

Codatu VII
New Delhi, 12-16/2/96

**DU METRO À SES VARIANTES :
LEÇONS MEXICAINES ET AUTRES**

Etienne Henry
Directeur de recherche
Inrets/Dest

Francis Kühn
Ingénieur de recherche
Inrets/Estas

Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité

Département économie
et sociologie des transports
2 avenue du général Malleret-Joinville
BP 34, 94114 Arcueil cedex, France
Fax [33] (1) 45 47 56 06
E-mail : henry@interurba.rio.org

Évaluation des systèmes de transport
automatisés et de leur sécurité
20 rue Elisée Reclus
59650 Villeneuve d'Ascq, France
Fax [33] 20 43 83 59
E-mail : kuhn@inrets.fr

1. L'ANALYSE RÉTROSPECTIVE DES VARIANTES

Les termes du débat sur les systèmes ferroviaires de transport de masse évoluent, notamment dans les recommandations adressées aux villes en développement par les organismes internationaux (World Bank, 1986, 1995). Tout en reconnaissant l'importance d'un métro pour le développement urbain, économique et social (Ice, 1990), on adapte ce concept aux besoins et possibilités locales. D'une ville à l'autre, les variations sont nombreuses et ce que l'on appelle ici un métro peut être considéré là comme un train urbain (à Recife, et inversement à Medellín), ou comme un Rer (au Caire) ; un métro léger (tel celui de Guadalajara) peut atteindre des capacités dignes d'un système classique, butter contre ses limites (à Manille) ou s'apparenter au tramway moderne (à Tunis). Au delà des taxinomies, il existe des différences substantielles entre ces équipements, en termes d'infrastructures (au sol, aériennes ou souterraines), de matériel roulant (véhicules accouplés, rames ou trains, à roulement pneumatique ou métallique), de guidage (plus ou moins automatisé), de site (banal ou propre) et autres dimensions, qui ont toutes une incidence finale sur trois séries de variables : les fonctions, les capacités et les coûts du système.

On peut grossièrement dire que les fonctions varient suivant qu'il s'agit de dessertes centrales ou périphériques de la ville, et selon la taille de celle-ci. Les capacités dépendent de la demande, actuelle et future. Et, en résultante, les coûts sont plus ou moins élevés, dans une gamme qui varie de un à dix pour l'investissement et de un à cinq pour l'exploitation (Fouracre & al., 1990) ; si tant est qu'on puisse les comparer, exercice bien périlleux à de nombreux points de vue, qu'il s'agisse de la technologie, de l'urbanisme, de la construction, du financement ou de l'exploitation. On était classiquement habitué à trois grandes familles de systèmes, celle du métro urbain desservant les zones denses avec une capacité variant entre 10 000 et 40 000 places offertes par sens en heure de pointe, celle du train régional sillonnant les banlieues (de 50 000 à 75 000 p/h/s) et celle du tramway (entre 5 000 et 10 000 p/h/s) pour les demandes plus faibles (Vuchic, 1988). On voit maintenant apparaître des hybrides qui dérivent de l'une de ces familles en empruntant des caractéristiques d'une autre. Cette évolution mérite qu'on examine les caractéristiques de ce qui reste généralement dénommé comme du métro, ou ses variantes au sens du dictionnaire :

"Variante : 1. Chose qui diffère légèrement d'une autre de la même espèce ; 2. Différence ou ensemble des différences que présente une réplique ou un projet nouveau par rapport à l'œuvre ou au projet premiers". (*Le petit Larousse*, édition 1993).

Le premier sens de cette définition convient à l'expectative que se font la plupart des villes en développement entreprenant l'implantation d'un système qu'elles voudraient, aux moindres moyens, le moins différent possible d'un métro. Le second sens met en avant les résultats, les mérites et limites de ce qu'on a pu construire et les divergences que présente la réalisation par rapport aux expectatives. Il invite aussi à observer le processus de variation d'un projet au cours de son implantation, forcément longue dans le cas d'un métro.

Ce double sens est présent dans la démarche d'évaluation a posteriori. On l'appliquera ici à la ville de Mexico qui, malgré des difficultés de tous ordres, a toujours voulu se doter d'un métro au sens le plus strict du concept. Elle a progressivement été obligée d'introduire des variantes de plusieurs genres, voire de laisser émerger des réalisations qui s'écartent notablement du projet initial. Le système ferroviaire implanté garde les caractéristiques essentielles d'un métro urbain, bien que les dimensions spatiale et démographique de cette mégapole aient fait évoluer les spécificités tantôt vers du train régional, tantôt vers du métro léger, sans qu'aucune réalisation ne réponde à ces dénominations. Il est possible de tirer des leçons de cette expérience, moins du fait de son exemplarité (Parpillon & Laraufige, 1992 ; Balat & Vince, 1990) que parce qu'elle permet de mettre en rapport des réalisations dont les variables externes sont contrôlées, ce qui est rarement le cas dans les comparaisons internationales (Henry, 1987a). Il n'est pas dans nos intentions de dresser ici un bilan de ces réalisations, mais de contribuer au débat en extrayant d'une masse de données rassemblées pour des études spécifiques quelques éléments d'appréciation de cette expérience, de la plus grande ampleur dans les villes en développement sans pour autant être la mieux connue.

2. VINGT-CINQ ANS DE CONSTRUCTION DU MÉTRO DE MEXICO

Depuis 1967, la ville de Mexico s'est dotée d'un système de transport ferroviaire urbain moderne qui atteindra bientôt deux cents kilomètres : on parle d'une prouesse, sur le plan technique dans la mesure où on avait longtemps pensé que les mauvaises conditions du sous-sol de la cuvette lacustre de Mexico s'opposaient à l'implantation d'un métro : les séismes de 1985 n'ont pas affecté l'infrastructure souterraine flottante qui a été conçue pour affronter ces problèmes (Navarro, 1994). Mais aussi, prouesse sur le plan économique, aucun autre pays n'ayant construit en un quart de siècle un système d'une telle portée, puisqu'il est aujourd'hui le cinquième métro au monde en extension (il a fallu plus d'un siècle à Paris pour achever ses deux cents kilomètres de métropolitain). Cette réalisation correspond aux efforts assumés par la nation mexicaine dans son ensemble, dus au statut du District fédéral et à la taille de l'agglomération de Mexico (estimée à 6,3 millions d'habitants en 1965 sur une aire de 372 km², et à 15,6 millions pour 1 250 km² en 1990, selon des chiffres officiels en dessous de la réalité). Elle est aussi l'œuvre d'un puissant groupe d'ingénierie civile mexicaine (le consortium Ica -principal contractant des ouvrages publics mexicains et présent jusqu'aux États Unis- et une vingtaine d'entreprises de Btp et d'équipements directement ou indirectement associées). Elle est enfin le résultat d'un vaste projet de coopération internationale, associant notamment, pour l'électromécanique, la signalisation et le matériel roulant, une soixantaine de sociétés françaises, derrière la Sofretu, le groupe Alsthom et la Bnp, sous couvert d'une imposante aide gouvernementale au développement (un vingtième du montant total des prêts bonifiés et dons publics accordés par la France aux États étrangers en trente ans). Neuf lignes sont aujourd'hui exploitées par une compagnie publique, le Stc-métro ; une dixième, dite de train léger, reliquat modernisé des lignes de tramway qui ont été remplacées par du métro, est exploitée par le Ste qui gère aussi un réseau de trolleybus. Partant d'un objectif affiché de dix kilomètres par an, les Mexicains sont donc arrivés à en construire en moyenne 7,4 kilomètres l'an, jouant un rôle pionnier en Amérique latine (Figuroa & Henry, 1987a, 1991a & 1991b). Selon la courbe accidentée de la figure 1, on voit une progression impressionnante des lignes mises en service dans les trois premières années, puis un palier de stagnation, une reprise de la croissance accélérée dans les années quatre-vingt suivie par une évolution plus irrégulière. La construction d'une ligne durant en moyenne deux à trois ans, ces inflexions reflètent des choix antérieurs et expriment la politique de métro, appliquée avec des variations notoires au cours de son processus de construction.

Figure 1
Évolution du réseau ferroviaire
urbain de Mexico 1969-1994

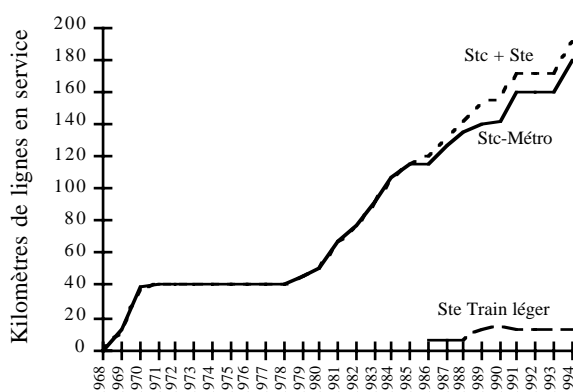


Tableau 1

Métro de Mexico, phases d'implantation			
Phases *	Lignes en chantier	Linéaire construit	Voitures acquises
I (1967-76)	1, 2 & 3	42 km	882
II (1977-84)	(ext. 1, 2 & 3) 4, 5, 6 & 7	73 km	932
III (1985-88)	(ext. 6 & 7) 9	25,5 km	428
IV (1987-94)	8 & A Train léger	49,5 km	267
1967-1994	(avec LA & TL) 10	190 km	2 509

* Périodisation Inrets

Sources : Figuroa & Henry; 1987a, Henry : 1988 & 1994

Le tableau 1 résume les étapes d'implantation du métro de Mexico, autour d'un projet de base homogène et pérenne, mais avec des variations significatives concernant le tracé du réseau, les infrastructures et équipements, la production du matériel roulant et la portée métropolitaine des dessertes. Ce sont pas des périodes proprement dites et les variations ne suivent pas toutes un ordre chronologique. On peut les résumer en quatre phases, suivant une logique qui correspond à trois séries de facteurs : la conjoncture économique et la

capacité d'endettement du Mexique, la succession de cinq sexennats présidentiels et la croissance urbaine et les politiques de transport appliquées.

