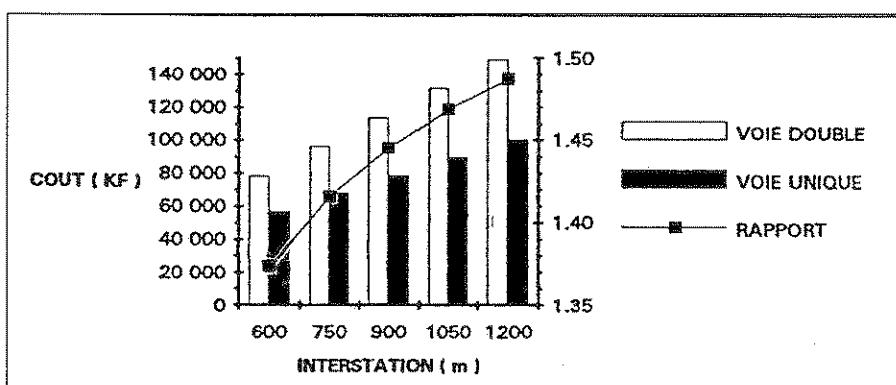


Figure 9. Coûts d'interstation en cadre superficiel pour le matériel M 2.

| INTERSTATION | 600 | 750 | 900 | 1 050 | 1 200 |
|--------------|--------|---------|---------|---------|---------|
| VOIE DOUBLE | 84 700 | 102 600 | 120 400 | 138 300 | 156 200 |
| VOIE UNIQUE | 66 100 | 77 100 | 88 200 | 99 200 | 110 200 |
| RAPPORT | 1.28 | 1.33 | 1.37 | 1.39 | 1.42 |

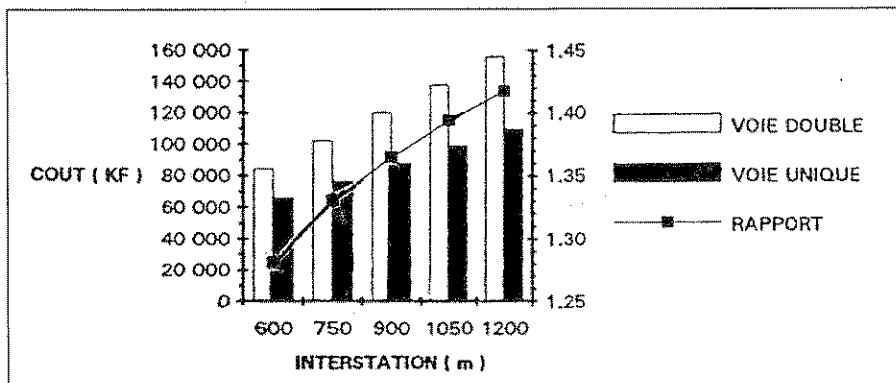


Figure 10. Coût d'interstation en cadre superficiel pour le matériel M3.

| | voie double | voie unique | rapport VD/VU |
|----|-------------|-------------|---------------|
| M1 | 47 700 | 32 900 | 1.45 |
| M2 | 54 700 | 37 400 | 1.46 |
| M3 | 58 200 | 40 100 | 1.45 |

