

150 KM DE TABLIERS EN BÉTON PRÉCONTRAIT EN U POUR VIADUCS DE MÉTRO

Daniel DUTOIT, Yves GAUTHIER, Serge MONTENS, Jean-Charles VOLLERY
SYSTRA

1. INTRODUCTION

Avec l'énorme développement des grandes villes dans le monde, le besoin de systèmes de métro efficaces s'est accru sensiblement. Dans les zones urbaines des pays en développement, là où les conditions géologiques sont défavorables, la construction de tunnels conduit à des coûts d'infrastructure très élevés, et à de longs délais de construction, ce qui ralentit le développement de ces systèmes de transport. Les maîtres d'ouvrage de métros décident donc souvent de construire des métros aériens en viaduc.

Cependant, les considérations environnementales exigent qu'une grande attention soit accordée à l'aménagement paysager et architectural, et à la protection acoustique, car ces infrastructures sont construites au milieu d'un environnement urbain.

Le tablier en U décrit ci-dessous, élaboré par SYSTRA, est une réponse économiquement efficace aux conditions de l'environnement urbain.

Ce tablier comporte de nombreux avantages par rapport aux tabliers classiques en caisson.

2. AVANTAGES DU TABLIER EN U EN BÉTON PRÉCONTRAIT

2.1. Présentation générale

Ce concept a été développé en 1990 avec la RATP, afin d'obtenir un viaduc de métro qui puisse se fondre dans l'environnement urbain. Le U en béton est constitué de deux poutres latérales et d'une dalle inférieure placée entre elles.

Chaque poutre latérale comprend une âme et une membrure supérieure. Les voies sont supportées par la dalle inférieure, qui peut être précontrainte transversalement si nécessaire. La précontrainte longitudinale est située dans la dalle et le bas des âmes.

Le tablier peut supporter une voie (section dénommée «petit U »), ou deux voies (section dénommée «grand U »). Ce tablier est généralement utilisé pour des travées sur appuis simples, avec des portées de moins de 36 m. Mais des ouvrages continus ont déjà été construits, et la section en U peut être complétée par d'autres éléments structuraux afin d'augmenter la portée.

2.2. L'abaissement du profil en long

Le profil en long des lignes de métro sur viaducs est principalement régi par le gabarit de la route en-dessous du pont. Le niveau du rail est déduit de ce gabarit et de la hauteur entre l'intrados du tablier et le rail.

Avec une section en caisson, l'épaisseur du tablier est d'environ 1,25 m à 2,00 m. Avec une section en U, l'épaisseur structurelle est égale à l'épaisseur de la dalle inférieure, qui est comprise entre 0,22 m et 0,35 m. Par conséquent, il est possible de baisser le niveau du rail de 1 m à 1,80 m.

Ceci a plusieurs conséquences :

- Le niveau des forces horizontales appliquées (force de freinage et d'accélération, force du vent sur le train, séisme sur le train) est abaissé, donc cela réduit les moments de flexion appliqués aux piles et aux fondations, et par conséquent cela diminue leurs quantités et leurs coûts (en particulier dans les zones sismiques),
- L'impact visuel du viaduc dans le paysage urbain est réduit. Cette réduction de l'impact visuel est probablement l'un des principaux avantages des tabliers en U en béton précontraint.