Entre 1967 et 1970, c'est par du "clefs en mains", procédant de relations directes entre le Stc, Ica et les sociétés associées à la Ratp, qu'on a construit un premier faisceau de trois lignes, soit 42 kilomètres essentiellement en souterrain, desservant le centre ville selon un tracé dit en anneau ; elles ont connu dès le début un franc succès de fréquentation et à la fin de cette phase le métro se taillait une part de marchés de l'ordre de 12% des transports de la ville, ce qui montre tant la justesse du tracé que l'ampleur des retards accumulés en matière de transports en commun ; selon une option de roulement pneumatique, de pointe mais qui s'est avérée par la suite un peu limitative du point de vue des capacités (Coindet, 1989), tous les équipements et le matériel roulant (neuf cent voitures) étaient alors importés, la part mexicaine se limitant à 65% de l'ouvrage, essentiellement le génie civil et quelques équipements de base.

Pendant une seconde phase, qu'on peut qualifier de "substitutive", les investissements de transport se sont portés sur les infrastructures routières (anneau périphérique et vingt axes transversaux) et une longue stagnation de la construction du métro provenait de ce qu'on acceptait moins la dépendance technologique et industrielle pour l'acquisition du matériel roulant qu'on augmentait substantiellement ; puis, de 1977 à 1985, ce fut la relance par la prolongation des trois lignes existantes et surtout par l'ouverture de quatre autres encadrant la ville à l'est, à l'ouest et au nord ; au total, 73 kilomètres de lignes furent construites, avec de larges sections en surface ou en aérien, et dotées d'un petit millier de véhicules, produits pour moitié localement sous licence ; le Département du district fédéral se dotait d'un puissant maître d'ouvrage délégué, la Covitur, en relation directe avec la banque nationale de développement Banobras et en interface avec les chefs de file des fournisseurs étrangers, essentiellement français, selon un dispositif institutionnel durable.

Une troisième phase, plus "critique", amenait, malgré l'aide renouvelée de la France, à revoir la programmation en ajustant le rythme de construction du métro aux possibilités réelles du pays et à renforcer l'appropriation locale de la technologie des équipements de roulement par une politique dite de "mexicanisation" ; la part d'intégration nationale s'élevait alors à 85% ; si les lignes de la phase antérieure ne connaissaient pas le succès des trois premières, il fallait les prolonger jusqu'aux limites du District fédéral et la ligne 9 devait résorber les excès de fréquentation sur le faisceau central ; vingt-six kilomètres de lignes étaient ainsi mis en service, avec plus de 400 voitures en partie produites par le constructeur national Concaril, qui connaissait cependant de telles difficultés qu'il fallut importer des rames du Canada (cette société publique fut ultérieurement vendue à Bombardier).

Une phase "alternative" lui succédait. En effet, au milieu des années quatre-vingt, la crise de la dette mexicaine altérait les rapports entre l'État fédéral et l'agglomération de Mexico : ainsi, la quatrième phase a été marquée par l'introduction de variantes importantes au système ; on a cherché à développer des alternatives plus légères, à récupérer des emprises existantes, à étendre le réseau vers la périphérie et à passer au roulement métallique et à l'alimentation électrique par caténaire ; si l'on a maintenu l'exécution de la ligne 9, conformément à la programmation initiale et aux engagements pris avec les fournisseurs français, on a entrepris deux réalisations alternatives, classées sous le terme de "métro léger", la ligne A dite métro de fer et le tramway rénové du Ste, dit train léger. Au total, une cinquantaine de kilomètres de lignes de métro et de tramway ont été construits ou rénovés dans cette phase, avec une dotation d'à peine trois cent voitures, produites localement pour les métros légers mais à nouveau importées (d'Espagne) pour les rames sur pneumatique.

Plus que la volonté de s'engager dans la recherche technique de systèmes de transport intermédiaire, ce sont donc des raisons financières qui ont obligé les Mexicains à introduire des variantes au métro. Dans les années fastes de l'exportation pétrolière, le pays contractait des emprunts à l'étranger pour financer des investissements publics, notamment des

infrastructures urbaines parmi lesquelles le programme du métro de Mexico était de la plus grande envergure (à côté de la construction de voirie et du drainage en profondeur).

Figure 2
Dette extérieure publique mexicaine
1970-1992

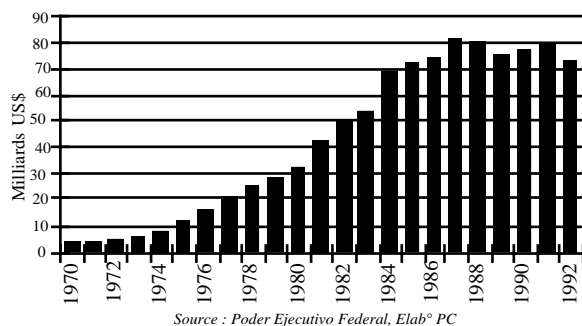
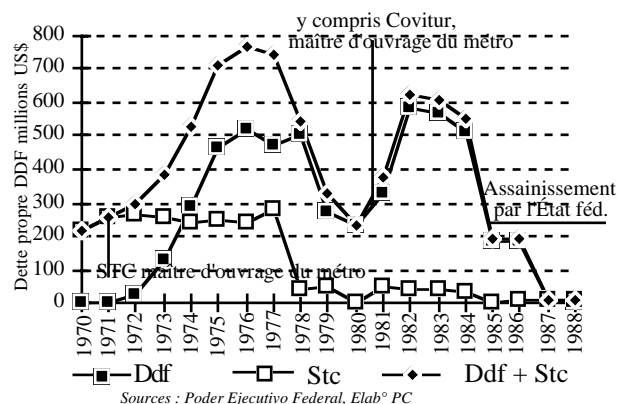


Figure 3
Impact du métro sur la dette du DF 1970-88



La situation s'assombrit dans la décennie quatre-vingt et, en 1987, le solde de la dette extérieure publique mexicaine accusait un déficit record de 80 milliards de dollars (figure 2). La renégociation de cette dette avec le club de Paris permit de mettre un terme à son ascension vertigineuse, au prix de lourdes mesures d'ajustement structurel et d'une réduction substantielle des programmes de grands travaux. Le financement du métro étant à charge du District fédéral, ce département au gouvernement directement délégué par l'État central a connu un endettement similaire à celui de la nation (figure 3) : une limite était atteinte à la fin des années soixante-dix, raison pour laquelle on accélérât la mexicanisation et on privait la compagnie exploitante, le Stc, de la maîtrise d'ouvrage du métro. Cette fonction revenait depuis 1981 à la Covitur, directement rattachée au Ddf et dont 80% du budget d'investissement en transport était consacré au métro. L'endettement du District fédéral connut alors une nouvelle croissance, due à la relance du programme d'investissement en métro, au point qu'il fallut en 1985 une nouvelle intervention de l'État central pour assainir les finances du Ddf. Depuis 1987, on devait trouver des alternatives permettant de maintenir le rythme de construction du métro avec un moindre recours à l'endettement extérieur : c'est l'époque du "métro léger" et des redéfinitions de son projet. Le redressement qui a suivi cet assainissement a permis de reprendre d'autres projets relégués au plus fort de la crise, notamment la ligne 8 qui, après des avatars, fut mise en chantier lorsqu'au début de l'actuelle décennie la situation économique du pays s'améliorait.

Importation clefs en mains, substitution technologique, moments critiques de l'endettement et recherche d'alternatives plus légères sont des phases qui illustrent parfaitement les divers aspects de l'implantation de métros dans les villes en développement. À Mexico, malgré des suspensions de travaux en 1972-77 et en 1987, les tensions n'ont pas entraîné l'arrêt de la construction, comme c'est souvent le cas : l'aide financière française, maintenant close par l'entrée du Mexique à l'Ocde, a eu un effet stabilisateur. Mais des variations importantes ont scandé le processus d'implantation. Bien que tout au long de ce processus ait prévalu l'idée de doter le système de transport de Mexico d'une "épine dorsale", le réseau octogonal quadrillant le District fédéral, dotée d'imposantes stations d'échange avec les autobus aux nœuds de contact avec les zones résidentielles et industrielles de l'État de Mexico.

Cette option qui, selon la dernière version du programme de Covitur, devrait aboutir en l'an 2010 à 460 kilomètres de lignes, est celle d'un métro urbain à forte capacité : avec quelque quatre millions et demi de passagers transportés par jour, le métro de Mexico se situe au quatrième plan mondial du point de vue de la fréquentation, même si, selon la récente enquête origine-destination, il ne contribuerait que pour 13,4% à la répartition modale des déplacements de l'ensemble de l'agglomération. Voilà bien un résultat paradoxal des systèmes de transport de masse dans les villes en développement, dont le rythme de

croissance, même aussi accéléré qu'à Mexico, n'atteint jamais celui de l'urbanisation (Henry, 1987). C'est bien à ce plan là que doivent être évaluées les variantes du métro.