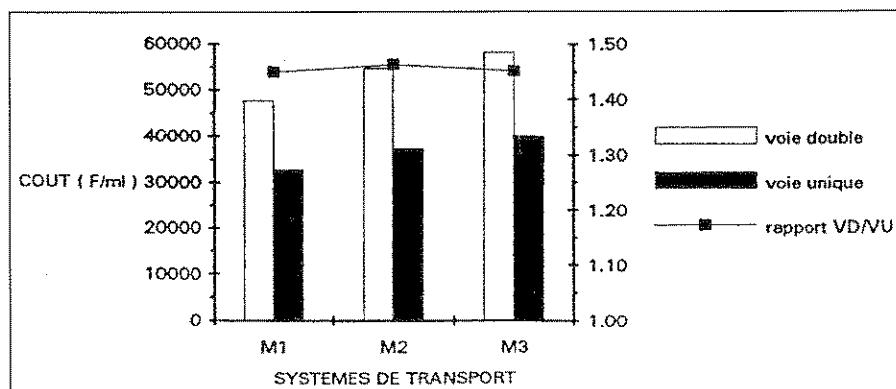
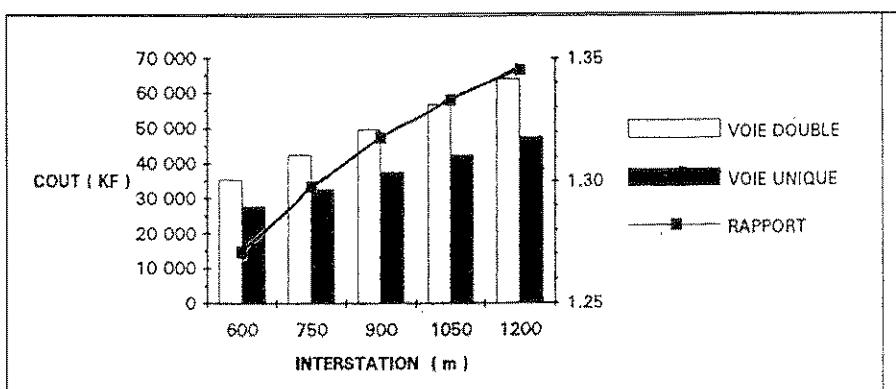


Figure 11. Coûts du viaduc.

La conclusion de l'étude économique de comparaison voie unique/voie double fait ressortir des économies de construction, aussi bien en génie civil qu'en VRD, qui sont en moyenne de 15 % à 40 % pour des ouvrages en tranchée couverte, de l'ordre de 15 % à 20 % pour des ouvrages réalisés au tunnelier, et de l'ordre de 20 % à 25 % pour des ouvrages aériens.

| INTERSTATION | 600 | 750 | 900 | 1 050 | 1 200 |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| VOIE DOUBLE | 35 400 | 42 555 | 49 710 | 56 865 | 64 020 |
| VOIE UNIQUE | 27 852 | 32 787 | 37 722 | 42 657 | 47 592 |
| RAPPORT | 1.27 | 1.30 | 1.32 | 1.33 | 1.35 |



AP2S du Havre

Parmi les tracés proposés par huit villes françaises dans le cadre de l'étude VULCAIN, c'est le projet de la ville du Havre, retenu en raison de la possibilité de récupération d'une emprise

dans un tunnel existant et de l'utilisation d'un site propre autobus, qui a été étudié de manière approfondie. De plus, ce tracé permet de créer une liaison rapide, ce qui semble indispensable à moyen terme, entre la ville basse où se situent les emplois et la ville haute qui accueille 62 % de la population. Ainsi, la ligne du Havre posséderait 9 stations réparties sur une longueur de 6 230 mètres dont 4 130 mètres de voie unique (soit 66 %) et 2 100 mètres de voie double. Le linéaire important de voie double correspond aux longueurs des stations et des zones de raccordement entre la voie unique et la voie double (de l'ordre de 120 mètres par station). La ligne relierait l'Hôtel de Ville (ville basse) à Mont Gaillard (ville haute) via la Gare et le tunnel Jenner (Fig. 15). Il est à noter un évitemen (by pass) au niveau du tunnel Jenner permettant de réduire une interstation trop longue. Le parc de matériel roulant nécessaire à l'exploitation de la ligne a été évalué à 11 véhicules, compte tenu des impératifs d'exploitation et de maintenance. La fréquentation attendue est de l'ordre de 2 700 voyageurs par heure dans le sens le plus chargé.