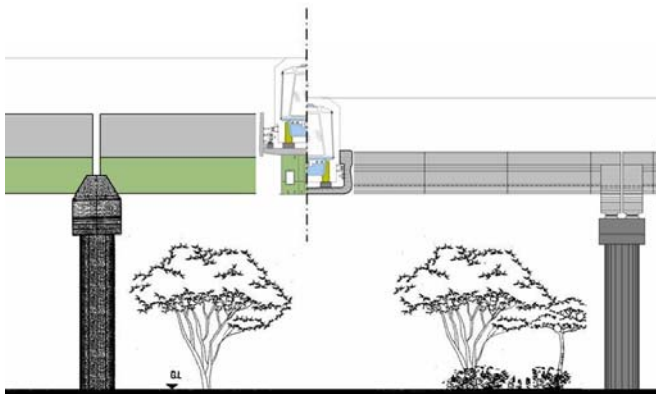


Figure 1. Réduction de l'impact visuel

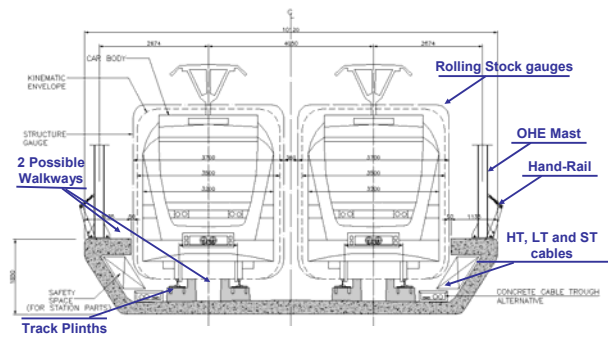


Figure 2. Exemple d'intégration complète du système

2.3. L'abaissement du niveau des stations

En raison de l'abaissement du profil en long de la ligne, le niveau des stations peut également être réduit. Cela réduit évidemment le coût, puisque le vent et les forces sismiques appliqués aux piles et aux fondations sont réduits. Cela est également bénéfique pour les passagers qui ont à monter à partir du sol jusqu'au niveau des quais. Dans certains cas, cela permet l'élimination des escaliers mécaniques et de leur coût d'investissement et d'entretien. Si des escaliers mécaniques sont nécessaires de toute façon, cela diminue leur coût de construction, de fonctionnement et d'entretien.

2.4. L'intégration des stations dans l'étude du viaduc

Dans la station, les voies peuvent être supportées par la même section transversale de tablier que pour le viaduc courant. Le tablier en U traverse la station, et sa construction peut être indépendante de la construction de la station. Cela permet la standardisation de la section du tablier sur toute la ligne, les stations incluses. Les piles comportent des chevêtres qui supportent les quais des stations et la toiture.

Les autres éléments (toiture, salle des billets, locaux techniques, etc.) de la station peuvent être construits en dehors du chemin critique.

2.5. L'intégration complète du système

La structure en U a été conçue par une équipe multidisciplinaire composée d'experts de SYSTRA. Elle intègre toutes les composantes du système (la voie, les équipements de traction électrique, les câbles haute tension, les câbles basse tension, les câbles de signalisation et de télécommunication, les chemins d'évacuation, les écrans acoustiques,...). Cette caractéristique de la section en U est couverte par un brevet international de SYSTRA.

2.6. L'économie en termes de quantités de matériaux

La section de béton du tablier est réduite par rapport à un caisson de métro classique. De plus, grâce à l'abaissement du profil en long, les moments de flexion appliqués aux piles et aux fondations sont réduits, et donc les quantités de matériaux pour les piles et les fondations sont également réduites, tant pour le viaduc courant que dans les stations. La réduction globale des quantités et du coût est comprise entre 20 et 40 %.

2.7. L'utilisation des âmes latérales à des fins diverses

Les âmes latérales sont utilisées à des fins structurelles, mais elles peuvent également servir pour trois autres fonctions. Elles sont utilisées comme écran antibruit. Elles sont très efficaces, car elles sont proches des wagons du train. Il n'est donc généralement pas nécessaire d'ajouter des écrans acoustiques. La hauteur totale du tablier est ainsi réduite, par rapport à un caisson surmonté d'un mur antibruit. Ceci est très intéressant pour l'intégration urbaine et la réduction du coût. Les âmes sont également capables de retenir le train sur le pont en cas de déraillement ou de séisme, ce qui n'est pas le cas pour un écran antibruit. Les tests effectués pour le métro de Guangzhou ont démontré cette capacité.

Enfin, les membrures supérieures peuvent être utilisés pour l'évacuation en cas d'urgence et /ou pour l'entretien, car elles sont situées au niveau des planchers des wagons.