3. L'IMPLANTATION ÉVOLUTIVE DU RÉSEAU DE BASE DE MEXICO

La conception de base qui a guidé les trois premières phases était bien celle d'un métro urbain classique, avec les spécifications techniques propres au site, l'option prise en termes de matériel roulant (voitures à roulement pneumatique à l'image des récentes innovations parisiennes) et à la volonté d'adopter des technologies de pointe pour les équipements électromécaniques. Il s'agissait d'atteindre des capacités de l'ordre de 60 000 places en heure de pointe ; effectivement, sur certaines lignes on peut atteindre la limite technique de 95 secondes entre deux rames (en fonction du système de pilotage utilisé).

En matière de génie civil, les grandes options techniques procédaient du choix du système de transport guidé en site propre intégral dans un centre urbain dense avec un matériel roulant sur pneu supportant des pentes et des courbes supérieures à celles du roulement métallique. On a donc recherché des solutions dénivelées par rapport à la circulation générale, ou au sol lorsque cela était possible pour diminuer les coûts et les délais de réalisation. Quatre options de génie civil ont été développées dans les trois premières phases : en souterrain, la tranchée couverte dans les zones centrales, notamment pour l'essentiel des premières lignes ; la plateforme superficielle quand on disposait de vastes avenues avec un terre-plein central assez large ; le viaduc aérien en traversée de zones moins sensibles, pour éviter les interférences de réseaux ou sur les flancs de collines, comme pour toute la ligne 4 ; et le tunnel profond foré au bouclier à environ trente mètres quand le sous-sol l'exigeait, pour une partie de la ligne 7. Pour diminuer les coûts de génie civil, en bonne partie dus à la construction des stations, les interstations allaient en augmentant au fur et à mesure que l'on s'éloignait du centre (de 800 à plus de 1 500 mètres). Et parmi la vingtaine de stations de correspondance, deux sont triples et une quadruple, véritable nœud d'engorgement du système à la périphérie orientale. Ainsi, les investissements totaux moyens ont-ils tourné autour de soixante millions de US\$ actuels par kilomètre, ce qui situe le métro de Mexico dans le tiers inférieur de la fourchette mondiale de coûts de construction, qui varie de un à dix selon les sites et les estimations (Armstrong Wright, 1986 ; Fouracre & al., 1987 ; Hugonnard, 1990). On remarquait que l'option au sol était un ouvrage relativement coûteux en raison des déviations de réseaux, des passages dénivelés aux carrefours avec la circulation générale et des nombreuses passerelles piétonnières pour pallier les effets de coupure des quartiers traversés. Ainsi, en ce qui concerne le seul génie civil, le coût des ouvrages au sol n'était que de 5% inférieur à celui de la tranchée couverte. Par contre, l'option aérienne était un quart plus onéreuse que celle au sol, et celle en tunnel de grande profondeur un tiers en dessus. En considérant que le génie civil représente la moitié de l'investissement, ces différences de coût entre types d'ouvrages s'estompent.

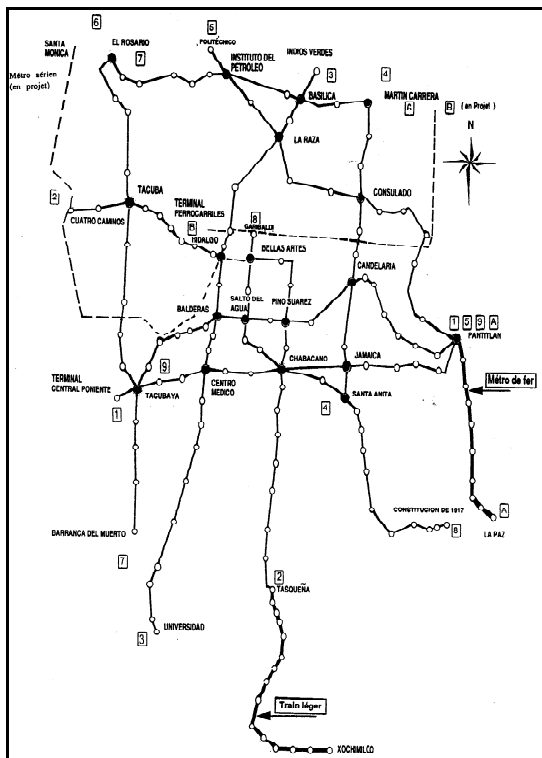
Tableau 2

Caractéristiques du réseau de Mexico					
Lignes n°	Linéaire km	Stations nombre	Rames nb.	Interval. h.p. sec.	Site dominant
1	19	20	37	115	Tunnel
2	24	24	38	130	Tun./Surf.
3	24	21	40	125	Surf./Tun.
4	11	10	7	350	Viaduc
5	16	13	13	260	Surf./Tun.
6	15	11	8	350	Tunnel
7	14	14	14	260	Tunnel

Figure 4

Réseau ferroviaire urbain de Mexico en 1995

8	20	19	28	165	Surf./Tun.
9	16	12	18	170	Viad./Tun.
A	17	10	18	170	Surface
Métro	176	154	221		
Tr. lég.	13	14	17	240	Surface
Ensemble	189	168	238	Sources: Stc, Ste	



Le matériel roulant était donc composé de rames de six à neuf voitures à roulement pneumatique, d'une façon homogène pendant les trois premières phases du métro. Les trains furent d'abord directement importés de France. Puis on commença à les produire localement sous licence, avec importation ou production intégrée de composants. Le rythme de la production ne suivant pas celui de la construction, il fallut encore en importer 200, du Canada. Et le retour au monopole national alla de pair avec certaine diversification des achats à l'extérieur, vers le Japon et l'Allemagne notamment. Au total, près d'un millier de voitures ont été produites au Mexique, avec un degré d'intégration nationale de 76% à la fin de la troisième phase.

Si la voie et l'alimentation électrique étaient produits localement, tout ce qui concerne l'équipement électromécanique a dû être importé : commande centralisée (deux postes de commande), pilotage automatique, signalisation, téléphonie et communications, ainsi que d'autres équipements de pompage, d'éclairage, de ventilation, de sonorisation et les tourniquets de péage automatique et escaliers mécaniques. L'électromécanique dans son ensemble ne devait pas souffrir du moindre handicap technologique et, dans un domaine de faible connaissance locale, il n'a pas été réalisé de véritable transfert technologique. Ainsi peut-on estimer à 17% la participation de sociétés françaises entre 1967 et 1994.

Au cours des trois premières phases de la construction du métro de Mexico, la principale variation a donc été celle liée au remplacement d'un système clef en mains par une intégration nationale croissante, depuis l'ingénierie jusqu'aux bogies. Sur le plan du réseau (figure 4), le premier faisceau a été étendu aux limites de l'aire centrale de l'agglomération, avec plus ou moins de succès selon les lignes.

4. INTRODUCTION DE VARIANTES À L'ÉPINE DORSALE DE MEXICO

Dans la quatrième phase d'implantation du métro de Mexico, d'importantes variantes d'ordre financier, technologique, institutionnel et urbanistique ont été conçues depuis la mi 80 dans le système de base. Produire du métro moins coûteux est un objectif qui s'imposait à l'heure de la crise financière que traversait le pays et quand il était temps d'investir aussi dans l'implantation de systèmes ferroviaires de transport de masse dans des agglomérations de province dont les besoins avaient été sacrifiés au bénéfice de la capitale. Sur le plan technique, on chercha des alternatives au métro urbain classique en explorant du côté de ce qui est mondialement dénommé "métro léger". Au niveau institutionnel, on voulut diversifier les composantes internationales et nationales de la production de systèmes ferroviaires urbains et mieux répartir l'investissement entre les différentes entreprises publiques de transports. Enfin, se posait la question de la couverture de zones excentrées de l'agglomération, jusqu'ici maintenues à l'écart selon la conception dominante d'une colonne vertébrale réduite à la région centrale circonscrite aux limites du District fédéral, lequel ne comportait plus que la moitié de la population de la mégapole.

Cette phase (au cours de laquelle s'ajoutent deux systèmes implantés à Guadalajara et à Monterrey) est donc marquée par trois réalisations à Mexico : la ligne 8, de métro classique à roulement pneumatique, aux deux tiers en tunnel et un tiers au sol, dotée d'un nouveau système de pilotage (le Sacem, produit par Matra pour le Rer parisien, introduit à Mexico à partir de la ligne A) et deux lignes dites de "métro léger", entièrement en surface et de moindre capacité, avec roulement métallique et assurant le rabattement vers le système de base. La conception et l'implantation du métro léger ont fait l'objet d'importantes discussions locales et négociations internationales et les deux lignes résultantes ont été construites et redéfinies au long d'un processus accidenté, comportant des interruptions de chantiers au plus fort de la crise fiscale du Ddf.