EVALUATION DES COUTS D'INVESTISSEMENTS POUR LE HAVRE

Le métro automatique

Afin de réaliser une étude économique la plus juste possible, nous avons pris comme référence des auto-

| | | | | | |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| INTERSTATION | 600 | 750 | 900 | 1 050 | 1 200 |
| VOIE DOUBLE | 38 728 | 46 933 | 55 138 | 63 343 | 71 548 |
| VOIE UNIQUE | 29 668 | 35 278 | 40 888 | 46 498 | 52 108 |
| RAPPORT | 1.31 | 1.33 | 1.35 | 1.36 | 1.37 |

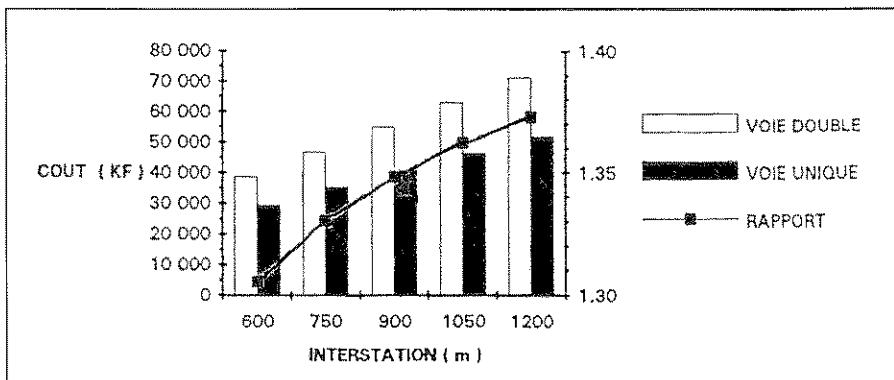


Figure 13. Coûts d'interstation en viaduc pour le matériel M. 2.

| | | | | | |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| INTERSTATION | 600 | 750 | 900 | 1 050 | 1 200 |
| VOIE DOUBLE | 44 290 | 53 020 | 61 750 | 70 480 | 79 210 |
| VOIE UNIQUE | 35 697 | 41 712 | 47 727 | 53 742 | 59 757 |
| RAPPORT | 1.24 | 1.27 | 1.29 | 1.31 | 1.33 |

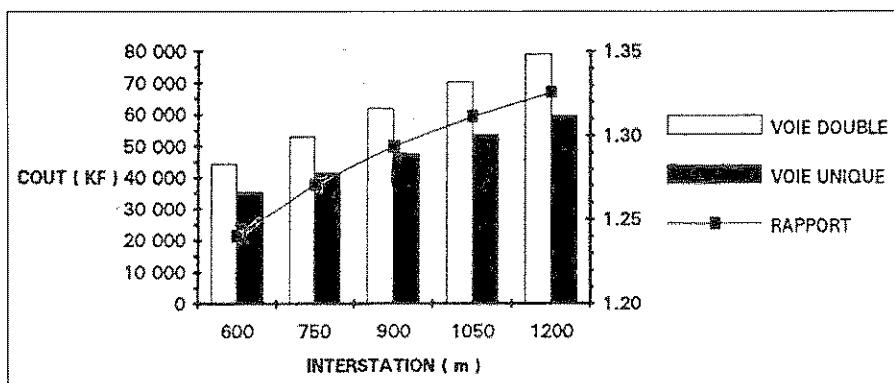


Figure 14. Coûts d'interstation en viaduc pour le matériel M. 3.

matismes existants et éprouvés. Il existe, sans aucun doute, d'autres solutions plus élégantes que celles retenues pour cette étude employant d'autres technologies, mais dont les coûts d'étude et de développement ne pourraient pas être chiffrés.

C'est pourquoi, nous avons retenu deux systèmes de gestion de voie unique : l'automatisme intégral type VAL et l'automatisme avec conducteur type Lyon ligne A ou B. En premier lieu, l'étude VULCAIN a montré une équivalence de prix du coût global du système de transport (à savoir, les équipements de plate-forme et de stations, les automatismes fixes et le PCC, les équipements d'alimentation électrique et de transmission, ainsi que le matériel roulant) entre la solution voie unique et la solution voie double, les économies

d'équipement de voie étant compensées par le surcoût des automatismes. En ce qui concerne le gabarit du matériel roulant, compte tenu de la demande au Havre, nous avons retenu le type M1.