3. CONCEPTION DU TABLIER

3.1. L'intégration du système et la conception du tablier

Pour tous les systèmes de métro possibles, les composants du système peuvent être assez différents. Ces différences résultent des éléments suivants :

- le type de roulement: fer, ou pneumatique,
- le type d'alimentation électrique: troisième rail ou caténaires,

- le type d'évacuation d'urgence: longitudinalement aux extrémités du train, ou latéralement,
- la conduite manuelle ou automatique.

Pour ces différents systèmes, le nombre de câbles de chaque type est différent (haute tension, moyenne tension, basse tension, signalisation, télécommunication, contrôle centralisé), ce qui signifie qu'il n'est pas possible de les placer systématiquement au même emplacement de la section transversale de tablier pour tous les projets.

Les principales caractéristiques du matériel roulant proprement dit, influent également sur le tablier.

Le gabarit horizontal a évidemment des répercussions sur la largeur du tablier, et donc sur l'épaisseur de la dalle inférieure qui fléchit transversalement entre les âmes. Dans le cas de voie en courbe il est possible, soit de faire suivre la courbe par le tablier, soit de faire des travées droites avec une augmentation de la largeur. La première solution est généralement utilisée lorsque la travée est faite à partir de voussoirs préfabriqués assemblés. La deuxième est généralement utilisée en cas de travées préfabriquées en une pièce, mais il est également possible de construire des travées courbes préfabriquées en une pièce.

La hauteur du tablier est généralement telle que le dessus de la membrure supérieure est au même niveau que le plancher du wagon afin :

- de permettre une évacuation d'urgence en utilisant la membrure supérieure,
- d'utiliser la même section de tablier dans les stations.

La charge du train influence: l'inertie de flexion longitudinale nécessaire pour satisfaire les critères de déformation, la section des membrures supérieures en flexion longitudinale, la précontrainte longitudinale, et l'épaisseur de la dalle inférieure. La vitesse du train influe sur la valeur du coefficient d'impact dynamique. La valeur maximale du dévers influence la largeur du tablier, car elle doit être prise en compte dans les études de gabarit.

Avec toutes les combinaisons possibles de ces paramètres, chaque projet est un prototype. Il n'est donc pas possible de standardiser une section de tablier type qui pourrait être utilisée pour tous les types de métros, ou même pour une sous-famille d'entre eux.

3.2. Conception architecturale

Par son caractère intrusif dans le paysage urbain, un viaduc de métro a besoin d'une grande qualité architecturale. Chaque projet doit être adapté au site. Ceci doit être compris en termes d'environnement urbain, et d'environnement culturel. Dans certains cas, des formes rondes seront privilégiées. Dans d'autres cas, l'architecte préférera des formes à arrêtes vives.

3.3. Calcul du tablier

Pour certains aspects, le comportement mécanique d'une section en U est différent de ce qu'il est pour un caisson classique.

Le U est une section ouverte. Ainsi, la torsion due à une charge asymétrique pour un tablier supportant deux voies, ou due aux charges permanentes et d'exploitation dans le cas d'un tablier en courbe, est reprise par une combinaison de torsion de Saint-Venant (comme dans un caisson classique) et de flexion différentielle des deux poutres latérales. La proportion de ces deux comportements dépend de nombreux paramètres, dont le degré d'encastrement en torsion de l'âme sur appui.

Une autre caractéristique de la section en U, est que le centre de torsion de la section est situé à l'extérieur de la section, en dessous. Il est nécessaire d'en tenir compte lors de l'étude de la torsion générale due à des charges horizontales transversales, telles que le séisme ou la force centrifuge.

Dans les travées courbes, la compression des membrures supérieures crée des forces transversales, qui produisent un effort de cisaillement horizontal et de flexion horizontale de ces membrures supérieures, ainsi que de la flexion transversale dans les âmes.

Dans le cas où les membrures supérieures sont encastrées en torsion sur les appuis, il y a une traction transversale dans la dalle inférieure dans la partie centrale de la travée.

Pour ces raisons, une analyse minutieuse en trois dimensions en utilisant un modèle aux éléments finis est nécessaire.

