

Un exemple de métro léger à voie unique : le tramway de Lausanne

par Philippe H. BOVY,
Professeur à l'Ecole polytechnique
fédérale de Lausanne,
et Claude-Alain GUIGNET,
Sous-directeur
du Métro-Ouest, Lausanne

3096

ADONIS
Villageuve d'Asch

11 AOUT 1993

4D

Pour améliorer la desserte de quartiers périphériques situés dans le Sud-Ouest de l'agglomération de Lausanne (130 000 habitants), les autorités ont décidé de recourir au métro léger. La ligne de tramway est longue de 7 800 mètres, à voie normale unique, construite dans un cadre urbain et topographique contraignant. Les circulations sont réglées par des systèmes largement automatiques. Quelques mois après sa mise en service (2 juin 1991), le trafic du métro léger est de 7,4 millions de voyageurs, à comparer à celui des lignes d'autobus qu'il remplace, soit 4,5 millions.

1. De la planification du projet à son adoption

1.1. De nouveaux besoins de transport dans le Sud-Ouest lausannois

La région lausannoise (235 000 habitants) et tout particulièrement son secteur Sud-Ouest connaissent depuis deux décennies une mutation fondamentale : le transfert des Hautes Ecoles lausannoises (Université de Lausanne et École polytechnique fédérale de Lausanne) sur un site de 160 ha à 5 km du centre de la ville. Il s'agit du plus important transfert planifié d'institutions publiques qu'ait connu la région et d'un regroupement qui touchera, vers 1995, un effectif d'environ 14 000 personnes. Bien situés par rapport au lac Léman et aux liaisons routières et autoroutières, les territoires voisins enregistrent une accélération de leur urbanisation imputable au développement des Hautes Ecoles. Parmi les problèmes d'insertion et de desserte des Hautes Ecoles, se posait celui des transports collectifs, qui était le plus préoccupant.

Le Conseil d'État du canton de Vaud fit entreprendre une étude dont l'objectif était de «concevoir un projet qui permette d'accroître substantiellement la qualité et la capacité des transports collectifs, cela au bénéfice conjoint de la population du Sud-Ouest lausannois et des usagers des Hautes Ecoles». Cet objectif mettait en évidence les deux plus importantes facettes du problème :

- assurer la **complémentarité de services dans le temps et dans l'espace pour deux clientèles cibles** : la population des communes et les usagers des Hautes Ecoles ;
- faire en sorte que le projet **profite à la plus grande clientèle potentielle** et améliore la desserte dans un périmètre aussi large que possible.

Les analyses ont montré que le renforcement des transports collectifs était une nécessité vitale non seulement pour les usagers futurs de ces transports, mais aussi pour l'ensemble des usagers et tout particulièrement ceux qui utilisent la voiture particulière. En effet, le maintien du *statu quo* des transports collectifs aurait conduit à un accroissement excessif des besoins de stationnement des Hautes Ecoles. Par ailleurs, le trafic engendré aurait surchargé le réseau routier du Sud-Ouest lausannois au point d'étendre la zone de congestion caractérisée de Lausanne d'environ 3 km vers le Sud-Ouest.

La congestion automobile n'épargne pas les transports collectifs par autobus ou trolleybus, très sensibles aux encombre-

ments de circulation, puisqu'ils empruntent les mêmes routes. L'adaptation du réseau routier apparaissant comme coûteuse et très aléatoire, la mise en place d'un système de transport collectif, efficace et attrayant même pour l'automobiliste, était la seule solution valable et réaliste pour ce secteur.

1.2. Le choix du métro léger

L'étude s'est appuyée sur une consultation systématique et intensive de l'ensemble des milieux concernés. Toutes les possibilités et propositions formulées par les milieux les plus divers ont été examinées afin de connaître et d'évaluer l'éventail complet des solutions techniquement imaginables. Treize solutions ont ainsi été envisagées, de l'autobus au chemin de fer.

La quasi-totalité des solutions examinées s'articule sur un terminus situé au cœur de Lausanne. Cela s'explique par la configuration de la région lausannoise et la structure de son système de transport collectif polarisé sur un centre-ville desservi par plus d'une douzaine de lignes urbaines des TL, par le métro Lausanne-Ouchy et par le chemin de fer Lausanne-Echallens-Bercher en cours de prolongement jusqu'au centre.

Pour évaluer l'impact des variantes, une étude comparée a pris en considération une vingtaine de critères. L'évaluation technico-économique a conduit à l'élimination de onze des treize solutions initialement envisagées, pour une ou plusieurs des raisons suivantes :

- incompatibilité avec les objectifs fixés par le Conseil d'État,
- coûts excessifs (investissement ou exploitation),
- accumulation de difficultés techniques,
- fiabilité d'exploitation incertaine,
- technologies non éprouvées en exploitation commerciale,
- mauvaise qualité de desserte de la population du secteur,
- problèmes majeurs d'insertion urbanistique.

1.3. Un processus d'information et de consultation pour parvenir à une solution de consensus

Dans le contexte de la démocratie directe helvétique, il faut savoir que l'obtention d'un consensus consultatif est indispen-

sable pour espérer le succès d'un projet. En effet, tous les projets publics peuvent faire l'objet d'un référendum populaire à l'un ou l'autre des niveaux institutionnels impliqués (fédéral, cantonal, communal), cela même après approbation du projet par toutes les instances législatives concernées. **La menace de référendum plane sur tout projet**, surtout sur les projets de transport qui, du fait de leur extension territoriale, couvrent plusieurs entités politiques et sont donc très vulnérables. La recherche d'un consensus est, en Suisse, le moteur de toute élaboration du projet.

En accord avec les autorités cantonales et communales, une procédure d'information et de consultation a été engagée. Plus de 70 séances ont eu lieu durant la première phase d'étude, non seulement avec les milieux officiels concernés, mais également avec les partis politiques, des associations et des groupes de citoyens intéressés par le développement du projet. Cette opération a été fructueuse, car elle a permis de prendre en compte des aspects qui échappent généralement à une démarche de caractère «technocratique».

Deux solutions ont été présélectionnées :

- un **axe fort pour trolleybus** (trolleybus circulant sur une ligne dotée de couloirs réservés),
- une **ligne de tramway** (métro léger).

L'avis des milieux consultés était favorable à la proposition d'une ligne de tramway ou métro léger. Cette solution demande certes un investissement quatre à cinq fois plus élevé que celui nécessaire pour la mise en service d'un axe fort pour trolleybus. En revanche, les coûts d'exploitation du tramway sont nettement inférieurs à ceux du trolleybus. En outre, une ligne de tramway ou de métro léger aménagée essentiellement en site propre offre des garanties durables de fiabilité de fonctionnement, alors que les transports collectifs routiers par autobus ou trolleybus restent très fragiles en raison de la congestion croissante du réseau routier.

