



DIMENSIONS OPTIMALES DU MATERIEL DE METROPOLITAIN

1982

Les problèmes relatifs aux dimensions du matériel roulant des réseaux de métros, et particulièrement à son gabarit, ne sont pas inconnus des lecteurs du "FORUM" : souvent évoqués dans les descriptions de réseaux étrangers, ils sont apparus récemment comme critères fondamentaux dans nos études sur les projets de métros de Lyon et de Marseille.

Nous remercions M. Michel BIGEY, spécialiste des travaux souterrains, d'avoir bien voulu décrire dans nos colonnes les aspects techniques et économiques d'un paramètre dont le choix engage définitivement l'avenir d'un réseau.

1. ÉVOLUTION des IDÉES

Jusqu'à une période récente, on considérait qu'un réseau de transport en site propre - un métro - était le privilège de très grandes villes, d'au moins un million d'habitants. La caractéristique la plus recherchée de ce mode de transport était sa capacité qui peut atteindre 40 000 voyageurs par sens de circulation dans des conditions normales de confort. Une évolution s'est dessinée dans les pays industrialisés à la suite de la généralisation de l'utilisation de l'automobile en milieu urbain.

D'une part est apparue l'inaptitude de l'automobile à répondre à l'essentiel de la demande de déplacement dans les villes dès que leur population dépasse 2 à 300 000 habitants, même au prix de travaux coûteux et souvent destructeurs, en raison du faible rendement "voyageur transporté/surface au sol utilisée" caractéristique de ce mode de transport. D'autre part, l'engorgement des villes qui résulte de leur envahissement par l'automobile, entraîne une diminution de l'efficacité des transports publics mêlés à la circulation générale. On envisage donc, et dans certains pays on construit, des réseaux en sites propres non plus principalement en raison de leur capacité mais surtout à cause de leur rapidité, régularité et confort, accessoirement du caractère non polluant de la traction électrique qu'ils utilisent sans exception.

En effet, un système en site propre se justifie sur un tracé dès lors que doit être assuré dans l'immédiat un trafic maximal de l'ordre de 5 à 6000 voyageurs par heure et par sens de circulation, susceptible de doubler sur une période de 15 à 20 ans.

Un tel flux est très supérieur à ce que peut assurer une voie routière banale. Seule une autoroute à deux fois 4 voies, de 40 à 50 m de largeur en dehors des échangeurs, a une capacité de 5 à 6000 personnes (à raison d'une moyenne de 1,2 passager par voiture en circulation urbaine). Sa réalisation dans un centre urbain pose des problèmes. Dans ces conditions, une question doit être posée : les dimensions traditionnellement adoptées dans les réseaux existants qui transportent de 20 à 40 000 voyageurs, correspondent-elles aux nécessités dans des réseaux à trafics plus réduits ?

2. GABARITS et COÛT d'INVESTISSEMENT

La gamme de largeur des voitures de métros existants va de 2,30 m (Berlin) à 3,20 m (Oslo) et la gamme des longueurs de 12,50 m (Berlin) à 22,38 m (Toronto). On constate une corrélation entre les deux dimensions principales, représentée approximativement par la formule $L = 10(1 - 1)$.

L'influence du gabarit du matériel se retrouve au départ sur l'investissement, et ensuite sur les coûts d'exploitation.

Les dépenses d'investissement qui dépendent du gabarit, sont uniquement les dépenses de génie civil de l'infrastructure principale (voie courante et quais des stations) et les dépenses de matériel roulant. En effet, pour une capacité donnée, la construction des accès et locaux de stations, tout l'équipement de voies, d'alimentation en énergie électrique, les ouvrages annexes de ventilation, de relevage des eaux d'infiltration, etc... ne sont pas notablement influencés par le gabarit. Aussi l'étude comparative présentée ci-dessous est limitée aux variations du coût de génie civil de l'infrastructure principale et du matériel roulant qui représentent d'ailleurs de 70 à 80 % du total dans la généralité des cas (sauf si une plateforme abandonnée peut être réutilisée). Elle porte sur trois types de matériel : un à gabarit moyen pris comme référence, un à gabarit large et un à gabarit étroit.