Les tableaux ci-dessous présentent la synthèse des coûts d'investissement pour un linéaire de 6 230 mètres, 9 stations, un évitement et un parc de 11 véhicules. Ces fourchettes de chiffres correspondent aux différentes variantes proposées, aériennes, souterraines et en plate-forme.

Le tramway

La configuration du site sur le tracé proposé permettant, grâce aux voiries suffisamment larges, de recevoir un mode de transport en plate-forme, la solution retenue a été le tramway type

Grenoble. L'étude présentée est réalisée de façon sommaire puisque sans concertation avec les responsables concernés sur l'environnement du projet. En effet, la construction d'un tramway en plate forme n'est pas seulement une opération de transport, mais également une opération d'urbanisme et de reconfiguration de l'espace public.

Afin d'assurer une cohérence, la comparaison est réalisée entre un tramway à voie unique, sachant que dans la pratique, le panachage des deux modes pourrait être envisagé.

Au niveau du Cours de la République, l'insertion en plate forme est facilitée par un site propre bus existant. La traversée du Tunnel Jenner est réalisée en conservant les deux voies de circulation et en inscrivant le tramway dans l'emprise du trottoir et de la piste cyclable, dans un seul tunnel pour la solution voie unique, dans les deux tunnels pour la solution voie double.

Dans le deuxième tronçon de la rue du Bois au Coq, le terre-plein central permettrait d'accueillir une plate forme à double voie.

Ainsi, les investissements hors matériel roulant comprenant entre autres, les infrastructures, le Système d'Aide à l'Exploitation (SAE), les ateliers et locaux d'exploitation, représenteraient 680 millions de francs pour le tramway à voie double et 550 millions de francs pour le tramway à voie unique. Il est à noter que l'ensemble des chiffres donnés dans cette étude s'entendent hors frais d'acquisitions de terrains.

En tenant compte de l'investissement dû au matériel roulant, le total serait de l'ordre de 834 millions de francs pour la voie double et 704 millions de francs pour la voie unique.

Ainsi, l'économie réalisable par le choix d'un système de tramway à voie unique est donc de l'ordre de 20 %.

Il est certain que les coûts totaux en solution tramway sont moins élevés par rapport aux solutions métro automatique, mais l'offre de service est totalement différente.

Une simulation numérique sur le Havre nous avait montré que l'intervalle minimal pour un métro automatique pourrait être de l'ordre de 3 minutes, l'exploitation de Lausanne nous montre que 10 minutes paraît être une solution optimale dans le cas du tramway.