A l'achèvement de la première phase d'étude, le Département cantonal des travaux publics lance une large information et une

consultation officielle auprès des instances communales et régionales, des administrations et entreprises de transports publics ainsi qu'auprès d'associations économiques et de groupements d'usagers.

Outre l'intérêt manifeste témoigné pour la solution «tramway moderne» essentiellement en site propre, la consultation met en évidence une quasi-unanimité en faveur d'un tracé allant du centre de Lausanne à la gare CFF de Renens ; ainsi que pour la répartition des stations desservant très amplement les communes (onze stations) ainsi que les Hautes Écoles (quatre stations).

Se fondant sur les résultats de la consultation, le Conseil d'État du canton de Vaud décide, en mai 1984, d'engager la deuxième phase d'étude sur la solution «préférentielle» uniquement : le tramway moderne ou métro léger (figure 1).

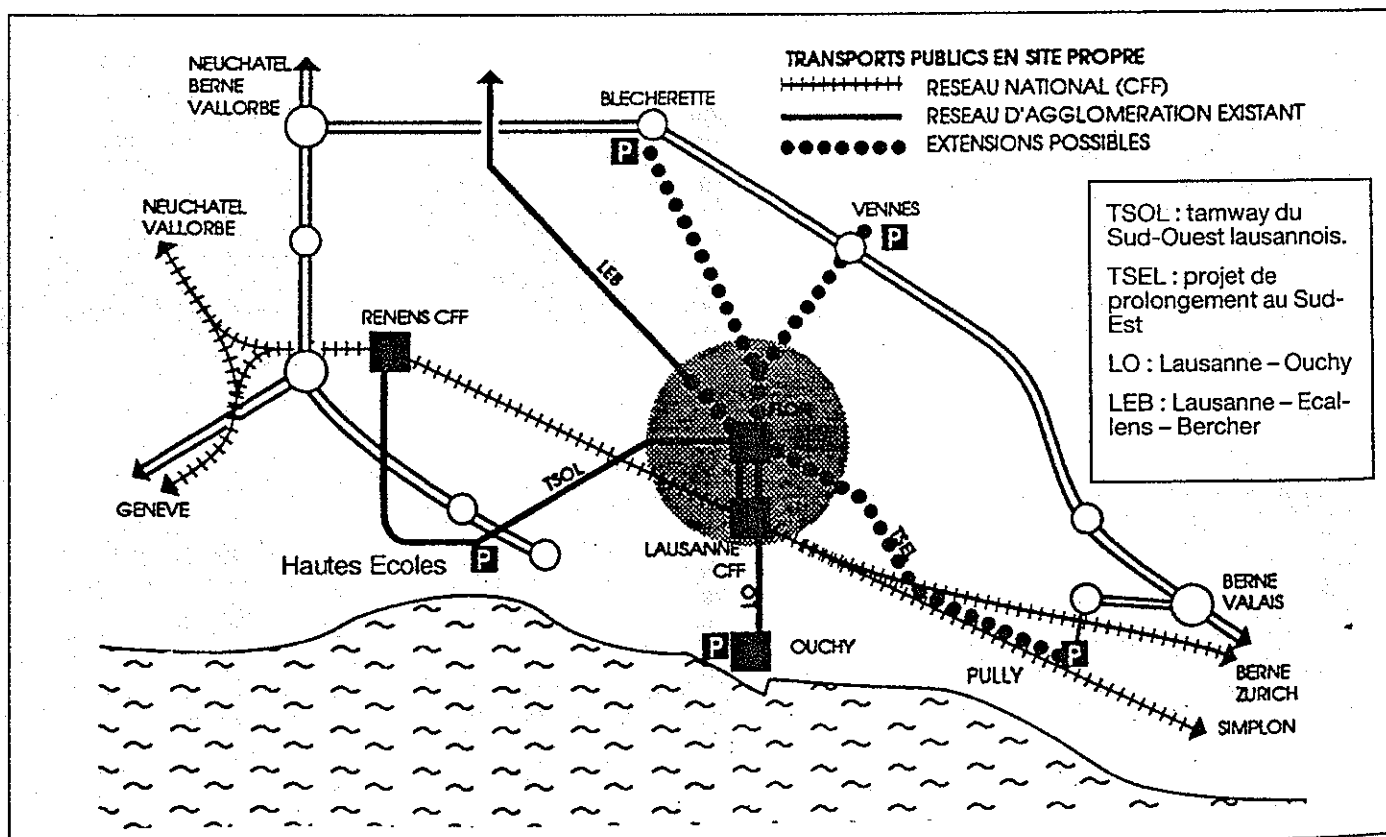
L'effort d'information et de consultation a été poursuivi durant l'étude d'avant-projet ainsi que durant la longue phase de négociation du financement qui a suivi. Plus de cinquante séances d'information et de consultation ont été conduites pour améliorer le projet, expliquer ses orientations et caractéristiques ainsi que pour assurer sa promotion et son succès.

1.4. Les avantages de la solution retenue : le métro léger

Pour être efficace, un transport collectif doit disposer de sa propre infrastructure afin d'éviter les perturbations liées à la circulation routière urbaine. Compte tenu de la topographie favorable du Sud-Ouest lausannois et de l'exceptionnelle disponibilité de terrains en possession des pouvoirs publics dans ce secteur, le tramway moderne s'imposait comme la solution la mieux adaptée et techniquement la plus fiable. Ce moyen de transport présente en effet plusieurs avantages.

- **La vitesse.** Le tramway moderne peut atteindre une vitesse de pointe de plus de 60 km/h. Sa vitesse commerciale moyenne est de 26 km/h, c'est-à-dire de 60 à 70 % supérieure à celle des lignes urbaines d'autobus ou de trolleybus. La durée du

Fig. 1. Le nouveau tramway du Sud-Ouest lausannois et les autres transports en site propre existants ou projetés.



projet complet est de 18 minutes. L'Université se trouve à 9 minutes de l'École polytechnique à 12 minutes du centre. Pour atteindre la gare de Renens, il faut 9 minutes depuis l'Université et 6 minutes depuis l'École polytechnique.

- **La régularité.** La régularité du service est assurée grâce au site propre permettant une exploitation ferroviaire optimale de la ligne, non soumise aux perturbations et encombrements de la circulation routière, ainsi qu'aux interférences liées à la régulation lumineuse des carrefours routiers. En effet, la régulation routière est entièrement asservie à l'exploitation du tramway.

- **La capacité des convois.** L'utilisation de véhicules articulés offrant environ 250 places et circulant en rames doubles de 500 places durant les périodes de forte affluence, assure une capacité de transport adaptable quatre fois supérieure à celle de bus ou trolleybus articulés.