3. VARIATION du COÛT du GÉNIE CIVIL

3.1. Les variantes de tracé

Avant de comparer les ouvrages eux-mêmes, il convient d'étudier l'influence de leur dimensionnement sur les tracés.

Quel que soit le gabarit, les pentes et rampes maximales ainsi que les courbes minimales en plan ne changent pas car elles résultent de données cinématiques, de normes de confort qui sont les mêmes dans tous les cas. Donc, les différences n'apparaissent qu'aux points "durs" d'une ligne, à proximité d'ouvrages ou immeubles importants.

Ces "points durs" ne concernent en fait que les tunnels près du sol. Pour un viaduc ou une plateforme, les nuisances qui conduisent à écarter la plateforme des immeubles ne sont pas différentes si les ouvrages sont éloignés d'un mètre ou plus. Pour un tunnel profond, les sujétions sont les mêmes, que l'ouvrage passe à l'aplomb d'une façade ou s'en écarte de quelques mètres, car la zone d'influence des vibrations et des tassements est très grande. Par contre, pour un ouvrage près du sol sous la voie publique, un mètre de largeur supplémentaire peut conduire localement à des sujétions d'exécution notablement plus importantes.

L'implantation d'une ligne à gabarit réduit serait donc plus facile. Mais en contrepartie, comme elle nécessite, à capacité de transport égale, des stations plus longues pour une même fréquence de trains et que ces ouvrages sont sensiblement rectilignes et en palier, il en résulte des difficultés d'implantation qui se présentent sous une forme différente, mais qui peuvent aboutir à des coûts comparables.

En définitive, il est difficile d'évaluer l'incidence sur le coût des ouvrages des variantes permises sur les tracés par un gabarit plus ou moins large. Le plus souvent, il n'y a pas de différence notable qu'en un certain nombre de points

équivalents et, pour l'ensemble d'un réseau, ceci peut être tenu pour négligeable devant les différences entre le coût des ouvrages eux-mêmes.

De même, les ouvrages de station ont un coût sensiblement indépendant du gabarit. En effet, pour un matériel large, en raison de l'importance du nombre de voyageurs en provenance ou à destination de chaque train en stationnement par mètre linéaire de quai, celui-ci est plus large, mais, à capacité de transport égale, plus court que pour un matériel à gabarit étroit. En première approximation, seul le coût de la plateforme courante dépend du gabarit.

3.2. Cotes de sécurité et emplacement des équipements fixes

Les dimensions des ouvrages d'infrastructure de voie courante dépendent d'une part des dimensions du matériel, d'autre part des cotes de sécurité imposées et de l'encombrement des équipements fixes (câbles, signaux, etc....).

Aucune comparaison valable ne peut être faite sur la variation des coûts d'infrastructure en fonction du gabarit si l'on ne fixe pas au préalable des cotes de sécurité à respecter dans tous les cas. Dans la comparaison effectuée, les bases correspondent aux cotes généralement adoptées :

- 0,40 m de distance entre gabarits statiques des véhicules qui se croisent (ce qui fixe l'entr'axe des voies),
- 0,35 m entre gabarits statiques du véhicule et obstacles fixes sur les parois des ouvrages,
- cheminement longitudinal réservé à côté de chaque voie. En tunnel le cheminement est aux cotes minimales de 0,70 x 2,00. En aérien, il a 1 m de largeur, car le coût est assez réduit pour qu'on puisse adopter un cheminement plus confortable,
- caniveau de câbles réservé de chaque côté des voies pour les câbles d'alimentation, les câbles de télécommunication étant disposés dans les goulottes fixées le long des piédroits au-dessus des cheminements.