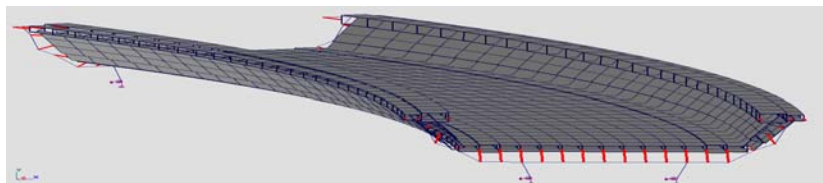


Figure 3. Exemple de modèle aux éléments finis 3D

3.4. Les méthodes de construction

Pour les viaducs longs, il est évidemment intéressant d'utiliser la préfabrication.

Dans le cas d'un tablier à voie unique («petit U»), pour des portées modérées (jusqu'à 30 m), le poids d'une travée est réduit (inférieur à 220 t), de sorte que la travée entière peut être préfabriquée. Dans ce cas, on pratique généralement la pré-tension longitudinale, car elle est plus économique que la post-tension (pas d'ancrages, pas de gaines, pas d'injection).

Deux travées, soit quatre poutres préfabriquées en U, peuvent être assemblées chaque nuit, à l'aide de deux grues (en moyenne 1 heure par poutre y compris le déplacement et le réglage de la grue). Autrement, les travées préfabriquées peuvent être transportés sur le pont déjà réalisé, et installés avec une poutre de lancement, en particulier si le transport d'éléments de grande longueur est un problème (villes encombrées).

Dans le cas d'un tablier à deux voies («grand U»), la section peut être construite soit avec deux poutres latérales préfabriquées précontraintes et une dalle inférieure coulée en place, soit avec des voussoirs préfabriqués à joints conjugués. Cette dernière méthode est bien sûr la plus efficace. Les voussoirs courants peuvent être préfabriqués par la méthode du long banc, et les voussoirs sur piles sont préfabriqués en cellule. La préfabrication est beaucoup plus facile que pour les caissons classiques, car il n'existe pas de coffrage intérieur compliqué. Deux voussoirs courants peuvent être construits par jour pour chaque long banc.

L'assemblage des voussoirs est généralement réalisé à l'aide d'une poutre de pose. Les voussoirs sont amenés par camion, soit en dessous de la poutre de pose, soit par le tablier déjà construit. L'assemblage est plus facile qu'avec un caisson classique, en raison des meilleures conditions de travail avec une section en U ouverte. Le cycle de construction est de deux à trois jours par travée.

4. EXEMPLES

4.1. Ligne de métro n° 5 de Santiago (Chili)

A Santiago (Chili), la ligne de métro n° 5 comprend un viaduc de 5,6 km de long et 6 stations en viaduc. Il s'agit d'un métro sur pneus. La charge par essieu est de 12 t. Le tablier est constitué d'un U en béton portant deux voies («grand U»).

Les travées varient de 30 à 36 m. Le tablier mesure 9,12 m de large. Santiago est dans une région hautement sismique.

Le tablier est construit en deux phases. Des poutres latérales préfabriquées précontraintes sont installées avec une grue pendant la nuit. La dalle est ensuite coulée en place sur un coffrage suspendu aux poutres latérales, et précontrainte transversalement. Aucune interruption de la circulation n'est nécessaire pendant cette phase.

La même section est utilisée dans les stations, de sorte que le viaduc représente plus de la moitié des coûts de génie civil de la station.

Le temps de construction est de 18 mois pour un viaduc de 5,6 km de long. Ce projet a été un grand succès. Le délai de construction a été raccourci, et le coût a été diminué de plus de 20%. Les études et la construction ont été réalisées de 1993 à 1997.

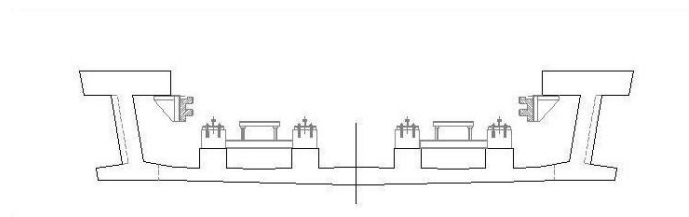


Figure 4. Santiago ligne n° 5 – Section transversale



Figure 5. Vue de la ligne n° 5 de Santiago

4.2. Ligne de métro n° 2 de Guangzhou (Chine)

En 1998, SYSTRA a réalisé la conception du viaduc de la ligne n° 2 de Guangzhou (Chine) et a supervisé les études détaillées. Chaque pont supporte une voie (« petit U »). La travée courante est de 25m. Le tablier mesure 5,32 m de large et 1,87 m de hauteur.