- **La cadence et la capacité de ligne.** La ligne est conçue pour une cadence d'un convoi toutes les 10 minutes, offrant une capacité de transport de 3 000 voyageurs par heure et par direction, soit le double de la capacité du service d'autobus actuel. Avec du matériel roulant supplémentaire, des cadences de 7,5 minutes et même de 5 minutes sont envisagées à moyen terme. La capacité horaire pourra ainsi graduellement passer à 4 000 et 6 000 voyageurs par sens.

- **Le confort.** Le tramway moderne offre un confort élevé en raison d'une géométrie favorable de la ligne et des qualités intrinsèques de la technique ferroviaire actuelle. En plus, les quais des stations sont situés au même niveau que le plancher des rames, comme c'est le cas dans les métros. D'ailleurs, la notion de « métro léger » découle directement de cette caractéristique : c'est un tramway moderne avec des quais hauts permettant d'accéder à niveau dans les rames.

- **La sécurité.** La sécurité est garantie par un block de ligne automatique comprenant des détecteurs de passage et des dispositifs d'arrêts automatique des rames en cas de non-respect de la signalisation. En outre, l'ensemble des croisements avec la circulation routière est contrôlé par une signalisation adéquate commandée de façon prioritaire par le tramway. Aucun système de transport ne peut garantir une sécurité absolue mais les tramways et métros légers offrent un niveau de sécurité très élevé.

- **La protection de l'environnement.** Moyen de transport à vocation typiquement urbaine, le tramway est compatible avec le milieu ambiant. La traction électrique et les progrès techniques apportés aussi bien à la voie qu'aux véhicules en font un transport adapté aux exigences essentielles de protection de l'environnement urbain. Le bilan des impacts portant sur les aspects visuels, l'environnement naturel, ainsi que les conséquences techniques, économiques et urbanistiques du projet, révèle une image globale positive. Les impacts sont soit négligeables, soit de faible importance par rapport aux avantages manifestes découlant de ce projet.

La mise en place d'une capacité de transport par d'autres moyens, tels que l'automobile ou même les transports publics

routiers, aurait entraîné des aménagements et un fonctionnement nettement moins favorables pour l'environnement. Sans être révolutionnaire, la technologie éprouvée du métro léger s'inscrit dans l'évolution des moyens de déplacement d'avenir pour des secteurs à moyenne densité d'activités tels que le Sud-Ouest lausannois.

1.5. Pourquoi la simple voie et des passages à niveau ?

La double voie est toujours préférable à la simple voie. Dans le cas du Sud-Ouest lausannois, le problème posé était celui de l'insertion de la ligne dans un territoire complexe, déjà urbanisé et à topographie mouvementée sur près de la moitié du tracé de la ligne (déclivité maximale de 60 pour mille). Vouloir réaliser la double voie aurait considérablement accru le coût de l'opération avec le risque évident de non-réalisation du projet. Trois ou quatre stations à double voie sont indispensables pour assurer les possibilités de croisement des rames. Toutefois, pour permettre la meilleure souplesse d'exploitation possible, il a été décidé d'aménager des stations de croisement partout où cela était faisable. Ainsi, sur cette ligne à simple voie, 12 stations sur 15 sont à double voie.

L'absence de tout passage à niveau eut été souhaitable. Toutefois une telle exigence aurait entraîné des coûts prohibitifs conduisant à l'échec du projet, il faut se rendre compte des problèmes majeurs soulevés par le tracé intégralement dénivelé d'un métro léger :

- le tracé en souterrain coûte très cher et doit être réservé à des tronçons de la ligne où il est impossible de passer autrement ; cette solution a d'ailleurs été retenue pour l'entrée en centre-ville de Lausanne ;

- le tracé aérien pose des problèmes d'insertion urbanistique et esthétique quasiment insolubles ; le passage d'un transport au premier étage des bâtiments n'est pas acceptable en Suisse.

Le cas du métro léger TSOL n'est pas particulier. Si cette ligne dispose de sites protégés (sur plus de 95 % de la ligne) beaucoup plus importants qu'un tramway traditionnel, elle comporte néanmoins des intersections et passages à niveau, comme le tramway d'Utrecht à quais hauts qui a inspiré la conception du métro léger TSOL, ou comme les tramways modernes de Nantes ou de Grenoble. Si l'exigence de la suppression totale des passages à niveau était considérée comme une contrainte absolue, les excellents réseaux de tramways de Bâle, Berne et Zurich devraient immédiatement arrêter leur exploitation.

Dans le cas lausannois, la ligne du métro léger a été conçue de façon à ne jamais couper un carrefour en diagonale, mais sur une des branches seulement. Cela signifie que lorsqu'une branche routière est temporairement bloquée par le passage du tramway, la circulation automobile peut s'écouler sur les autres branches du carrefour. La régulation lumineuse des carrefours concernés est entièrement asservie et télécommandée par le métro léger.

2. Les caractéristiques de la ligne et de son exploitation

2.1. Adaptation de l'avant projet

Dès réception de leur mandat, les deux équipes chargées de la réalisation entreprirent la vérification des éléments déterminés par les planificateurs. Le tracé et la position des stations ne furent pas remis en cause, cela d'autant plus qu'une profonde adaptation du réseau routier était engagée pour devenir opérationnelle lors de la mise en service de la ligne.

Sur certains tronçons, la voie fut déplacée de l'autre côté des voiries de manière à diminuer le nombre des passages à niveau. Par la réalisation d'autres corrections routières, le nombre total des passages fut réduit de 32 à 17. En raison des demandes excessives d'indemnisation ou d'oppositions ne pouvant être

levées à temps, 8 autres passages ne purent être supprimés. Plusieurs devraient toutefois l'être au cours des prochaines années.

L'écartement de la voie, initialement métrique (norme historique de tous les réseaux urbains suisses) fut porté à 1 435 mm (écartement normal), la ligne étant raccordée au réseau des chemins de fer fédéraux en gare de Renens. Cette mesure n'eut pas d'incidence financière sensible (en dépit de la construction d'une voie lourde), en raison de la normalisation des équipements de voie et des bogies des véhicules, ces équipements étant construits en plus grandes séries pour cet écartement.

Remarquons que cette adaptation a autorisé l'approvisionne-

ment des chantiers par voie ferroviaire, principalement pour le ballast, les rails et appareils de voie ainsi que les nombreux câbles.

Parallèlement, le rayon des branchements fut porté de 50 m à 185 m (norme pour les chemins de fer secondaires), améliorant ainsi la vitesse de circulation des trains.

Les installations de sécurité évoluèrent également pour aboutir à celles des chemins de fer lourds classiques (block automatique de ligne, arrêt automatique), la marche à vue n'étant conservée que pour les passages à niveau non encore équipés de barrières automatiques.