Le "train léger" est une ligne produite pour le Ste, compagnie publique délaissée dans les phases antérieures d'implantation du métro. Sur un linéaire de 13 kilomètres, il relie au réseau de métro, dans sa station extrême sud, la commune de Xochimilco, zone de classes moyennes maintenant intégrée à l'agglomération de Mexico. C'est une ancienne ligne de tramway en site propre, comportant une dizaine de carrefours à niveau et une longueur moyenne d'interstation d'un kilomètre. Elle a été rénovée en deux étapes, la première se réduisant à couler en béton une voie en site protégé et à y affecter du matériel rénové, la seconde consistant à refaire la voirie sur un site mixte et à produire du matériel roulant neuf. Elle est aujourd'hui desservie par 17 véhicules à deux caisses, alimentés par caténaire, avec un système d'exploitation type tramway. Sa capacité actuelle, de 5 000 places offertes par direction à l'heure de pointe, pourrait doubler après achèvement de la réhabilitation du site et si la concurrence effrénée des modes routiers était mieux régulée.

Le "métro de fer" est devenu la ligne A du Stc-métro, bien qu'elle s'écarte de son schéma directeur. Sur un linéaire de 17 kilomètres, il relie à un imposant terminus d'échange avec trois lignes du métro urbain les banlieues populaires du sud-est de l'agglomération et la commune de La Paz, hors du District fédéral puisque 4,5 kilomètres pénètrent dans la juridiction voisine, l'État de Mexico. S'écartant de l'idée originale d'un métro léger, le métro de fer a été implanté en site propre exclusif de surface sur la berne centrale de l'artère de sortie de Mexico en direction de Puebla, occasionnant l'aménagement conséquent de la voirie routière et la construction d'ouvrages de traversée. Avec une longueur moyenne d'interstation de 1 900 mètres, il longe au sud, sans la desservir, la plus importante urbanisation populaire de Mexico (Nezahualcoyotl, 2,5 millions d'habitants) et atteint le début de la nouvelle zone de croissance (la vallée du Chalco). La ligne A est aujourd'hui exploitée avec vingt trains de six voitures à roulement métallique, à alimentation électrique par caténaire. Elle dispose d'un poste de conduite centralisée autonome et s'est vue dotée d'un système d'exploitation très performant qui lui permettrait d'atteindre des intervalles de 105 secondes. Sa capacité actuelle a un régime potentiel de 15 000 places offertes par direction à l'heure de pointe ; cette offre pourrait quadrupler, en doublant le nombre de trains, si la demande le justifiait et n'était pas

aussi absorbée par l'offre de transport routier qui s'est déployée sur les voies latérales de l'avenue Zaragoza entièrement rénovée.

Le train léger et le métro de fer correspondent-ils au critère selon lequel ils ont été conçus, à savoir du métro léger, et introduisent-ils dans le système ferroviaire urbain de Mexico des alternatives de capacité intermédiaire ? Du point de vue du site, certes oui, puisque ces deux lignes sont en surface, reprenant des emprises existantes, et sortent de l'aire centrale dense. Dans le premier cas, on est partiellement au niveau de la circulation générale avec carrefours, alors que dans le second on est en site protégé intégral. La réponse est moins claire en ce qui concerne le matériel roulant, bien que les deux soient à roulement métallique et produits localement avec des composants allemands, japonais, français et américains. Le train léger est typiquement du tramway, alors que les rames du métro de fer s'apparentent à du métro classique, hormis l'alimentation électrique. Commande et exploitation diffèrent radicalement d'un système à l'autre, puisque le train de fer est doté des équipements minimaux correspondant à un tramway, avec des intervalles de trois minutes, alors que le métro de fer est équipé d'un système d'exploitation calibré pour des dessertes régionales. D'où des capacités théoriques qui varient énormément : prévu pour 35 000 places offertes par sens en heure de pointe, le train léger déborde les limites admises du tramway moderne, alors que le métro de fer peut atteindre 60 000 places offertes par direction, ce qui le situe clairement dans la gamme des métros. Et pourtant, dans l'état actuel de leur exploitation, avec 5 000 places offertes par direction en heure de pointe pour le premier et 15 000 pour le second, ils correspondraient à des systèmes intermédiaires pour les villes en développement.

En comparaison, on peut prendre pour référence les deux autres réalisations mexicaines inspirées aussi du concept de métro léger. La première ligne de Guadalajara (2,5 millions d'habitants, dans l'État de Jalisco) soit 15,5 kilomètres dont 6,5 en tunnel, est exploitée par 16 rames similaires à celles du train léger de Mexico et est prévue pour une capacité théorique de 18 600 places offertes par sens en heure de pointe, bien qu'elle soit aujourd'hui exploitée à un régime de 4 100. Et la première ligne de Monterrey (capitale de la frontière nord, 3,5 millions d'habitants), sur 17,5 kilomètres en viaduc, avec 25 rames produites localement selon le même prototype que le métro de fer de Mexico et celui de Guadalajara, a une capacité théorique de 40 000 places offertes par sens en heure de pointe et un régime actuel de 10 000. Dans ces quatre cas de figure, les variantes introduites par rapport au métro classique portent donc plus sur la progressivité des dotations en équipements et en matériel roulant que sur les capacités théoriques, calibrées selon des normes beaucoup plus élevées que celles du métro léger européen. Reste à comparer les montants unitaires d'investissement en métro, dans ses différentes variantes, si la contrainte de cette quatrième phase impliquait de réduire notablement les coûts d'investissement.

5. ÉVOLUTION DES COÛTS DE CONSTRUCTION MEXICAINS

Le débat portant sur les métros dans les villes en développement s'arrête souvent aux considérations financières : à quelle hauteur peut-on estimer le coût d'implantation de ce genre d'opération et quelles sont les variations suivant les expériences et les types de systèmes implantés ? Nulle part, on ne connaît à science sûre le coût d'un métro, dont l'implantation s'étale sur plusieurs décennies, avec des sources de financement multiples, et fait intervenir un grand nombre de fournisseurs et entreprises de services. Les comparaisons internationales sont extrêmement difficiles, chaque système ayant ses caractéristiques propres, les modalités et rythmes de construction variant beaucoup et les estimations fluctuant selon les variations monétaires des devises locales et internationales. Ceci relativise la portée de l'exercice risqué qui consiste à estimer et présenter des ordres de grandeur de coûts d'investissement relatifs à différentes variantes, même quand on part de l'expérience relativement homogène du système ferroviaire de Mexico.

En moins de trois décennies, l'État mexicain a investi dans la construction du réseau ferroviaire urbain de Mexico l'équivalent actuel de près de douze milliards de dollars US, selon des chiffres que nous avons pu établir et contrôler à partir de plusieurs sources

directes, mexicaines et françaises (60 milliards de francs, avec un degré de fiabilité de 5%), équivalant en 1994 à près de 3,5 % du produit intérieur brut, à environ 9% de la dette totale extérieure du pays et à 15% de la dette publique). Ce chiffre n'inclut pas les frais financiers, sachant que le quart de la facture totale de cette infrastructure de transport a été financé sur crédits extérieurs. Sur le plan économique, la validité de cet investissement n'est pas en cause : elle a notamment été ratifiée par le calcul du taux de retour de l'investissement selon un modèle élaboré pour les métros des pays en développement (Allport & al., 1990). Sur le plan social, cet investissement peut être rapporté aux 85 millions de Mexicains qui supportent cet ouvrage de priorité nationale, aux seize millions d'habitants de la capitale ou aux sept millions résidant dans les limites du District fédéral auquel le système est presque totalement circonscrit (bien que le tiers de ses usagers provenant de l'État de Mexico). Mais le montant global du capital engagé est suffisamment important pour que l'évaluation a posteriori porte sur les différentes réalisations.

Tableau 3

Investissement total et unitaire par phase du métro de Mexico millions US \$				
Phases	Coûts totaux		Investissement	
	construction	trains	total	au km
I	1 924	972	2 896	69
II	4 131	984	5 115	70
III	1 032	431	1 463	57
IV	1 754	358	2 112	42
Ensemble	8 840	2 745	11 586	61

Source : Inrets (Covitur & contrats)

Elab° FK

(Henry : 1988 & 1994)

10/94 : 1 US\$ = 5,21 FF

Tableau 4

Investissement du métro de Mexico par ligne 1967-1994 en millions de US \$ (10/94)					
Exp./lignes	Km	Const°	Trains	Total	T. \$/km
Stc/ligne 1	19	1 028	545	1 573	83
Stc/ligne 2	24	819	551	1 370	57
Stc/ligne 3	24	1 346	528	1 874	78
Stc/ligne 4	11	614	107	721	66
Stc/ligne 5	16	979	161	1 140	71
Stc/ligne 6	15	651	94	745	50
Stc/ligne 7	14	813	177	989	71
Stc/ligne 8	21	1 199	194	1 393	66
Stc/ligne 9	16	836	225	1 062	66
Stc/M° fer A	17	516	145	660	39
Ste/Tr. léger	13	40	19	59	5
Ensemble	190	8 840	2 745	11 586	61

Dans le tableau 3, on voit que l'effort consenti pour la construction d'un réseau à un rythme soutenu (figure 1) a été important pendant la première phase et, surtout, la seconde -où les coûts engagés dans la construction ont doublé- pour décroître brusquement par la suite, dans le contexte de la crise d'endettement du pays. Les trois quarts de cet investissement global ont été affectés à la construction, selon une option qui donnait priorité à l'accroissement du réseau sur la dotation en matériel roulant. Rapporté au nombre de kilomètres construits, on voit que les deux premières phases ont été les plus importantes, à 70 millions de dollars le kilomètre. La maîtrise acquise en matière de génie civil a fait baisser ces coûts kilométriques dans la troisième phase, et l'introduction de variantes encore plus dans la quatrième.