Pour ce projet, le client (la ville de Guangzhou) a demandé à tester la travée courante en conditions réelles, jusqu'à la ruine. Les essais ont été très fructueux et les autorités locales ont approuvé l'emploi de ce concept dans la ville de Guangzhou, ainsi que dans le reste de la Chine. Un essai a été réalisé afin de simuler un déraillement, et a montré que l'âme latérale était en mesure de résister à la charge horizontale transversale du déraillement.

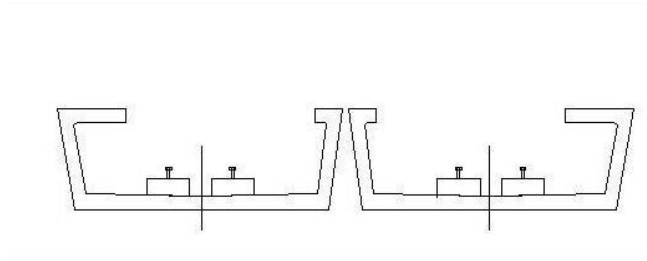


Figure 6 Guangzhou ligne n° 2 – Section transversale



Figure 7. Guangzhou ligne n° 2 – Travée d'essai

4.3. Ligne de métro de Neihu à Taipei (Taiwan)

En 2001-2002, SYSTRA a réalisé les études préliminaires et détaillées d'un viaduc en U pour la ligne de Neihu, à Taipei, qui est le prolongement de la ligne de Mucha existante. Le système de transport est de type VAL.

Le viaduc a 11 km de long, et il y a 10 stations. Le tablier est composé de deux petits U supportant chacun une voie. Les travées ont 25 m, et sont préfabriquées par travées entières, avec pré-tension. Taipei est dans une région hautement sismique. Le pont mesure 4,27 m de large et 1,30 m de hauteur. Les chevêtres sont précontraints. La construction a débuté en 2004. Quatre travées préfabriquées ont été mises en place au cours de chaque nuit. L'architecte est B+M Architecture.

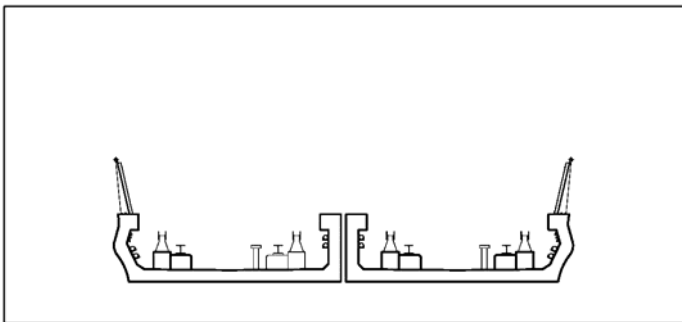


Figure 8. Viaduc de la ligne Neihu – Section transversale



Figure 9. Viaduc de la ligne Neihu - Vue générale

4.4. Ligne de métro n° 4 de Santiago (Chili)

A Santiago (Chili), la ligne de métro n° 4 comprend un viaduc de 6,91 km de long et 6 stations en viaduc. Le tablier est constitué d'un U en béton, construit en voussoirs préfabriqués. La même section est utilisée dans les stations.

Le tablier en U supporte les deux voies. Il a été dessiné avec des architectes chiliens. Deux types de sections transversales sont réalisés. L'un, utilisé pour les alignements droits et pour les courbes de rayon supérieur à 2500 m, a une largeur totale de 9,62 m. L'autre, utilisé pour les courbes de rayon inférieur à 2500 m, et pour les zones d'appareils de voie, a une largeur totale de 9,914 m. L'épaisseur du tablier est 1,85 m.