Les autres éléments firent également l'objet d'une vérification, en particulier la tension d'alimentation de la ligne de contact en vue de la porter à celle de 15 000 V 16 2/3 Hz des CFF. Toutefois, en dépit du grand intérêt de cette variante en prévision d'une éventuelle interconnexion ultérieure, les distances d'isolation furent jugées prohibitives en milieu urbain.

Longue de 7 800 m, la ligne compte 15 stations distantes de 300 m à 1 100 m (moyenne 557 m). Douze d'entre elles comportent une double voie, la ligne étant par ailleurs en voie unique intégrale. La part du tracé en ouvrages est importante (31 %), expliquant le choix de la simple voie (tableau 1). La dénivellation totale est de 140 m. Sur plusieurs tronçons, dont deux en zone d'arrêt notamment, les pentes atteignent 60 pour mille, ce qui impose un poids adhérent supérieur à 66 % pour atteindre des performances d'exploitation acceptables.

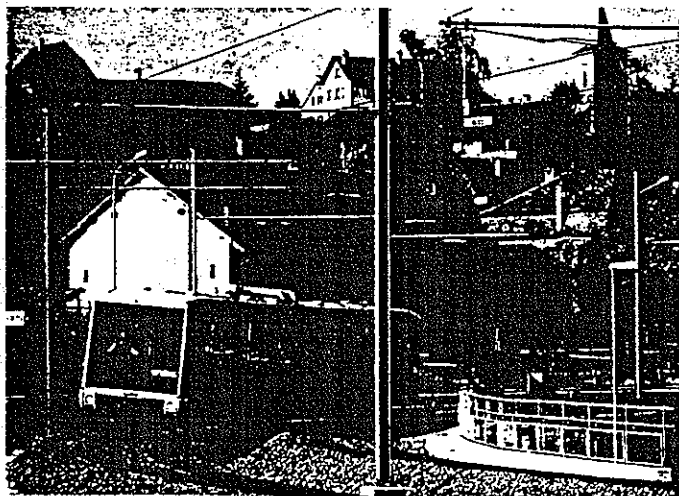
Les échanges avec le réseau de transport public routier s'effectuent en 5-stations dont la station terminale de l'importante gare CFF de banlieue de Renens, située sur les lignes de Genève, Vallorbe (Paris), Neuchâtel et Bâle.

Les problèmes rencontrés lors de la mise en œuvre du projet ont été principalement de nature géologique. Une succession de mauvais terrains (moraines avec poches de masses limoneuses dans lesquelles le tunnel de départ a été creusé, zone de décharge non stabilisée avec ouvrages en superstructure, anciens marais avec nappe phréatique affleurante) ont nécessité le recours à des techniques de construction particulières tout au long du tracé.

Afin de limiter les coûts, le gabarit des ouvrages (2 tunnels, 6 viaducs et 2 ponts) a été réduit au minimum possible, imposant la mise en œuvre de dispositions particulières telles les moteurs d'aiguilles en position centrale, la voie bétonnée dans le radier des tunnels, la caténaire modifiée...

La conduite des opérations de construction par les deux groupes «infrastructure» et «superstructure» a dynamisé l'avancement des chantiers, mais a posé des problèmes de coordination dans l'intégration des équipements. Cet élément a encore été renforcé par la volonté de construire à meilleur compte. Citons comme exemple la largeur des ponts où, outre le problème des moteurs d'aiguilles déjà cité, le respect d'un seuil

Fig. 2. "Longue de 7800 mètres, la ligne compte 15 stations (...). Douze d'entre elles comportent une double voie, la ligne étant par ailleurs en voie unique intégrale" (photo J-P. Maeder).



critique de largeur n'a pas permis la mise en place d'un caniveau de ligne identique à celui des autres tronçons, mais a imposé une exécution en alvéoles superposées rendant difficiles les interventions ultérieures.

2.2. Les véhicules

Les systèmes à plancher bas étant alors peu usités, les concepteurs du projet ont retenu, afin d'accélérer les échanges aux stations, le principe du plancher haut avec quais à niveau.

Les 12 automotrices ont été construites par ABB (partie électriques) et Vevey (partie mécanique). De conception semi-lourde, comme les métros, elles peuvent être engagées en unités simples ou doubles pour permettre une adaptation de l'offre à la demande. Les coupleurs automatiques (choc/traction, réseaux pneumatique et électrique) permettent une utilisation en ligne, pendant l'exploitation, avec voyageurs à bord.

Voici les caractéristiques principales des véhicules :

- bogies moteurs, un bogie porteur sous l'articulation (B2B),
- longueur : 31,4 m,
- largeur : 2,65 m,
- poids à vide : 42,7 tonnes,
- poids en charge : 61,5 tonnes,
- tension de ligne : 750 V courant continu,
- puissance unihoraire : 2 x 225 kW,
- vitesse maximale : 80 km/h,
- capacité totale : 250 places,
- dont places debout : 184 (5 p/m²), dont places assises : 66,
- 4 portes larges (1 550 mm) et 2 étroites (850 mm) par flanc.

Une particularité peu commune consiste en la présence à bord d'un groupe thermoélectrique de secours permettant des déplacements à vitesse réduite en cas d'absence de tension de ligne (vitesse : 3 km/h à pleine charge en rampe de 60 pour mille et de 25 km/h en palier). Le dispositif est utilisé pour les transferts sur le réseau CFF, principalement lorsque les automotrices doivent passer sur le tour en fosse de Lausanne pour le reprofilage des bandages de roue.

2.3. La sécurité

La ligne est surveillée et commandée depuis un poste directeur situé dans les locaux du dépôt-atelier.

L'outil principal est le dispositif classique de block automatique permettant la visualisation de la situation géographique des trains ainsi que l'état des installations : image des signaux, position des aiguilles, état des passages à niveau. La banalisation des voies en station est intégrale.

En régime normal, le système fonctionne automatiquement. En fait, le terme de semi-automatique conviendrait mieux, les conducteurs procédant eux-mêmes à la demande de création de leur parcours par action d'un poussoir au manipulateur. L'exploitant a exigé ce dispositif dans le souci permanent de fiabiliser l'exploitation en raison de la voie unique. Ce n'est que lorsque toutes les portes d'un convoi sont fermées et verrouillées que le mécanicien actionne l'émetteur embarqué à très haute fréquence diffusant des messages codés selon le sens de marche et la fonction désirée. Des récepteurs stationnaires décodent les messages et transmettent les ordres aux installations de sécurité. Les incidents en stations ne conduisent donc pas au blocage du tronçon à parcourir et le laissent libre pour un éventuel train en sens inverse.