Enfin, la distance entre le plan de roulement et le radier est de 0,40 m, nécessaire pour une pose directe sur béton (matériel classique ou sur pneumatiques) ; en voie ballastée, cette cote devrait être de 0,60 m, ce qui ne changerait pas fondamentalement les coûts relatifs des différents ouvrages.

3.3. Caractéristiques dimensionnelles

a) Longueur. Dans un métro, la longueur des véhicules intervient sur le coût du génie civil du fait de la nécessité d'élargir les ouvrages pour permettre l'inscription de caisses rectangulaires sur une plateforme en courbe. Toutefois, il faut éviter les courbes de faible rayon et une valeur de 200 m constitue un minimum pour les voies principales.

La surlargeur en courbe est donnée par la formule :

$$S = \frac{L^2}{8R}$$

S : surlargeur (pour une voie)

L : longueur des caisses

R : rayon de courbure

Pour une longueur de caisse de 20 m et un rayon de 200 m : $S = 0,25$ m par voie, donc la surlargeur est de 0,50 m pour l'ouvrage à 2 voies. Pour une longueur de caisse de 10 m, cette surlargeur serait de 0,125 m soit une différence de 0,375 m. Encore s'agit-il de deux cas extrêmes. Sur la totalité d'un tracé normal, l'incidence de cette surlargeur sera très réduite, du fait que le tracé doit être le moins sinuex possible. L'incidence de la longueur des véhicules sur le coût des ouvrages reste assez faible et ce ne sont pas des considérations de génie civil qui doivent guider le choix en ce domaine.

b) Largeur. Les trois largeurs de véhicules considérées dans l'étude comparative sont respectivement 2,90 m, 2,30 m et 2,60 m. Cette dernière cote est prise, pour la

clarté du raisonnement, comme bargeur de référence. Les cotes de sécurité mentionnées précédemment comprennent les surlargeurs dues aux jeux, suspensions, usures et imprécision de pose de voie.

c) Hauteur. Dans les trois cas, la hauteur de caisse est la même.

3.4. Types d'ouvrages et mode d'évaluation

Les conditions types dans lesquelles une infrastructure de voie courante peut être établie sont les suivantes :

- tunnel en terrain ébouleux foré à l'avancement avec consolidation du sol,
- tunnel profond en terrain cohérent foré à l'avancement,
- tunnel en bon terrain construit en tranchée couverte avec établissement préalable d'un étalement de la tranchée (palplanches, fouille berlingoise, etc....) avec ou sans platelage de service pour permettre le maintien de la circulation,
- tunnel en terrain ébouleux et dans l'eau avec établissement préalable de murs moulés avec ou sans platelage de service,
- viaduc,
- plateforme talutée.

Dans ces différentes conditions, le coût du génie civil de l'ouvrage de voie courante est en première approximation proportionnel à la largeur de la plateforme, au moins dans les largeurs considérées ci-dessus et pour une hauteur identique des véhicules.

En effet, dans tous les types de construction, les quantités d'ouvrages élémentaires augmentent soit proportionnellement, soit un peu plus que proportionnellement à cette largeur. Il y a des exceptions à cette règle comme par exemple les blindages ou murs moulés des tranchées couvertes dont l'importance est indépendante de la largeur de l'ouvrage. Par ailleurs, les coûts unitaires de la plupart des ouvrages élémentaires diminuent légèrement lorsque la largeur de la construction augmente du fait du meilleur rendement des engins et équipements de chantier. Au total, pour un ensemble d'ouvrages de plateformes de différentes natures (tunnel, tranchée, viaduc) établis dans diverses conditions, la proportionnalité du coût de la plateforme à sa largeur est bien vérifiée.