Différencié par ouvrage, le tableau 4 montre certaine variation selon les lignes construites, reflétant leurs caractéristiques que leur période d'implantation. Les plus onéreuses sont les lignes centrales des origines, exception faite de la ligne 2 qui reprenait au sol une bonne partie de l'emprise du tramway. Les lignes 4 à 7 ont été construites dans les seconde et troisième phases à meilleur marché, ce qui peut s'expliquer par la "mexicanisation" et par le moindre coût du matériel roulant. La ligne 6 est la moins onéreuse du système classique, mais c'est aussi celle dont le rendement est le moindre, à cause de son tracé volontariste bordant d'est en ouest le nord du District fédéral. Puis, avec les lignes 8 et 9, on descend à un coût moyen de 66 millions de dollars par kilomètre.

Les deux dernières lignes (tableau 4) ont été construites à un coût bien en deçà des autres ouvrages, ce qui justifierait leur dénomination de "métro léger". On remarque cependant que le métro de fer n'est que 22% moins cher que son homologue sur pneu au coût le plus bas, à

savoir la ligne 6. Par contre, il est huit fois plus cher que son parent, le train léger, dont l'investissement est particulièrement bas (mais il s'agissait pour moitié de rénovation).

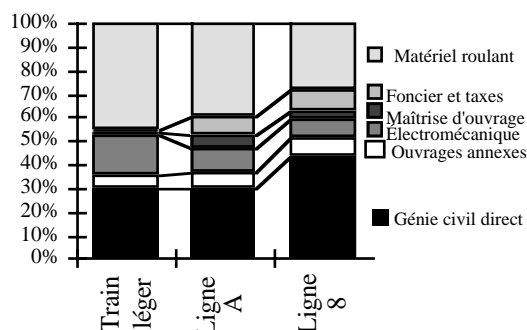
Tableau 5

Coût comparé en place offerte du métro de Mexico et variantes (US\$94/Passager/km/heure en pointe) $\Delta O/T$			
Train léger Ste	Théorique	843	
	Observé	1 170	28%
Métro fer Ligne A	Théorique	870	
	Observé	2 590	66%
Métro Ligne 8	Théorique	1 400	
	Observé	2 130	34%

Source : Inrets (Henry : 1988 & 1994) Elab° FK

Figure 5

Structure comparée des coûts de construction du métro de Mexico et variantes



Pour procéder à une comparaison rigoureuse, nous avons retenu les trois ouvrages de la quatrième phase, correspondant respectivement au métro classique, au métro de fer (les deux étant dotés du même système d'exploitation) et au train léger (tableau 5). Nous avons établi le coût théorique, correspondant à la capacité définie sur projet. Ainsi, le coût comparé de la place théorique offerte en heure de pointe serait sensiblement la même pour les deux systèmes de "métro léger", soit un tiers moins cher que le métro classique. Puis, nous avons procédé à la même comparaison, en fonction de la dotation actuelle de rames et du régime d'exploitation. Si le train léger reste le plus avantageux, le coût de la place offerte par le métro de fer est sensiblement supérieur, y compris à celui du métro classique. En rapportant les valeurs observées aux valeurs théoriques, il se confirme un différentiel de 66% à l'encontre du métro de fer, alors que les deux autres systèmes sont exploités aux deux tiers de leur rendement. On voit donc que les rendements différentiels entre le métro et ses variantes ne s'écartent pas de façon substantielle, sauf pour le tramway dont la capacité est bien moindre. On observe aussi que le pari fait en calibrant un système bien au delà de ses conditions actuelles d'exploitation est onéreux dans le court terme. C'est là un paradoxe des métros légers dans les villes en développement qui, pour être progressifs, doivent avoir d'importantes réserves de capacité, ce qui conduit à augmenter l'investissement immédiat en place offerte sans préjuger de l'assurance que ces réserves seront fondées dans l'avenir.

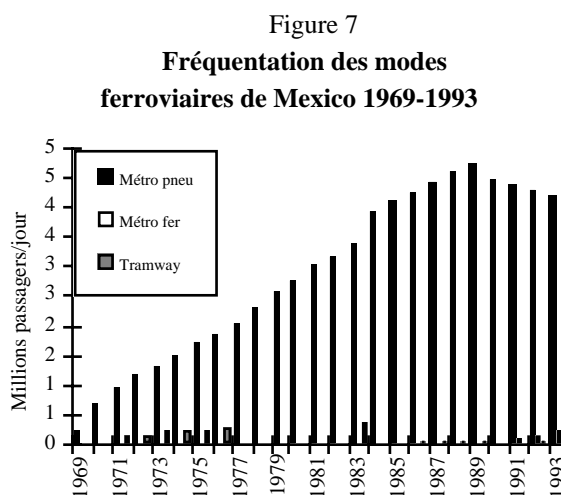
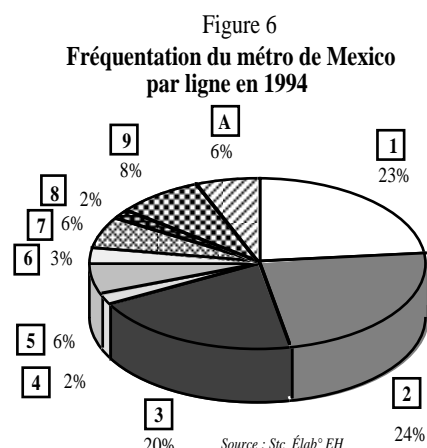
Il n'en demeure pas moins des différences dans la structure des coûts des trois systèmes (figure 5). Le génie civil direct (abstraction faite des ouvrages d'accompagnement) est de 30% dans la composition des coûts des deux métros légers, alors qu'il s'élève à 45% dans le métro classique. Inversement, le coût relatif du matériel roulant n'est que de 30% dans ce dernier, alors qu'il dépasse les 40% dans le cas du tramway rénové, lequel présente un coût de foncier pratiquement nul alors qu'il est de 10% dans les autres systèmes. Enfin, la part de l'électromécanique, qui est de 16% dans le train léger, décroît progressivement pour ne plus représenter que 8% du coût du métro classique. Ce sont donc essentiellement le génie civil et le foncier qui font la différence relative et ils dépendent plus du site que de la technologie. On peut certes construire du métro à moindres frais quand on dispose d'une emprise de surface, surtout s'il ne s'agit que de la réhabiliter ; mais les données du tableau 4 rappellent que des résultats d'exploitation avantageux ne sont pas garantis.

6. IMPACTS SUR LE SYSTÈME DE TRANSPORT DE MEXICO

Les impacts d'un métro dans les villes en développement sont plus visibles sur le plan sectoriel que sur celui de l'urbanisme (Henry, 1988a) ; tel est le cas de Mexico, dont le programme de développement du métro a été mené en relative indépendance avec la planification de cette mégapole. On ne peut nier que l'implantation d'un système qui transporte au plus rapide plus de quatre millions de citoyens chaque jour ait un impact sur l'environnement urbain et le cadre bâti ; pourtant, à échelle semblable, la mégapole de São

Paulo ne s'est dotée que du quart du réseau mexicain. Hormis ses impacts urbains, on est en droit de s'interroger sur ceux que le métro a sur les transports.

On remarque d'abord (figure 6) que le succès du métro de Mexico repose toujours sur les trois premières lignes qui, avec 67% des voyageurs, connaissent encore la plus grande affluence en 1994. Cette concentration décroît légèrement avec le temps, mais seule la ligne 9 a produit un réel délestage ; on ne peut pas dire que la construction des autres lignes ait modifié substantiellement l'équilibre du réseau, d'autant que la correspondance interne ne concernerait que 40% des déplacements en métro. La distribution inégale de la clientèle du métro pose la redoutable question de la pertinence des choix faits en nombre, extension et tracé des lignes. Comparée à celle des pays industrialisés, la fréquentation des lignes les moins performantes de Mexico est honorable ; mais se justifie-t-elle dans le cas présent ? L'évaluation a posteriori ne peut se faire qu'avec le recul du temps et celui écoulé à Mexico n'est pas suffisant pour porter un jugement tranché.



On observe que la ligne A, de desserte périphérique, a décollé plus rapidement que les lignes classiques, puisqu'en trois ans de fonctionnement elle absorbait déjà 6% de la demande. Il demeure une importante demande potentielle, qui se manifeste clairement dans l'impressionnante affluence aux stations d'intégration autobus/métro. Si l'on ajoute à ce fait que 35% de l'accès au métro se fait à partir des stations terminales du réseau (contre 55% par les stations intérieures et 10% par celles de correspondance), on voit s'exprimer un hiatus entre deux fonctions du métro : celle de la desserte interne de la ville et celle d'attention aux demandes de la périphérie. Dans le cas mexicain, un même système, celui du métro, peut-il accomplir les deux fonctions de transport urbain et régional (prises en compte respectivement par le métro et le Rer dans le cas parisien) ?

On observe ensuite (figure 7) que si la demande de transport a cru régulièrement tout au long des trois premières phases, elle a atteint un sommet en 1989 et connaît depuis une décroissance absolue. Telle inflexion n'est pas sans poser de questions. Le comportement de la demande ne semble pas non plus lié aux tarifs, qui sont restés très bas jusqu'en 1984 (le taux de couverture des dépenses d'exploitation par la billetterie descendait alors à 5%) et ont connu depuis des augmentations substantielles, sans grosse répercussion directe sur la fréquentation (dans le cadre d'une politique sociale compensant les effets de l'ajustement structurel sur les travailleurs, le taux de couverture n'est encore que de 38,3% en 1994). La chute de fréquentation observée dans les quatre dernières années interroge plutôt le rythme soutenu de la construction, quand la demande évolue en relative indépendance des inaugurations successives des différentes lignes (figure 8). On est notamment frappé par l'ampleur du décalage entre l'importance du kilométrage de lignes mises en service au cours des cinq dernières années et la décroissance de la fréquentation du réseau.