D'autres poussoirs permettent la création, en régime automatique toujours, de parcours particuliers dont les entrées et sorties du dépôt ou les manœuvres. Cette manière de faire a été décidée afin d'éviter au maximum le régime manuel, qui interdit les mouvements simultanés proches pour des raisons de sécurité.

En cas de perturbation, le régulateur peut reprendre tout ou partie de la ligne en régime manuel et procéder aux manœuvres qui s'imposent. En régime automatique, il conserve la possibilité d'enclencher préalablement les passages à niveau permettant des gains de temps, minimes mais fort appréciés en cas de retard des trains.

Toujours dans le souci de fiabilité du service, l'entier des installations ferroviaires est secouru tant pour les signaux que les aiguilles ou les passages à niveau. La capacité des accumulateurs autorise un fonctionnement d'une heure en l'absence de tension du réseau de distribution électrique. La cohérence existe avec les automotrices, qui sont équipées du groupe thermo-électrique de secours déjà cité et dont l'autonomie est également d'une heure. En cas d'arrachage de pantographe ou de la ligne de contact, ce groupe est mis en fonction sur ordre, pour faire face au problème.

Un dispositif d'arrêt automatique bloque tout train franchissant un signal sans y être autorisé, à des distances telles que l'arrêt est effectif avant le point de conflit. De même, des balises contrôlent la vitesse en ligne et aux points critiques, comme les entrées dans les terminus ou avant les branchements à faible vitesse. Ce contrôle s'effectue en plusieurs niveaux successifs de vitesse décroissante.

Les dispositifs de protection des 17 passages à niveau qui subsistent sont les suivants :

- 13 sont équipés ou en cours d'équipement de barrières automatiques ;
- 4 carrefours importants sont équipés d'une signalisation routière conventionnelle à feux tricolores. Ces derniers sont franchis à 40 km/h en marche à vue. Situés à proximité immédiate d'une station, il n'en résulte qu'une gêne très minime du fait de l'adaptation de la vitesse de trains. A terme, des barrières y seront également installées pour des motifs de sécurité ;
- la priorité absolue est bien entendu de règle.

La radio sol-train équipe tous les véhicules et, comme dans l'aviation, les «boîtes noires» sont de deux types. L'enregistreur des conversations radio, avec base temps, en est le premier élément. Accessoirement les conversations des téléphones du poste directeur sont également enregistrées pour permettre la reconstitution des événements et l'analyse des dispositions prises en cas d'accident ou d'incident grave.

Les «boîtes noires» embarquées sont l'enregistreur des franchissements illicites et des survitesses ainsi que le tachygraphe électronique multicritères. Le dépouillement des données enregistrées, au moyen d'un ordinateur ordinaire, permet de recréer la succession des événements et les actions du conducteur jusqu'à une précision du mètre et de la seconde.

Pour terminer cette description technique, relevons que la ligne de contact est alimentée par trois sous-stations. Une quatrième s'avère toutefois nécessaire (elle sera construite prochainement). Chaque installation alimentera donc 2 km de ligne. L'alimentation électrique étant également vitale, une télécommande informatisée secourue permet toutes les opérations d'enclenchement et de déclenchement ainsi que les couplages nécessaires en cas de problème d'alimentation.

Tableau 1. Ouvrages de génie civil sur la ligne du métro léger TSOL.

Types d'ouvrages	Longueur (m)	Longueur cumulée (1) m	%
Ouvrages souterrains			
tunnel	405		
tranchée couverte	260		
station couverte	220	885	(11.3)
Ouvrages en superstructure			
pont et viaduc	885		
station en pont	80	965	(12.4)
Autres ouvrages			
trémie	240		
mur ancré	340	580	
TOTAL		2 430	(31.1)

(1) Par rapport à la longueur totale (7,8 km).

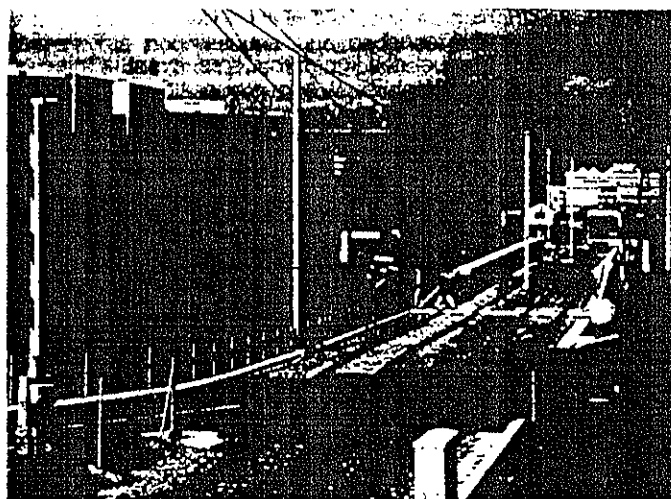


Fig. 4. "Les concepteurs du projet ont retenu, afin d'accélérer les échanges aux stations, le principe du plancher haut avec quais à niveau" (photo J.-P. Maeder).

2.4. Capacité de la ligne

La capacité d'une ligne dépend de nombreux facteurs.

- **La capacité des trains** est conditionnée par les stations dont les quais, d'une longueur de 65 m, ne peuvent accueillir que deux véhicules simultanément (62 m). Les dimensions des doubles rames permettent le transport de quelque 500 personnes. La limite de 5 places debout/m² a été admise comme permettant encore des échanges aux stations en des temps raisonnables. Au-dessus de cette valeur, phénomène parfaitement connu, les temps d'arrêt augmentent de manière rapide, provoquant un ralentissement de la marche de tous les trains et une diminution sensible de la capacité de transport de la ligne.
- **Les temps des trajets** de station à station dépendent de l'enveloppe des vitesses possibles sur le tronçon (rayon/dévers, passages à niveau) et des performances de traction et de freinage des véhicules. Pour ne pas dépasser les limites d'un confort moyen, les accélérations et décélérations usuelles ont été limitées à 1,3 m/s² (en urgence 3,2 m/s² en pointe) et les accélérations transversales à 0,7 m/s².
- **Les temps de marche**, sans les arrêts aux stations, sont de l'ordre de 15 minutes de terminus à terminus (31 km/h). Avec les 13 arrêts intermédiaires, le temps passe à 19 minutes (24,4 km/h). Une rotation complète s'effectue en 50 minutes. Remarquons que la durée moyenne des arrêts est basse, de l'ordre de 23 secondes, les portes restant ouvertes pendant 15 secondes environ. Enfin la cadence a été fixée à 10 minutes pendant la journée pour les premières années d'exploitation sur la base des prévisions de trafic (5 trains de deux automotrices en ligne).