Les portées sont variables de 28 m à 35 m. Les travées sont toutes simplement appuyées, avec des appuis en élastomère. Les voussoirs préfabriqués ont typiquement 3,5 m de long, et les voussoirs sur pile ont 1,7 m de long. Il y a de la précontrainte transversale uniquement dans les voussoirs sur pile. Avec l'utilisation de voussoirs préfabriqués, il est possible d'obtenir un tablier qui suit exactement la courbure de la voie, ce qui améliore l'esthétique du viaduc, comparé au cas de travées droites, avec des angles concentrés au droit des piles.

Les voussoirs ont été réalisés sur un long banc avec un coffrage mobile. Ils ont été assemblés travée par travée en utilisant une poutre de pose en acier. Trois poutres de pose ont été utilisées pour le projet, en raison du planning serré.

La vitesse maximum de construction a été inférieure à 2 jours par travée.

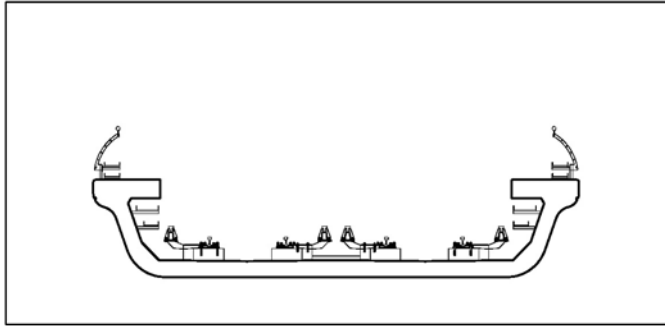


Figure 10. Santiago ligne de métro n° 4
Section transversale



Figure 11. Santiago ligne de métro n° 4
Vue générale

4.5. Ligne de métro n° 3 de Delhi (Inde)

La ligne n° 3 du métro de Delhi fait partie d'un réseau de métro aérien de 245 km prévu pour satisfaire la demande de trafic à l'horizon 2021.

La ligne n° 3 s'étend sur 21,68 km. Elle comprend 21 stations aériennes. L'architecte du viaduc est B+M Architecture.

Les tabliers en U supportant deux voies ont été dimensionnés avec les règlements indiens. Les règles UIC ont été utilisées pour les études d'interaction rail-structure.

Les six travées standard comprennent une travée de 25 m et une travée de 31 m. Trois sections transversales différentes sont utilisées ($L = 31\text{ m}$, $L = 28\text{ m}$, $L < 25\text{ m}$). L'épaisseur du tablier est 2,15 m, et la largeur est 10,75 m.

Les voussoirs ne sont pas précontraints transversalement sauf les voussoirs sur pile. La précontrainte longitudinale est conçue avec un objectif de standardisation (masque identique pour tous les voussoirs).

Au niveau de la tête de pile, une clé de cisaillement est utilisée pour le transfert des forces sismiques horizontales dans les piles. Le niveau des membrures supérieures est ajusté pour permettre l'évacuation d'urgence des passagers.

Le bord transversal des membrures supérieures est ajusté pour tenir compte des courbes: le dévers, le rayon, et les tolérances de construction sont prises en compte. Les clothoïdes sont approchés par un cercle.

Pour le drainage, une pente minimum de 0,3 % est donnée au tablier.

Le même tablier est utilisé dans les stations. Les piles des stations supportent, en plus du viaduc, une poutre précontrainte transversale qui porte les quais (soutenu par des poutres en acier).

Une travée d'essai de 25 m de long a été réalisée. Sous la charge d'exploitation, la déformation verticale maximum mesurée était de 9,3 mm par rapport à une valeur théorique de 10,4 mm. Le déplacement transversal de la membrure supérieure sous le déraillement représenté par une charge horizontale de 17 t était inférieur à 1 mm.

Le calendrier de construction était serré, avec seulement 20 mois pour achever la construction des 22 km de pont. Quatre poutres de pose ont été utilisées.