Figure 8

**Accroissements annuels du réseau
et de la demande du métro de
Mexico 1969-1994**

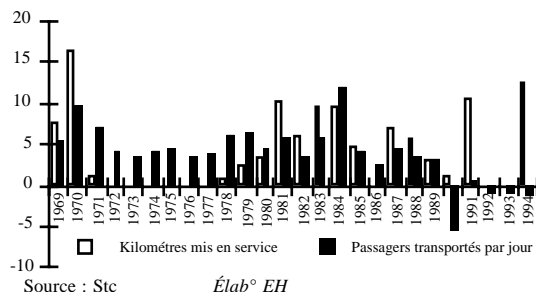
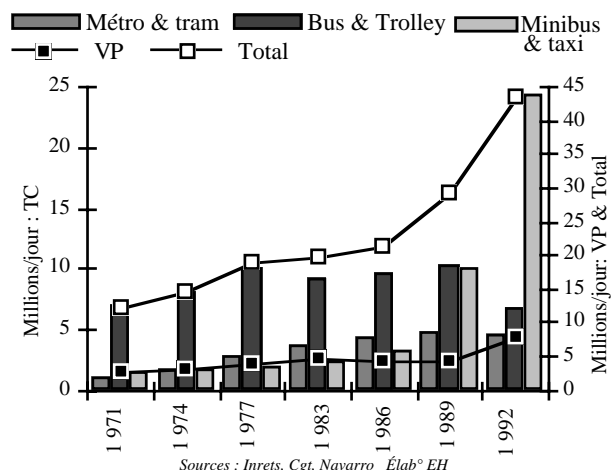


Figure 9

Modes de déplacement à Mexico 1971-92



À en croire les chiffres très approximatifs que l'on peut rassembler sur l'évolution de la répartition modale des déplacements au cours des vingt-cinq dernières années (autant les données provenant du métro et des entreprises publiques sont dignes de foi, autant les estimations concernant les minibus et autres modes privés sont hasardeuses), la vocation dominante du métro sur l'offre de transport de l'agglomération de Mexico ne s'est pas totalement vérifiée. On peut même observer une concurrence accrue exercée par les modes routiers, notamment par les minibus qui auraient connu une expansion considérable dans les dernières années (bien que probablement surévaluée dans la figure 9). L'articulation entre le métro et les autobus ne s'est pas véritablement produite, notamment depuis que l'entreprise publique Ruta 100 est entrée en crise (passant de 6 000 à 3 500 autobus en exploitation). Et la motorisation individuelle croît inexorablement, malgré les mesures prises dernièrement pour restreindre l'usage des voitures et protéger l'air très contaminé de Mexico.

Si l'on pense que les effets structurants d'un métro doivent être évalués sur le long terme, on est cependant tenté de mesurer la répercussion à court terme d'un investissement élevé.

La saturation des trois premières lignes, calibrées en deçà des niveaux actuels de la demande, induit une diminution de leur fréquentation par des usagers qui ne se reportent pas sur les autres lignes : dans l'état actuel de la demande, on peut discuter les choix qui ont été faits dans la première phase, en termes de capacité plus que de tracé ; et inversement pour les phases suivantes. Y a-t-il désertion du réseau, ou report sur d'autres modes ? L'exemple de la ligne A illustre les difficultés que connaît le métro. À un extrême, elle débouche sur une des stations les plus difficiles et encombrées du réseau de métro (Pantitlán, plus de 350 000 passagers par jour) ; à l'autre, elle ne dessert que tangentiellement les zones d'habitat populaire. L'imposante rénovation de voirie qu'a amené sa construction permet que ces zones, desservies par les minibus, soient directement reliées aux zones d'emploi, sans correspondance ni perte de temps. On voit ainsi se confronter une capacité lourde avec des véhicules de petite taille, qui se produit aussi sur les autres lignes du réseau. La croissance du parc de minibus n'est pourtant pas une tendance naturelle, à considérer la brusque accentuation de la courbe de croissance des minibus en 1989. Cette année marque en effet le revirement de la politique de transport appliquée par le Ddf, suite à une grève importante des autobus qui a paralysé la ville et à la crise de l'entreprise Ruta 100. Dans une optique libéralisante, on a opté depuis pour un soutien institutionnel et financier au secteur des minibus, aux dépens des entreprises publiques en général et du métro en particulier. Ce qui réaffirme, a contrario, la nécessité de rendre les trois dimensions de l'intégration multimodale cohérentes avec la politique de transport (Henry, Ice 1990).

7. COÛTS DES MÉTROS ET VARIANTES MONDIALES

Le Mexique s'associe à l'engouement actuel autour des variantes au métro, qu'on a pris l'habitude de regrouper sous l'expression "métro léger" (Barry, 1991 ; Booz-Allen, 1991 ; Gardner & al., 1994). Dans les pays industrialisés, ce sont les fonctions et les capacités du système qui suscitent tel intérêt pour cette technologie alternative, en particulier quand il s'agit de doter de systèmes de transport de masse des villes n'atteignant pas une taille qui justifierait l'implantation d'un métro ou bien pour des dessertes ponctuelles de moindre demande, reliées à un système de plus grande envergure. On se rapproche alors du tramway, modernisé du point de vue du matériel roulant et du mode d'exploitation (Kühn & al., 1992). Dans des villes n'atteignant pas le million d'habitants, on implante en site propre ou banalisé des systèmes dont la capacité est de l'ordre de 5 000 places offertes par direction à la pointe, à des coûts oscillant entre 10 et 35 millions de dollars le kilomètre. Transposé au contexte des pays en développement, cet intérêt gravite surtout autour des problèmes de coût, étant sous-entendu qu'un métro léger devrait signifier un investissement moindre, même quand le seuil de nécessité d'un métro lourd est largement dépassé (Barbieux & Kühn, 1990). On a donc tendance à tirer ce métro léger vers le haut et à attendre de lui des performances qui le rapprochent du métro, du point de vue de ses fonctions et de ses capacités. Des villes pouvant abriter jusqu'à sept millions d'habitants n'investissent pas plus de 20 millions de dollars le kilomètre dans des systèmes dont les capacités évoluent actuellement entre 8 000 et 20 000 places offertes par sens en heure de pointe, mais qui pourraient atteindre les cinquante mille en augmentant substantiellement le nombre de rames et leur circulation.

Si l'expérience de Mexico s'écarte notablement de la définition du "métro léger", celles de Guadalajara et de Monterrey s'en rapprochent plus. Dans la première ville, en récupérant un tunnel existant, on a d'abord construit en deux ans une ligne nord-sud de quinze kilomètres, reprenant le tracé d'un tramway transformé en site propre avec carrefours à niveau protégés : dans ces conditions, on restait à un coût relativement bas qu'on peut estimer à sept millions de US dollars 94 au kilomètre. Mais ultérieurement, la construction de la ligne est-ouest (8,5 kilomètres en souterrain) a vu les exigences en capacité de réserve s'élever (rames de trois voitures, quais surdimensionnés, exploitation pouvant atteindre 28 000 passagers par heure et par sens) et le coût de construction doublait. L'expérience de Monterrey est aussi celle d'un métro léger, en viaduc, dont on pousse les capacités à terme (45 000 places offertes par sens en heure de pointe, contre 10 000 en régime actuel), pour un coût unitaire inférieur de moitié à celui du métro de fer de Mexico. Dans les cas mexicains, on cherche des variantes locales

du métro (le matériel roulant est produit au Mexique) dont on veut se rapprocher au plus près du point de vue des capacités attendues tout en restant proche des coûts du métro léger.

Tel est aussi le cas de Medellín, de Manille, d'Istanbul ou de Tuen Mun, où l'on observe une tension entre une demande déjà élevée mais qu'on estime devoir croître fortement dans les prochaines décennies et où l'on arrive rapidement à saturation, dans les conditions d'exploitation que permet un investissement minimal. La situation est différente à Tunis, où l'on a produit un réseau de quatre lignes de tramway moderne proche des réalisations belges et françaises (Godard & al., 1994), buttant sur les problèmes d'interférence avec la circulation routière qui demeure un problème majeur dans les villes en développement.