Dans les exemples choisis, si le coût du génie civil de l'ouvrage de voie courante pour le gabarit de référence est pris égal à l'unité, il a pour les autres gabarits les valeurs suivantes :

- gabarit étroit	$\frac{6,4}{7} = 0,914$
- gabarit large	$\frac{7,6}{7} = 1,086$

4. VARIATION de COÛT du MATERIEL

Les composants du coût d'un matériel roulant sont beaucoup plus complexes et nombreux que ceux de génie civil. Il est difficile d'en faire une étude analytique.

La comparaison de prix de différents matériaux ne permet pas mieux d'isoler dans les variations de prix d'un matériel à l'autre le paramètre largeur. Les spécifications, puissances, nature de l'appareillage de commande, dispositifs de freinage, nombre et disposition des portes, matériaux de structure (alliage léger, acier inoxydable, etc....) sont des facteurs de variations plus importants que le seul gabarit. De plus interviennent la variation des niveaux de prix d'un pays à l'autre, les glissements monétaires, l'importance des séries commandées, le niveau de la concurrence et la nature des garanties. Ces facteurs de variation, indépendants du type de matériel, sont également très importants.

Dans ces conditions, la seule règle simple qu'il paraît sage de faire admettre dans une étude comparative est la suivante : le prix du matériel roulant au mètre linéaire est, en première approximation, indépendant de la largeur, toutes choses égales par ailleurs. Pour deux voitures de même longueur et de largeur différentes avec les mêmes équipements mécaniques, seules varient les dimensions de tâches entrant dans la composition des caisses et le dimensionnement de quelques organes (moteurs, bogies, etc...). Elles entraînent des variations de dépenses de second ordre. En outre, un matériel plus étroit est plus court ce qui multiplie le nombre de véhicules et augmente le coût du m^2 de plancher.

Par rapport au matériel de référence supposé avoir un coût unitaire, les autres matériaux ont donc les coûts suivants :

$$- \text{ gabarit étroit } \frac{2,6}{2,3} = 1,130$$

$$- \text{ gabarit large } \frac{2,6}{2,9} = 0,896$$

La vitesse commerciale est fonction du temps de stationnement qui dépend du rapport :

$$\frac{\text{nombre de voyageurs}}{\text{nombre de portes}}$$

dont de la largeur du véhicule. En admettant, pour le matériel de référence, une durée moyenne de franchissement d'interstation de 60 secondes stationnement non compris (interstation de 800 m) et une durée moyenne de stationnement de 15 secondes, la durée de franchissement, stationnement compris, est la suivante :

$$- \text{ gabarit étroit } 60 + 15 \times \frac{23}{26} = 73 \text{ sec 3}$$

$$- \text{ gabarit moyen } 60 + 15 = 75 \text{ sec}$$

$$- \text{ gabarit large } 60 + 15 \times \frac{29}{26} = 76 \text{ sec 7}$$

Le coût du matériel, à capacité de transport donnée, serait alors, en comptant toujours pour 1 le coût du matériel au gabarit de référence :

$$- \text{ gabarit étroit } 1,130 \times \frac{73,3}{75} = 1,104$$

$$- \text{ gabarit large } 0,896 \times \frac{76,7}{75} = 0,916$$

5. CONCLUSIONS

La largeur du matériel influe sur le coût total d'investissement en modifiant deux facteurs :

- le coût du génie civil de la plateforme de voie courante (sans les ouvrages annexes) représente à peu près la moitié des dépenses totales de génie civil et peut varier entre 5 et 25 millions de francs par kilomètre pour le gabarit de référence ;
- le coût du matériel dépend du trafic maximal attendu. Pour le gabarit de référence, l'investissement en matériel par km de ligne et par place offerte/heure sur chaque sens de circulation, est de l'ordre de 600 francs.

Pour des capacités de 10 à 40 000, le coût varie donc de 6 à 24 millions de francs par kilomètre de ligne.