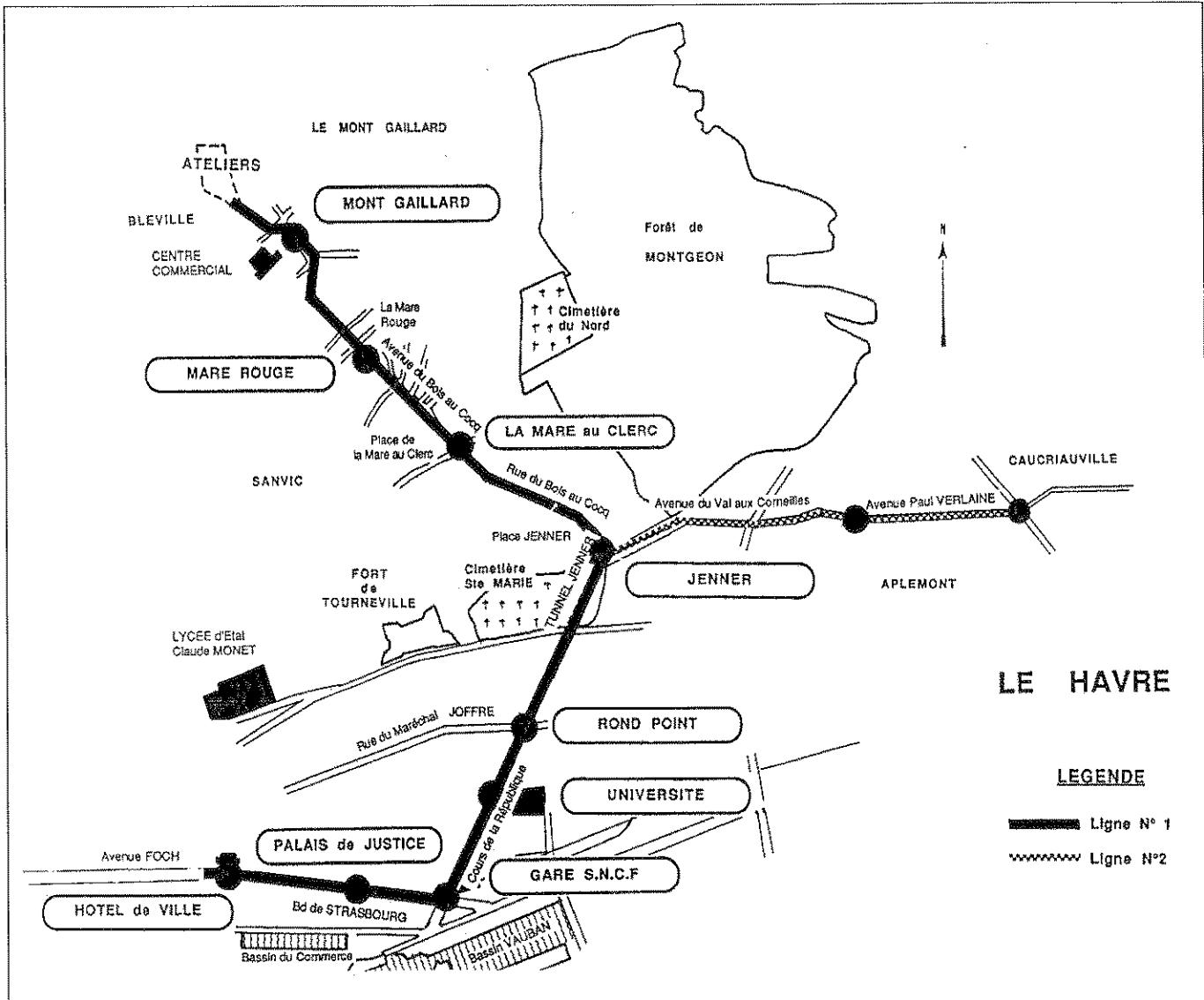


Figure 15

• Automatismes de type VAL (en Millions de FFHT valeur 1991)

| | VULCAIN | Voie double | Economie |
|---------------------|---------------|---------------|--------------|
| Coût Système | 600 à 650 | 600 à 650 | |
| Coût Infrastructure | 470 à 800 | 550 à 1 000 | 14 % à 20 % |
| Coût Total | 1 070 à 1 450 | 1 150 à 1 650 | 7,5 % à 14 % |

• Automatismes de type Lyon A ou B (en Millions de FFHT valeur 1991)

| | VULCAIN | Voie double | Economie |
|---------------------|-------------|---------------|----------------|
| Coût Système | 450 à 550 | 450 à 550 | |
| Coût infrastructure | 470 à 800 | 550 à 1 000 | 14 % à 20 % |
| Coût Total | 920 à 1 350 | 1 000 à 1 550 | 8,7 % à 14,8 % |

CONCLUSION

L'étude VULCAIN a permis d'évaluer quelques facettes d'un système de transport en voie unique, mais également de bouleverser un certain nombre d'idées reçues.

Ainsi les aspects techniques et économiques du génie civil ont été abordés dans un cadre théorique où il est démontré que les gains entre des infrastructures à voie double et à voie unique peuvent aller pour des ouvrages en viaduc ou en tranchée couverte jusqu'à 40 %, mais qu'ils sont plus proches de 15 % pour des ouvrages réalisés au tunnelier, voire 10 % pour une plate-forme.