Dès le début de l'exploitation, il s'est révélé que les prévisions de trafic étaient dépassées durant de brèves périodes, notamment celle de l'hyperpointe du matin. Certains trains quittent le terminus du centre avec 550 voyageurs à bord pour une capacité théorique de 500 places.

Le raccordement ouest à la gare CFF de Renens joue pleinement son rôle : un transfert de charge s'effectue progressivement sur cette station, les temps de parcours globaux étant identiques. La charge y est plus faible, le nombre maximal de voyageurs au départ de ce terminus étant de l'ordre de 450 par train.

Le reste de la journée, la réserve de capacité est importante, l'occupation moyenne s'établissant à 25 %. Une lente progression est toutefois perceptible.

Les résultats statistiques de la première année d'exploitation donnent un volume de 7,5 millions de voyageurs (27 700 par jour de semaine). Une fois de plus, il faut relever l'impact important d'un moyen lourd, fiable, sur la demande de transport.

Fig. 5. (ci-contre). Horaire à cadence de 7,5 minutes (6 convois).

Alors que le trafic annuel des lignes routières, avant la mise en service de la ligne, s'établissait à quelque 4,5 millions, son évolution brutale jusqu'à 7,4 millions signifie une croissance de plus de 60 % en quelques mois.

Une substantielle progression est encore possible. Pour ce faire, l'offre doit être adaptée avec une cadence portée à 7,5 minutes. La procédure d'acquisition de véhicules supplémentaires a été entamée pour faire face à un trafic de l'ordre de 10 millions de voyageurs par an.

Des essais de circulation à cadences renforcées de 7,5 et 5 minutes ont été réalisés. Profitant de la diminution de trafic de la période de vacances, il a été possible de mettre en œuvre, en traction simple, le nombre de trains requis pendant plusieurs heures.

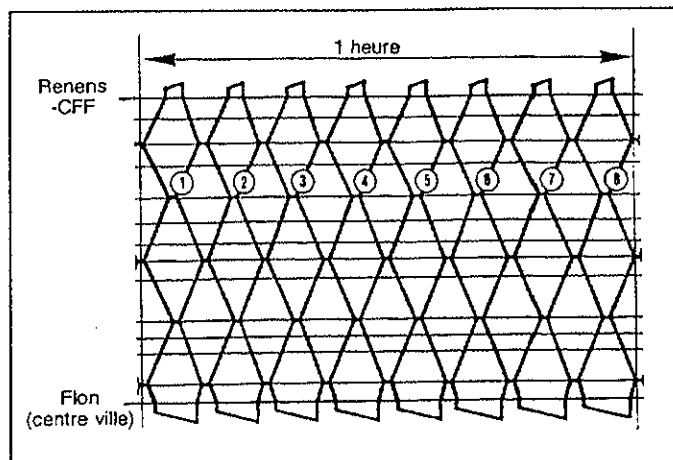
La cadence à 5 minutes est toutefois plus un exercice de style qu'un test en vue d'une exploitation réelle dans les conditions actuelles de la voie. Huit des dix stations en lignes étant utilisées pour les croisements, les trains doivent circuler en parfait synchronisme et le plus petit incident provoque l'arrêt immédiat de la ligne. Pour cette cadence, la mise en double voie de plusieurs tronçons sera donc impérative.

La cadence à 7,5 minutes ne pose pas de problème particulier mais semble être le maximum réalisable avec un minimum de garanties de fiabilité. Toute cadence autre qu'un multiple de 2,5 minutes est impossible avec les aménagements actuels.

Au terme d'une année d'exploitation, il est possible d'affirmer que la voie unique n'est pas, dans le cas de cette ligne, un handicap majeur. A l'exception des accidents de passages à niveau dont on peut espérer la disparition avec la pose des barrières, il faut convenir que peu de problèmes se posent en ligne, la majorité des perturbations intervenant en station (portes, etc.).

Tableau 2. Coût du projet et financement (en millions de francs suisses).

Coût du projet	Coût	%
Acquisition de terrains, droits et indemnités prestations en travaux	12,0	6,3
Infrastructure, ouvrages d'art, corps de la voie, stations, corrections routières, préparation des terrains, déplacements de conduites	91,6	47,7
Superstructure, ballast, rail, appareils de voie	9,8	5,1
Ateliers et dépôt	6,2	3,2
Installation pour la traction électrique, sous-stations et ligne aérienne	5,1	2,7
Installations de télécommunications et de sécurité, radio, installation de la sécurité ferroviaire et routière	9,8	5,1
Matériel roulant, 12 rames Bern 4/6, tracteur manœuvre, matériel de réserve et d'entretien d'ascenseurs	39,4	20,5
Objets mobiliers	1,2	0,6
Elaboration du projet, direction des travaux	16,9	8,8
TOTAL	192,0	100,0
Financement		
Confédération suisse	45,0	23,4
Etat de Vaud	102,2	53,2
Communes territoriales	21,5	11,2
Société TSOL et TL	23,3	12,2
TOTAL	192,0	100,0



2.5. Conditions de la fiabilité du système

Pour assurer la fiabilité du système, de multiples précautions doivent être impérativement prises à différents niveaux.

2.5.1. En matière de personnel et de technique

Grâce à une sélection rigoureuse, comprenant le vécu dans l'entreprise (c'est un réseau routier), divers tests et examens, il est possible de disposer de conducteurs fiables.

L'instruction prévoit une formation technique poussée de manière à permettre de faire rapidement face à diverses pannes (sans outillage), par mise hors service d'éléments défectueux et mise en œuvre de la procédure de secours.

L'assistance par radio permet de régler de nombreux problèmes.

En matière de technique, une philosophie de fonctionnement de secours a été suivie lors de la conception des équipements :

- groupe thermoélectrique des automotrices ;
- installations de sécurité totalement secourues ;
- redondance ou marche de secours pour les équipements particuliers (électronique de commande, hacheurs de puissance, pneumatique, etc.) ;
- centralisation des équipements du block automatique en deux locaux seulement pour simplifier les dépannages.

2.5.2. En matière d'exploitation

Les agents du poste directeur (régulateurs) restent attentifs à la marche des trains. Ils assurent aussi la gestion du métro à crémaillère et de deux lignes d'autobus en correspondance.

L'idée force de toute intervention est une mise en œuvre rapide, afin de minimiser la perturbation. Citons le cas d'un accident rail/route survenu le 16 avril 1992 sur un passage à niveau comprenant les circuits de sécurité d'un aiguillage adjacent et bloquant donc les trafics routier et ferroviaire :

- 13 h 17 : annonce par radio de l'accident (dégâts matériels seulement) ; transmission à la police, au service technique et au conducteur de réserve ;
- 13 h 20 : les emplacements sur chaussée sont marqués, l'automotrice recule en station, la voie opposée est libre, le train croiseur passe (croisement déplacé) ;
- 13 h 21 : un train de remplacement prend la marche du convoi accidenté ;
- 13 h 22 : la police est sur les lieux ;
- 13 h 26 : le train accidenté est dépassé par le train suiveur ;
- 13 h 30 : le train accidenté repart pour le dépôt ;
- 13 h 35 : service normal rétabli.