Connaissant la capacité de transport à assurer, l'investissement en matériel roulant par kilomètre de ligne dans le gabarit de référence est connu. De même, connaissant les types d'infrastructures et les conditions de construction, le coût moyen de génie civil de plateforme par kilomètre de ligne dans le gabarit de référence peut être estimé. Le tableau ci-dessous indique les variations de la part investissement correspondant à la somme de ces deux postes, par rapport au gabarit de référence en fonction de R :

$$R = \frac{\text{Coût du génie civil de la plateforme voie courante par kilomètre}}{\text{Coût du matériel rapporté au kilomètre de ligne}}$$

	Différences par rapport au gabarit de référence	
	Gabarit étroit (2,30 m)	Gabarit large (2,90 m)
R = 1/3	+ 7,6 %	- 5,6 %
R = 1/2	+ 4,2 %	- 2,8 %
R = 1	+ 0,9 %	+ 0,1 %
R = 2	- 2,3 %	+ 2,3 %
R = 3	- 5,1 %	+ 5,8 %

L'influence du gabarit est donc modérée, les 5 valeurs de R considérées constituant les limites dans lesquelles se situent les principaux cas. Une capacité de transport de 20 000 voyageurs par heure et un coût de génie civil de plateforme de 12 millions de francs par kilomètre (soit un coût total de génie civil de l'ordre de 24 millions de francs par kilomètre) correspondent à R = 1 ; le choix du gabarit est indifférent. Si le coût de génie civil est doublé (R = 2), il y aurait théoriquement avantage à choisir un gabarit étroit mais cela se traduirait par une économie de l'ordre de 1 % sur l'investissement total, valeur à peine significative au regard aux nombreux paramètres secondaires négligés et le plus souvent difficilement chiffrables. Ce n'est que dans les cas extrêmes, trafic important et faible coût de génie civil ou trafic faible sur infrastructure coûteuse, que le coût d'investissement peut varier en fonction du gabarit dans des proportions notables ; ou alors dans des cas particuliers pour lesquels les approximations faites ci-dessus ne sont pas valables.

D'autres éléments sont à considérer, en particulier l'opportunité de se rapprocher des dimensions des matériaux existants pour bénéficier d'une certaine standardisation des organes principaux et le confort apporté par une largeur intérieure permettant de placer de front deux banquettes avec un passage central de 0,50 m au minimum. La largeur de 2,60 m répond bien à ces deux exigences. Dans le cas de réseaux régionaux à grand débit et construits en partie à ciel ouvert, la largeur du gabarit UIC (2,90 m), avec caténaire s'il y a interénétration avec des lignes existantes, peut constituer une solution préférable.

Michel BIGEY

JEUX OLYMPIQUES, TRANSPORT URBAIN ET... NORMALISATION

Pendant la durée des Jeux olympiques, qui se sont déroulés l'été dernier dans la proche banlieue nord de Munich, les transports collectifs de cette agglomération — tramways, métro, S-Bahn — ont connu une affluence record. Pour la seule journée du 3 septembre, la communauté des transports (MVU, voir le "FORUM n° 18") a transporté 624 800 passagers, dont 350 000 par le métro, soit, pour ce dernier, plus de trois fois la moyenne journalière depuis sa création.

Le service de celui-ci a été renforcé pendant toute la durée des Jeux : de 5 h à 1 h, la ligne U3 a été desservie par des trains de 6 voitures circulant à l'intervalle de 5

minutes, et même 2½ minutes pendant les manifestations ; 16 trains étaient alors en ligne.

Un service aussi dense n'a pu être obtenu que grâce au prêt par le métro de Nuremberg, du 4 août au 12 septembre, de 4 éléments de 2 voitures. Celles-ci sont identiques en tous points (à la couleur près) à celles du métro de Munich. Cette collaboration entre les deux métros montre l'un des avantages qui peuvent découler du choix de caractéristiques communes à plusieurs réseaux.

(der Stadtverkehr, 8/1972 et 9/1972)