Les aspects "Système" de l'étude VULCAIN ont montré le fonctionnement satisfaisant d'une telle ligne en mode nominal ainsi que les différents

modes dégradés envisagés. Il a été prouvé que, contrairement aux idées reçues, une ligne à voie unique apporte une certaine souplesse d'exploitation grâce aux deux appareils de voie à chaque station, appareils qui permettent de réaliser des services partiels en n'importe quel endroit de la ligne.

Un avant projet sommaire simplifié d'un système VULCAIN pour le site du Havre avec différentes variantes d'infrastructure a chiffré l'économies entre 7,5 % et 15 % par rapport à une ligne en voie double. L'économie réalisée dans le cas d'un tramway en plate-forme peut atteindre 20 %.

Le système à voie unique en site propre à conduite automatique répondant aux besoins d'une ville moyenne est exploitable dans des conditions satisfaisantes, cependant les économies réalisées en adoptant la voie unique restent modestes dans le cas étudié. L'évaluation réalisée pour le tramway paraît plus intéressante et les expériences suisses montrent que de tels systèmes sont exploitables au prix de certaines contraintes.

Cependant, il ne faudrait pas oublier que l'intérêt principal de la voie unique est sa faculté d'insertion, comme par

- Tramway type Grenoble (en millions de FF HT valeur 1991)

| | VULCAIN | Voie double | Economie |
|-------|---------|-------------|----------|
| Coût | | | |
| Total | 704 | 834 | 18 % |

exemple, l'avantage du viaduc qui offre un encombrement visuel réduit, ou bien en centre ville, où la voie double ne pourrait être intégrée sans travaux importants. Il est à noter également la possibilité de récupération d'ouvrages existants comme le tunnel Jenner au Havre ou la plate-forme ferroviaire rencontrée sur d'autres projets.

De plus, l'utilisation de portions de voie unique sur une ligne conventionnelle ne doit pas être écartée. Elle peut être imaginée en hypercentre où il peut exister des problèmes d'intégration ou aux extrémités de ligne où la demande de transport est moins importante. ■

Guillaume USTER
Francis KUHN
INRETS-CRESTA

BIBLIOGRAPHIE

G. Uster, F. Kühn, J. Rodriguez : INRETS-CRESTA, P. Marx, C. Martinet, V. Gascon, A. Brenier, J. Berbudeau : METRAM, B. Constantin : CETU. Voie Unique pour Ligne Complémentaire à Automatisme Intégral "VULCAIN" Références INRETS-CRESTA 92-18.

J.P. Godard. Coût des divers types d'infrastructures de transports ferroviaires en zones urbaine et suburbaine. Journées Internationales AFTES : La recherche d'économies dans les travaux en souterrain. Nice : 10-14 mai 1981.

PRDTT. Comité de thème A : Transport Guidés. Rapport du Groupe Transports Automatiques Légers Juillet 1989.

Actes INRETS n° 32. Nouvelles technologies et perspectives des transports collectifs pour villes moyennes Journée d'étude GRRT- INRETS. Villeneuve d'Ascq. 12 juin 1992.

Rapport INRETS à paraître : Intérêt et faisabilité de la voie unique pour un système de transport guidé urbain. G. Uster, F. Kühn, J. Rodriguez : INRETS-CRESTA, P. Marx, C. Martinet, V. Gascon, A. Brenier, J. Berbudeau : SEMALY, B. Constantin : CETU.

ATEC 93 CONGRES INTERNATIONAL FRANCOPHONE

“Quels transports pour nos villes de demain ?”

**13-14-15 OCTOBRE 1993
au Palais des Congrès de la Ville de Versailles**

N'oubliez pas de vous inscrire !

**Il reste encore quelques places disponibles
date limite d'inscription le 20 septembre 1993**

Renseignements et inscriptions :

**ATEC 38, avenue Emile-Zola - 75015 PARIS
Tél. 45.75.56.11 - Fax 45.79.52.86**