Grâce aux mesures énoncées, les perturbations n'ont été importantes qu'en quatre occasions (3 accidents graves de passages à niveau et un arrachage de ligne aérienne sur plusieurs centaines de mètres). Dans ces cas, d'une durée d'une heure environ, un service de bus de remplacement a été mis en œuvre pour relier les stations de part et d'autre de l'interruption.

La tenue de l'horaire peut être qualifiée de bonne, les heures graphiquées étant respectées à 2 minutes près dans 96,5 % des courses.

La fiabilité des véhicules et des installations doit donc être totale, mais l'exploitant manque de recul pour apprécier si le niveau

actuel pourra être conservé. Des portions de double voie seront nécessaires pour assurer une cadence à 5 minutes afin de permettre des croisements en pleine voie et conserver des possibilités de glissement entre les positions relatives des trains.

Le problème majeur d'une exploitation à voie unique à cadence élevée réside dans le vieillissement rapide des appareils de voie. Les services techniques doivent effectuer de nombreuses opérations de maintenance la nuit (00 h 30 - 05 h 00) ou éventuellement le dimanche, lorsque la cadence n'est que de 20 minutes. Il conviendra, après plusieurs années d'exploitation, de mettre en corrélation les coûts d'entretien et ceux d'investissement pour une deuxième voie.

3. Prévisions et premiers résultats de trafic

3.1. Méthodologie de prévisions

Les délais d'exécution de l'étude d'avant-projet n'ayant pas permis d'entreprendre une étude fondée sur une connaissance exhaustive du marché des déplacements dans le Sud-Ouest lausannois, une technique de prévision analogique a dû être développée. Elle s'est appuyée sur une transposition des comportements et caractéristiques de déplacement d'usagers lausannois bénéficiant d'une bonne desserte par transports publics. Quoique de très courte longueur, il a été jugé que le métro Lausanne-Ouchy (LO) offrait un service de qualité comparable à celui du futur métro léger. L'attractivité des stations du métro Lausanne-Ouchy a donc servi de base à la détermination des taux de génération de trafic des futures stations du TSOL. Pour les stations du LO, ce taux était de 1,1 voyage TC par habitant et par jour, soit un taux 1,5 à 2,5 fois plus élevé que celui observé ailleurs en région lausannoise.

Le trafic sur l'ensemble de la ligne projetée a été estimé en superposant les flux des trafics engendrés par chacune des 15 stations. Chaque station étant un cas d'espèce, son potentiel de trafic a été évalué en tenant compte d'un faisceau de paramètres dont les principaux sont :

- population et activités dans le "bassin-versant" de 400 m autour de chaque station en 1984 ;
- développement socio-économique présumé de chaque "bassin-versant" entre 1984 et 1995 se fondant sur les analyses de la Commission inter-communale d'urbanisme de la région lausannoise ;
- interconnexion des stations projetées avec d'autres lignes de transports publics, tel que le rabattement de lignes TL et la connexion du métro léger avec le réseau CFF, ainsi qu'avec les lignes de chemin de fer LO et LG et plus tard LEB.

Comme les paramètres ci-dessus n'évoluent pas de la même façon et avec le même degré de certitude, trois hypothèses de prévision ont été faites :

- l'hypothèse *minimale* ou de première année de mise en service ;
- l'hypothèse de *référence* correspondant au fonctionnement du TSOL «en vitesse de croisière» quelques années après sa mise en service ;
- l'hypothèse *maximale* regroupant l'ensemble des facteurs favorables au développement du trafic par transports collectifs dans le Sud-Ouest lausannois et en région lausannoise.

3.2. Premiers résultats de trafic du métro léger

Si l'on attend généralement la fin de la première année d'exploitation d'un nouveau moyen de transport pour obtenir des résultats fiables, les premières enquêtes livrent néanmoins des tendances très intéressantes. S'agissant de la phase de lancement, les résultats doivent toutefois être utilisés avec prudence, car le trafic est vraisemblablement en progression. La comparaison des prévisions de 1984 et des résultats globaux des enquêtes de 1991 ont fait l'objet du tableau 3.

La comparaison des trafics sur les lignes TL desservant l'itinéraire du métro léger avant sa mise en service avec le trafic du métro léger met en évidence une croissance de près de 110 % sur le seul métro léger, sans tenir compte des nouvelles lignes TL desservant le Sud-Ouest lausannois.

Toutefois l'élasticité offre-demande ne peut être déterminée compte tenu du fait que seul le trafic du métro léger est connu, alors que les trafics sur les lignes TL de rabattement n'ont pas encore été complètement recensés.

3.3. Des pointes de trafic atypiques

L'urbanisation aux abords des stations de métro léger, le développement des Hautes Écoles, le report de trafics délaissant un réseau routier surchargé ne vont-ils pas rapidement saturer la ligne ?

Cette question se pose déjà durant la demi-heure de 07 h 45 à 08 h 15 en gare du Flon. En effet, alors que la capacité "commerciale" des doubles rames est estimée par l'exploitant à 500 passagers, des relevés signalent des charges occasionnelles allant jusqu'à 560 passagers par double rame. La situation d'hyperpointe est aussi perceptible au terminal de Renens CFF, où des charges exceptionnelles du métro léger surviennent en cas de desheurement des trains CFF en correspondance (arrivée simultanée de deux trains).

La capacité en places assises, qui est de 550 voyageurs par demi-heure et par sens, n'est dépassée que durant une demi-heure par jour dans le sens Flon-Renens et durant une heure et demi dans le sens contraire, cela sur une partie de la ligne seulement. Ainsi ce n'est que durant 4 % de la durée d'exploitation journalière que l'offre en places assises est dépassée sur la partie la plus chargée de la ligne.

Le fait que la ligne TSOL relie un centre-ville à un pôle extérieur, fort générateur de trafic collectif, puis à un centre secondaire avec un terminal interconnecté au réseau ferroviaire CFF, engendre des flux de trafic dont les répartitions temporelles et spatiales sont atypiques. Les traditionnelles pointes de trafic en entrée de ville le matin et en sortie de ville le soir sont, dans le cas du métro léger TSOL, substantiellement plus faibles que les

Tableau 3. Prévisions de 1984 et trafic constaté en 1991 (première année d'exploitation)

	Prévisions 1984	Enquêtes 1991
Trafic annuel (millions de voyageurs)	6,5	7,4
Trafic journalier de semaine		
- hors période universitaire	20 000	19 600
- en période universitaire	25 400	27 700

pointes en sens inverse. Ainsi, à offre de transport égale, le métro léger dispose d'une capacité pratique supérieure aux lignes usuelles de transports urbains et régionaux grâce à sa forte sollicitation simultanée dans les deux sens.