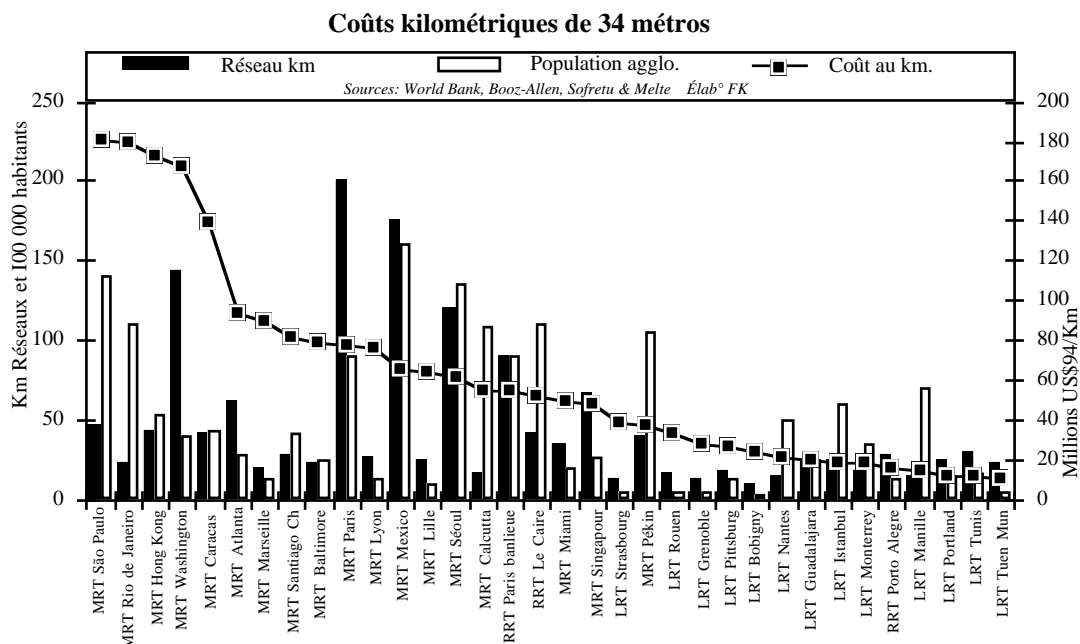
Est-il possible de comparer ces réalisations, entre elles et avec celles de pays industrialisés ? L'exercice est difficile, à cause des grandes spécificités locales, du manque de données homogènes et des problèmes d'actualisation et de conversion monétaire (Henry, 1988a). On peut s'y risquer en écartant des sources ponctuelles d'information montrant trop de divergences entre elles, en éliminant les coûts financiers et en cherchant moins à arriver à des valeurs nominales, toujours discutables, qu'à des ordres de grandeur comparatifs. Le critère le plus couramment utilisé est celui du coût de construction au kilomètre, incluant le matériel roulant (Hugonnard, 1990).

Comparer a posteriori pose des problèmes méthodologiques. Sur la base d'informations concernant certaines lignes ou tronçons de chaque système, on peut construire un tableau montrant le genre de résultats auxquels on parvient avec ce genre d'analyse (figure 10). Sur 34 situations sélectionnées (qui n'incluent pas des systèmes aussi importants que ceux de Tokyo, de Moscou ou de Montréal), il convient d'abord de rappeler que la dimension des villes varie de 400 000 à seize millions d'habitants et celle de leurs réseaux de métro entre quinze et 201 kilomètres (cinquante en moyenne). L'histogramme de la figure 10, qui confronte l'extension des réseaux aux populations des agglomérations, illustre la situation avantageuse des systèmes des pays industrialisés, alors que dans les villes en développement la population est pléthorique par rapport à l'offre de métro existante. Ces réserves étant faites, on peut classer ces villes selon le coût kilométrique de métro construit. Exception faite de Washington, les cinq systèmes aux coûts unitaires les plus élevés (entre 140 et 180 millions de dollars) ne sont pas ceux dont les réseaux sont les plus étendus (bien qu'ils incluent des mégapoles comme São Paulo et Rio de Janeiro). Le tiers des villes de référence présentent des coûts kilométriques entre cinquante et cent millions de dollars au kilomètre : on y trouve aussi bien de très grands réseaux (bien que Londres et Moscou, bordant les 400 kilomètres, ne soient pas ici représentés) que des métropoles comme Pékin, Le Caire ou Calcutta, dont les métros semblent atrophiés par rapport à la population. Treize villes ayant opté pour le métro léger viennent naturellement se ranger dans la moitié inférieure de la courbe : d'abord les villes moyennes des pays industrialisés, puis des métropoles des pays en développement. Dernière observation, les métros asiatiques semblent relativement moins onéreux que les autres, exception faite de Hong Kong. Si la décision de construire un métro se prenait au seul vu de ces considérations, elle serait simple... voire radicale, si le système le moins onéreux est routier plutôt que ferroviaire (Armstrong Wright, 1986). Mais quand on adopte un autre critère de comparaison, celui du coût de la place offerte en heure de pointe, qui correspond mieux aux fonctions d'un métro, les résultats sont bien différents.

Une méthode alternative consiste à partir d'une estimation de l'offre dans les conditions actuelles, sur la base des fréquences maximales tolérées par les systèmes d'exploitation, par les caractéristiques de voiries et par les dotations en rames (figure 11). À fins de comparaison, on ramène les niveaux de confort à la pointe à ceux admis dans les villes en développement (8 passagers au m²) et l'on considère les compositions des rames et les différences entre matériel roulant pneumatique et métallique. La capacité ainsi calculée en nombre de places offertes à l'heure de pointe varie entre deux extrêmes de quatre mille et cent mille passagers par heure et par sens à la pointe marquant la différence essentielle entre le tramway flambant neuf de Rouen et le métro d'Hong Kong. En rapportant cette capacité à l'investissement total de construction, on obtient un "coût capacitif", qui varie aussi de un à

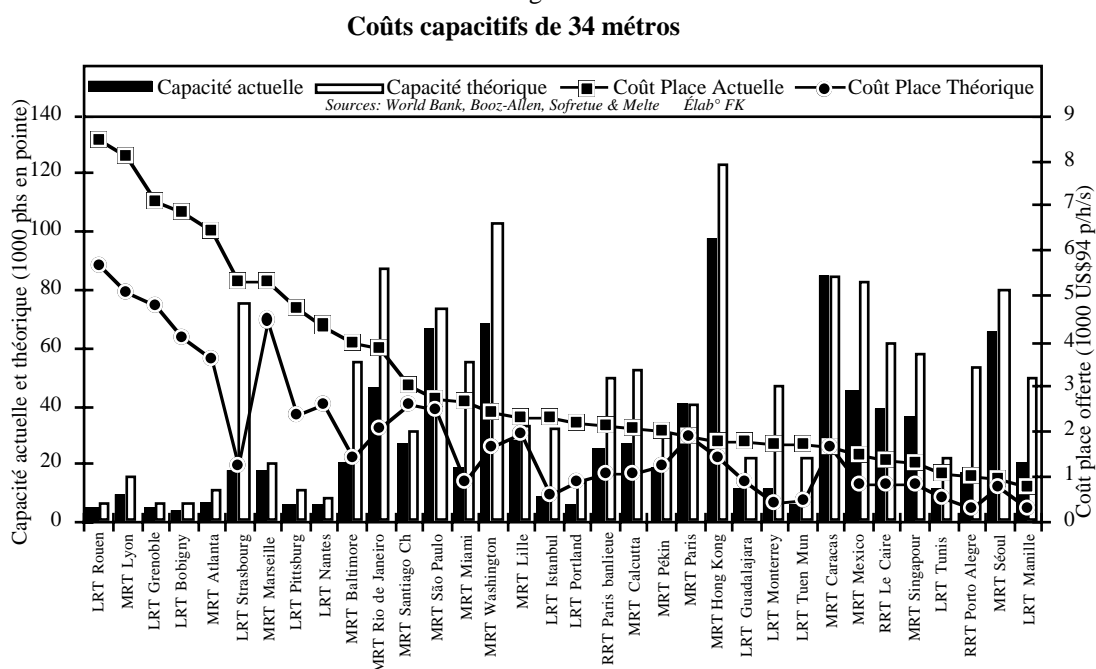
dix (725 dollars pour le métro léger de Manille, contre 8 500 pour celui de Rouen...).

Figure 10



On voit ensuite (courbe supérieure de la figure 11) que le classement des villes selon ce ratio garde peu de relation avec leur classement selon le coût kilométrique (courbe de la figure 10). Ainsi, des métros comme ceux de Lyon, Marseille ou Santiago, mais aussi des Lrt comme à Nantes, Strasbourg ou Atlanta, à l'investissement kilométrique modéré, présentent des coûts capacitifs parmi les plus élevés. Inversement, le caractère onéreux du kilomètre de métro de São Paulo (2 700 US\$) ou de Caracas (1 650) est ici fortement compensé, quand on le rapporte à la capacité. Baltimore et Rio de Janeiro se situent respectivement à 80 et 180 millions de dollars au kilomètre, mais présentent un coût capacitif de l'ordre de 3 900 US\$.

Figure 11



Au vu de l'histogramme des capacités (en noir sur la figure 11), une offre importante favorise la baisse du coût à la place offerte, surtout si l'investissement est faible (Paris et Séoul).

Finalement, les coûts capacitifs des systèmes légers ne sont pas aussi clairement inférieurs, le métro léger d'Istanbul présentant par exemple le même coût que le métro automatisé de Lille (environ 2 300 US\$), ou celui de Guadalajara (1 750 US\$) étant assimilable à celui d'Hong Kong. Dans cette liste, après Paris (1 900 US\$) et Hong Kong (1 800), on ne trouve plus que des systèmes lourds ou légers de villes en développement, parmi lesquelles Mexico confirme son bon rapport capacité-coût.