Figure 12. Viaduc de la ligne n° 3 de Delhi
Section transversale



Figure 13. Viaduc de la ligne n° 3 de Delhi
Voussoir préfabriqué



Figure 14. Delhi ligne n° 3 – Travée d'essai



Figure 15. Delhi ligne n° 3 – Vue générale

Le pont extradossé de Pragati Maidan, sur l'extension de la ligne n° 3 du métro de Delhi, a une travée centrale de 93 m. Le tablier a la même section que les travées courantes, mais avec un épaississement des âmes pour placer les ancrages des câbles extradossés. Ces câbles sont recouverts par un voile de béton qui permet de les considérer comme des câbles internes. Ce voile augmente également la rigidité de la travée principale. Grâce à l'utilisation de voussoirs préfabriqués et de matériaux de construction courants, ce pont extradossé a été construit en moins d'un an. Ce pont est le premier du genre à être construit en utilisant la méthode de construction par encorbellement, et il est le premier pont extradossé jamais construit en Inde.

4.6. Lignes de métro de Dubaï

SYSTRA a réalisé les études de conception de deux lignes de métro à Dubaï. Le métro de Dubaï sera entièrement automatisé, sans conducteur. La ligne rouge et la ligne verte ont une longueur totale de 75 km, dont 13 km enterrés et 62 km aériens. L'architecte du viaduc est B+M Architecture.



Figure 16. Pragati Maidan - Pont à précontrainte extradossée

Pour répondre au calendrier très serré (le contrat de conception-construction a été finalisé en juillet 2005, et le service doit commencer le 09/09/2009 pour les 52 km de la ligne rouge et le 21/03/2010 pour les 22 km de la ligne verte), SYSTRA a proposé un nombre limité de types de structures polyvalentes qui peuvent accueillir toutes les configurations de travées :

- travées isostatiques jusqu'à 36m (travée type de 32m),
- deux travées continues de 36m à 44m: ces structures sont construites comme deux travées simples,
- trois travées continues jusqu'à 72m de portée: ces longs ponts sont nécessaires pour la plupart des échangeurs routiers traversés par la ligne. Ils disposent d'un tablier de hauteur variable résultant de la combinaison d'un U et d'un caisson.
- travées rendues continues dans les stations: la continuité est requise par la valeur très limitée des mouvements admissibles du tablier du fait de la présence de portes palières sur les quais.
- stations à trois voies (Nakheel et Rashidiya): certaines travées sont coulées en place alors que les travées à une voie sont préfabriquées.

Les tabliers supportent une ou deux voies. Le tablier type pour deux voies mesure 10,50 m de largeur et 2,04 m de hauteur. Un total de 16500 voussoirs doivent être préfabriqués (75% pour la ligne rouge et 25% pour la ligne verte) à l'aide de 66 moules (longs bancs et cellules). La production journalière est de 35 à 40 voussoirs. L'aire de préfabrication est desservie par 11 portiques et 8 grues à tour. Le poids des voussoirs varie de 49 t pour les courants à 88 t pour certains voussoirs des ponts à 3 travées. Les voussoirs sont transportés vers le site sur des remorques spéciales (longueur maximale des voussoirs 4 m).



Figure 17. Métro de Dubai – Aire de préfabrication



Figure 18. Métro de Dubai - piles et chevêtres

Les travées sont assemblées par plusieurs méthodes:

- travée par travée à l'aide de poutres de pose par au-dessus (9 unités). Ceci est applicable à toutes les travées sauf les ponts à trois travées.
- travée par travée sur échafaudage (généralement lorsque le gabarit des poutres de pose n'est pas disponible, en raison des structures existantes ou de lignes électriques aériennes) (8 unités). Ceci est applicable à toutes les travées sauf les ponts à 3 travées. Une travée est posée en une semaine.
- par encorbellement pour les ponts à 3 travées (voussoirs levés par une grue ou une charpente de hissage)(6 unités). Un pont à trois travées est posé en un mois environ.

Le choix des poutres de pose répond aux critères de vitesse: une travée courante est posée en moins de 2 jours.