3.4. Quelle capacité future pour le métro léger TSOL ?

Se fondant sur les premières enquêtes de trafic, notamment l'analyse des caractéristiques temporelles des flux directionnels, la capacité pratique de la ligne peut être provisoirement estimée comme suit.

- Maintien de la cadence à 10 minutes et horaires universitaires non modifiés. Le potentiel de croissance du trafic n'est que de 10 % compte tenu de la saturation de l'hyperpointe du matin, mais aussi des gains de trafic découlant de l'attractivité de la ligne hors période de pointe et hors période universitaire. La capacité pratique est fixée à 8,0 millions de voyageurs par année.

- Maintien de la cadence à 10 minutes et décalage des horaires universitaires. Le décalage d'une heure du tiers des cours (en raison de cours communs et des horaires CFF) concernerait les 70 % d'usagers des Hautes Écoles qui sont les plus forts utilisateurs du métro léger en période de pointe. Cet étalement de la pointe critique permettrait d'accroître la capacité pratique de la ligne de 15 à 25 %, portant le trafic annuel potentiel à 9,5 ou 10 millions de voyageurs.

- Cadence portée à 7,5 minutes avec horaires universitaires décalés. Cette extension substantielle de l'offre permettrait de porter la capacité pratique de la ligne à 11,5 ou 12,5 millions de voyageurs par année.

Ces trois estimations portent sur les évolutions possibles de la capacité pratique du métro léger TSOL et non sur la croissance du trafic, qui va dépendre du développement socio-économique et urbanistique du Sud-Ouest lausannois d'une part, et de l'évolution des conditions de transport et de circulation en région lausannoise d'autre part.

Les doutes à l'égard de l'attractivité d'un nouveau moyen de transport public, alors que la motorisation bat tous les records, ne sont pas fondés. Avec un trafic de première année dépassant de 14 % les pronostics, le métro léger apporte la preuve qu'un transport public de qualité peut capter un important segment du marché des déplacements. Avec 7,4 millions de voyageurs par an, le métro léger transporte deux fois plus de trafic que l'ensemble des lignes TL qu'il remplace. Le fait de disposer d'un transport public indépendant des aléas de la circulation routière et doté d'une importante réserve de capacité est un atout majeur pour le développement du Sud-Ouest lausannois et des deux Hautes Écoles : l'Université de Lausanne et l'École polytechnique fédérale de Lausanne.

3.5. Quels développements futurs des transports collectifs lausannois ?

Bien que cet aspect dépasse le cadre de cet article, il est opportun de citer les actions en cours, à l'étude ou envisagées.

La première action est le prolongement en cours de réalisation du chemin de fer régional Lausanne-Echallens-Bercher (LEB) de son terminal actuel de Chauderon, à 1 km du centre de Lausanne, vers la gare du Flon, gare terminale du métro Lausanne-Ouchy et du métro léger TSOL. Il s'agit d'une interconnexion de systèmes de transports collectifs en site protégé.

Non encore engagé, un autre projet figure sur la plupart des plans d'intention. Il s'agit de la rénovation du métro Lausanne-Ouchy (1,4 km) et de son extension à travers le centre de

	Date	Longueur	Coût
1. Tramway/métro léger			
Nantes, ligne 1 (S)	1985	10,7	18
Nantes, ligne 2 sud (S)	-	6,2	23
Nantes, ligne 2 nord (P)	-	5,1	32 ⁽¹⁾
Grenoble, ligne 1 (S)	1987	8,9	41
Grenoble, ligne 2 (S)	1990	4,7	35
St-Etienne, Prot. nord (S)	1991	2,2	29 ⁽¹⁾
St-Denis-Bobigny (S)	-	9,0	32
Strasbourg (C)	-	12,6	45
Rouen (P)	-	10,3	43
Lausanne-TSOL (S)	1991	8,0	24
2. Métro automatique léger			
Lille, ligne 1 (S)	1983	13,3	73
Lille, ligne 2 (S)	1989	12,1	78
Toulouse, ligne 1 (C)	-	10,0	86
Orlyval (S)	1991	7,2	48
3. Métro classique			
Lyon, lignes A, B, C (S)	1978	14,1	89
Lyon, ligne D (S)	1991	11,0	132
Marseille, ligne 1 (S)	1978	9,0	97
Marseille, ligne 2 (S)	1984	9,0	90
Paris, Météor (P)	-	-	225
(1) Matériel roulant non compris			

Tableau 4. Coûts comparatifs de lignes de transports collectifs urbains récentes (en millions de francs suisses/km).

Lausanne vers le centre hospitalier universitaire et l'autoroute de contournement de Lausanne. Pour cette ligne de plus grande pente, une technologie différente du métro léger est indispensable, compte tenu de déclivités dépassant 10 %. Le champ des technologies envisageables pour un tel tracé - technologies ayant dépassé le stade du prototype - est très limité. Parmi les systèmes potentiels, le transport automatique urbain à petites cabines tractées par câble, tel le système Soulé-SK, offre de grands avantages pour une ligne de 5 km desservant 12 à 15 stations sur une dénivellation de 315 m. Il s'agit du projet d'«Ascenseur urbain pour Lausanne».

3.6. Extensions du TSOL

Divers projets de prolongements existent ou sont à l'étude. Certains tracés sont déjà inscrits dans l'inventaire cantonal tels les prolongements du métro léger à l'ouest et à l'est de l'agglomération lausannoise, pour transformer la ligne radiale de 8 km en une diamétrale de 12 km traversant toute l'agglomération par le centre.

L'une des possibilités est l'utilisation de lignes ferroviaires existantes dans l'Ouest lausannois, dont des voies industrielles alimentées en tension de 15 000 V des CFF.

Un essai de démonstration a été entrepris en septembre avec deux automotrices bi-tension prêtées par les transports en commun de la ville de Karlsruhe. Ces véhicules commutables en ligne, au gabarit TSOL, sont passées avec succès d'un réseau à l'autre. En raison du coût de tels véhicules, il a été imaginé de mettre en œuvre des wagons techniques de conversion de tension venant s'intercaler entre deux automotrices. Outre des investissements d'acquisition plus faibles, l'avantage d'une telle solution serait de permettre aux automotrices actuelles de pouvoir circuler sur le réseau à 15 000 V. La volonté des Chemins de fer fédéraux (CFF) de ne pas s'impliquer dans les transports locaux permet de prédire une bonne chance de succès à une telle réalisation.