Dans les villes en développement, les systèmes le sont aussi, d'autant plus que la plupart sont d'origine récente et que les besoins continuent de croître. La capacité actuelle peut être améliorée, en réduisant les intervalles et en augmentant le nombre et la composition des rames (sans qu'il soit nécessaire de modifier le génie civil des stations). Ainsi aboutit-on à la capacité théorique, celle qui est présentée au moment du choix du projet. On voit alors, sur la courbe inférieure de la figure 11, le coût capacitif se réduire notablement (à Istanbul, Guadalajara, Monterrey ou Tunis), en particulier dans le cas des systèmes légers qui sont prévus pour évoluer (il pourrait descendre à 290 US\$ dans le cas de Manille). Rien n'assure pour autant que la demande justifiera de tels investissements complémentaires. Par contre, dans les grandes métropoles des pays industrialisés et dans les villes où l'exploitation est proche de la saturation, moins de gains sont à attendre dans l'avenir.

Des villes multimillionnaires, en nombre d'habitants si ce n'est en Pib, n'ont pas seulement besoin de métros et de systèmes de capacité intermédiaire : leur extension, la ségrégation spatiale et les tensions centre-périphérie justifient l'implantation de systèmes ferroviaires régionaux. Certaines s'accommodent de dessertes créées avant l'urbanisation (à Rio de Janeiro ou à Buenos Aires). Rares sont celles qui construisent des systèmes pénétrant dans les banlieues, comme au Caire (à un coût kilométrique de construction de l'ordre de 50 millions d'US\$, identique à celui du RER parisien hors les murs, bien qu'à un coût capacitif inférieur), ou des trains comme ceux de Porto Alegre, Recife et Belo Horizonte dont les choix de tracé se sont avérés douteux. On peut évidemment reprendre le cas de la ligne A de Mexico, conçue sous le label "métro léger", fonctionnant selon des critères identiques à du métro, mais dont l'implantation et le site font penser à du RER... Les résultats montrent combien il est difficile de combiner les mérites de ces trois familles de technologies de transport ferroviaire urbain, même si certains pensent que, dans une mégapole de cette envergure, c'est du Tgv qu'il faut prévoir pour assurer les dessertes des villes satellites (Musset, 1995) ! On peut tout aussi bien penser que les variations autour du concept de base de métro ont des conséquences regrettables, qu'elles aboutissent à des produits hybrides qui, faute de pouvoir répondre à la multiplicité d'objectifs qui leur étaient assignés, n'en desservent aucun. Il n'en demeure pas moins vrai que l'investissement en système léger est deux à trois fois moins élevé que celui en métro, rapporté au kilomètre construit : paradoxalement, son coût capacitif est supérieur de 40 % à celui du métro dans les pays industrialisés, alors qu'il est inférieur de 30 % dans les villes en développement. Une nomenclature unique est-elle utile pour mettre en rapport des réalités si contrastées ?

8. SIGLES ET ACRONYMES

Bnp, *Banque nationale de Paris* (chef de file du groupe bancaire français à Mexico)
Cgt, *Coordinación general del transporte* (autorité organisatrice du Ddf de Mexico)
Covitur, *Comisión de vialidad y transporte urbano* (maître d'œuvre délégué du Ddf)
Ddf, *Departamento del Distrito federal* (directement rattaché à la présidence mexicaine)
Ica, *Ingenieros consultores asociados* (principal maître d'ouvrage du métro de Mexico)
Lrt, *Light rail transit* (ou métro léger, tramway moderne, U-Bahn, etc.)
Mrt, *Mass rapid transit* (ou métro, underground, subway)
Ratp, *Régie autonome des transports parisiens* (exploitant du métro, liée à la Sofretu)
Rrt, *Rapid rail transit*, ou **Rer**, *Réseau express régional*, *Train suburbain*
Sacem, *Système d'aide à l'exploitation, à la conduite et à la maintenance*
Sofretu, *Société française d'études et de réalisations de transports urbains* (Systra)
Stc, *Sistema de transporte colectivo* (exploitant du métro de Mexico), Ddf
Ste, *Sistema de transportes eléctricos* (exploitant du tramway et des trolleybus), Ddf
Tgv, *Train à grande vitesse*

9. BIBLIOGRAPHIE

- Allport R., Thomson J., Halcrow Fox & Ass., 1990, *Study of mass transit in Developing countries*, Contracted report 188, Trrl, London (non publié)
- Armstrong-Wright, 1986, *Urban Transit Systems: Guidelines for Examining Options*, World Bank Technical Paper n° 52, Washington
- Balat J-L. & Vince P., 1990, "Planification des transports de l'aire métropolitaine de Mexico city : un exemple de la forte présence mondiale de l'ingénierie française", in *Tec* n° 103, 11-12/90
- Barbieux C. & Kühn F., 1990, Les atouts des métros légers dans une politique de développement des transports collectifs : critères de choix techniques et financiers, in *Actes de la Codatu V São Paulo*
- Barry M, 1991, *Through the cities: the revolution in light rail*, Frankfurt Press
- Booz-Allen & Hamilton Inc., 1991, *Light Rail Transit Capital Cost Study*, prepared for Umta, Washington, 70 p. (non publié)
- Coindet J-P., 1989, "Les métros de Mexico et du Caire : enseignement comparé de deux réalisations dans les Ped", in *Recherche transports sécurité* n° 24, p. 13-22
- Connolly P. & García S., 1994, Evaluación de los "metros ligeros" de la ciudad de Mexico : estudio financiero y de impacto local, Informe para el Inrets, Mexico (non publié)
- Figuerola O. & Henry E., 1987a, (ss. dir. de, avec Clichevsky N., Galilea S., González O., Maurel D., Morales S., Müller A., Navarro B., Nassi C., Orrico R., Pinheiro Machado D.), *Évaluation des métros latino-américains*, Rapport de recherche pour le Mres, Inrets/Redes, 14 vol. (non publié)
- Figuerola O. & Henry E., 1991a, "Éléments de débat sur les métros en Amérique latine", in *Recherche transports sécurité* n° 21, 3/89, p. 5-10
- Figuerola O. & Henry E., 1991b, Analysis of the Underground Systems in Latin America, in Heraty M. (ed.), *Urban Transport in Developing Countries. Lessons in Innovation*, London, Ptrc, Perspectives 1, p. 232-240
- Fouracre P., Allport R. & Thomson J., 1990, *The performance and impact of rail mass transit in developing countries*, Trrl, Research Report 278, 28 p.
- Gardner G., Rutter J. & Kühn F., 1994, *The performance and potential of light rail transit in developing cities*, Project Report 69 R5596, Trl, Londres
- Godard X., 1987 (ss. dir. de, avec Coindet J-P., Huzzain A. & Kühn F.) *Évaluation a posteriori du métro du Caire*, Expertise pour le Mef-Direction du Trésor, Inrets/Drtpc, 3 vol., 140 p. (non publié)
- Godard X., 1994 (ss. dir. de, avec Kühn F., Baltagi H., Boukhris T. & Baltagi A.), *Évaluation a posteriori du métro léger de Tunis*, rapport Inrets-Smlt
- Henry E., 1987, L'insertion des métros dans l'offre de transport en Amérique latine, in *Actes de Métropolis II*, Congrès de l'Association mondiale des grandes métropoles, Mexico, 19-21/5/1987, 20 p.
- Henry E., 1987a, Principales interrogations sur les métros dans les pays en développement, in *Quelles politiques de transport urbain pour les pays en développement ? Débat autour des options de la Banque mondiale*, Journée spécialisée Inrets, 2/6/87
- Henry E., 1988, (ss. dir. de, avec Coindet J-P., Figuerola O., Godard X., González O., Hiernaux D., Kühn F., Maurel D. & Navarro B.), *Évaluation rétrospective du métro de Mexico*, Expertise pour le Mef-Direction du Trésor, Inrets/Cenvi, 3 v., 350 p. (non publié)
- Henry E., 1988a, Quels impacts produisent les métros sur les transports et les villes latino-américains ?, in *Actes de la Codatu IV*, Jakarta, 5-10/6/88
- Henry E., 1994 (ss. dir. de, avec Connolly P. & Kühn F.), *Évaluation des variantes du métro de Mexico : ligne A et train léger*, Expertise pour le Mef-Direction du Trésor, Inrets/Cenvi, 184 p. (non publié)
- Hugonnard J-C., 1990, Intérêt des métros dans le monde, Sofretu, 20 p. (non publié)
- Ice, Inrets/Trrl, 1990, *Rail Mass Transit for Developing Countries*, London, Thomas Telford, 393 p.
- Jane's, 1995, *Urban Transport Systems*, XXX° edition, London, Chris Bushelle
- Kühn F., Martinet F, Marx P. & Constant B, 1992, *Études comparatives des coûts de génie civil selon les systèmes de transport adoptés*, Inrets-Metram-Cetu, Rapport Afme, 258 p.
- Kühn F., 1994, Comparison and evaluation of the new transit systems, in *Proceedings of the International Conference on the New Transit Systems*, The Korea Transport Institute, Pusan, p. 27-58.
- Musset A., 1995, "De la pirogue au Tgv : les transports urbains à Mexico", in *Transports urbains* n° 86, p. 5-16
- Navarro B., 1994, *El metro y sus usuarios*, Uam, Mexico
- Parpillon J-C. & Larraufie G., 1992, "Sofretu et le métro de Mexico. 25 ans d'une collaboration exemplaire", in *Revue générale des chemins de fer*, 10/92, p. 49-59.
- Vuchic V., 1988, "Design, evaluation and selection of transit systems : theory and practice", in *Les transports collectifs urbains : un défi pour nos villes*, Colloque Enpc, Paris, 3-5/5/88
- World Bank, 1986, *Urban Transport: A Sector Policy*, Washington (et 1995: Sustainable Transport: A Sector Policy Review -document de circulation interne- non publié)