Afin de réduire l'impact sur le trafic et d'obtenir une bonne qualité, l'entrepreneur a choisi de préfabriquer les chevêtres (ou plus exactement de préfabriquer une coque de chevêtre afin de réduire au minimum la capacité de la grue).

La station est construite comme une enveloppe autour du viaduc. La membrure supérieure du U du tablier fait partie du quai de la station. Le tablier est construit en premier, avec la même méthode de construction que pour le viaduc courant.



Figure 19. Métro de Dubai – Travée type



Figure 20. Métro de Dubai – Travée de hauteur variable

4.7. Ligne de métro de Uijongbu (Corée du Sud)

Le métro de Uijongbu (près de Pusan, Corée du Sud) comprend 11,2 km de viaducs, avec une section en grand U. Le système de transport est un VAL.

Les structures comportent des travées isostatiques de 20m, 25m et 35m, et diverses travées continues. Le tablier est constitué de voussoirs préfabriqués assemblés sur une poutre de pose, travée par travée. Le tablier est courbe dans les zones de voie courbe.

Les travées sont appuyées sur des appuis en élastomère. Les voussoirs préfabriqués ont une longueur courante de 3,30 m, et les voussoirs sur pile ont 1,75 m de longueur. Il n'y a pas de précontrainte transversale. La section courante mesure 7,45 m de large et 1,71 m de hauteur.

Le projet a été conçu en 2006-2007 et la construction commence.

4.8. Ligne de métro n° 8 de Shanghai (Chine)

La ligne de métro n° 8 de Shanghai comprend un viaduc de 6,35 km de long.

Le tablier est constitué d'un U en béton, construit par travées entièrement préfabriquées (« petit U »). La même section est utilisée dans les stations, avec une largeur légèrement différente. Le tablier mesure 1,80 m de hauteur et 5,224 m de largeur. Les portées sont variables de 20 m à 30 m. Les travées sont toutes isostatiques, avec des appareils d'appui à pot. Les travées sont précontraintes longitudinalement par post-tension.

Un test de chargement d'une travée en grandeur réelle a été réalisé avec succès. La structure a été construite en 2007.

4.9. Autres projets

D'autres projets sont actuellement étudiés par SYSTRA :

- Métro de Mumbai (Inde), dont 11,1 km de viaducs avec des sections en petit U,
- Métro de Taichung (Taiwan), dont 20 km de viaducs avec des sections en petit U,
- Liaison avec l'aéroport de Delhi (Inde), dont 7 km de viaducs avec des sections en petit U,
- Métro de Lahore (Pakistan), dont 14,7 km de viaducs,
- Ligne n° 2 du métro de Hô Chi Minh (Viet-Nam), dont 7,2 km de viaducs,
- Ligne verte du Métro de Damas (Syrie), dont 6 km de viaducs,
- Métro de La Mecque (Arabie Saoudite), dont 16,7 km de viaducs.

5. CONCLUSION

Depuis 1992, plus de 150 km de tabliers en U en béton précontraint pour viaducs de métro ont été étudiés. La section en U est un concept intéressant pour les viaducs de métro. Elle est économiquement efficace. En raison de l'abaissement du profil en long de la ligne et du niveau des stations, elle facilite l'insertion de la structure dans un environnement urbain. Ce concept a fait la preuve de son intérêt en termes de fonctionnalité, d'économie, et de rapidité de construction.

6. RÉFÉRENCES

- [1] DUTOIT D., MONTENS S., CHUNIAUD J.-C., ARNAUD P., «U shape prestressed concrete decks for LRT/MRT viaducts», IABSE Symposium, Shanghai, 2004.
- [2] GAUTHIER Y., MONTENS S., «U shape prestressed concrete decks for LRT/MRT viaducts», fib Symposium, Naples, 2006.
- [3] GAUTHIER Y., MONTENS S., KATARIA R., TOUAT A., «Pushing the limits of U shaped viaducts», IABSE Symposium, Weimar, 2007.
- [4] GAUTHIER Y., MONTENS S., ARNAUD P., PAINEAU T., «U shape viaducts for Dubai metro», fib Symposium, Amsterdam, 2008.