

LE PONT DE HONG-KONG-ZHUHAI MACAO LE BARREAU AUTOROUTIER D'HONG-KONG

Y. RIALLAND, V. PREMAUD, C. CREMONA

Bouygues T.P., Guyancourt, France

Y.W. LEUNG

YWL Engineering Pte Ltd, Singapore

M. CHAN

Dragages Hong Kong, Hong Kong SAR, RPC

W.K. POON, S.H. CHAN

China Harbour Engineering, Hong Kong SAR, RPC

Introduction

Le pont Hong Kong - Zhuhai - Macao (HZMB) sera l'une des traversées maritimes autoroutières les plus longues dans le monde (42 km), fournissant une connexion entre deux rives du Delta de la Rivière des Perles, reliant ainsi Hong Kong à l'Est à Macao et Zhuhai à l'ouest (Fig.1). Le barreau autoroutier d'Hong Kong (HZMB-HKLR) est le tronçon du pont HZMB reliant la frontière d'Hong-Kong à la zone de Scenic Hill sur l'île artificielle de l'aéroport Chep Lap Kok d'Hong-Kong. Les travaux comprennent la conception et la construction d'environ 9,4 km de viaducs à 2x3 voies de circulation. Le contrat qui s'élève à 12,9 milliards de dollars hongkongais a été attribué au groupement Dragages-Chine Harbour-VSL en mai 2012. Les études ont été menées conjointement avec le Bureau d'Études Singapourien YWL Engineering, Mott MacDonald et le Bureau d'Études de Bouygues TP. L'architecte du groupement est le cabinet Alain Spielmann.

Les 115 travées constituant le projet sont regroupées en 19 viaducs classés en trois grandes catégories : viaducs courants maritimes, viaducs terrestres et grands viaducs [1]. Un soin particulier a cependant été porté pour assurer une cohérence et une optimisation des coffrages, et ainsi l'unité architecturale entre les viaducs. Le retournement de circulation se fait au-delà des limites du projet sur le BCF (Boundary Crossing Facilities), pour passer d'une circulation à droite à une circulation à gauche.

L'article présente les enjeux et les solutions techniques retenues lors de la conception et de la construction de ces viaducs. Il fait la synthèse de plusieurs articles publiés par les auteurs [1, 7, 9]

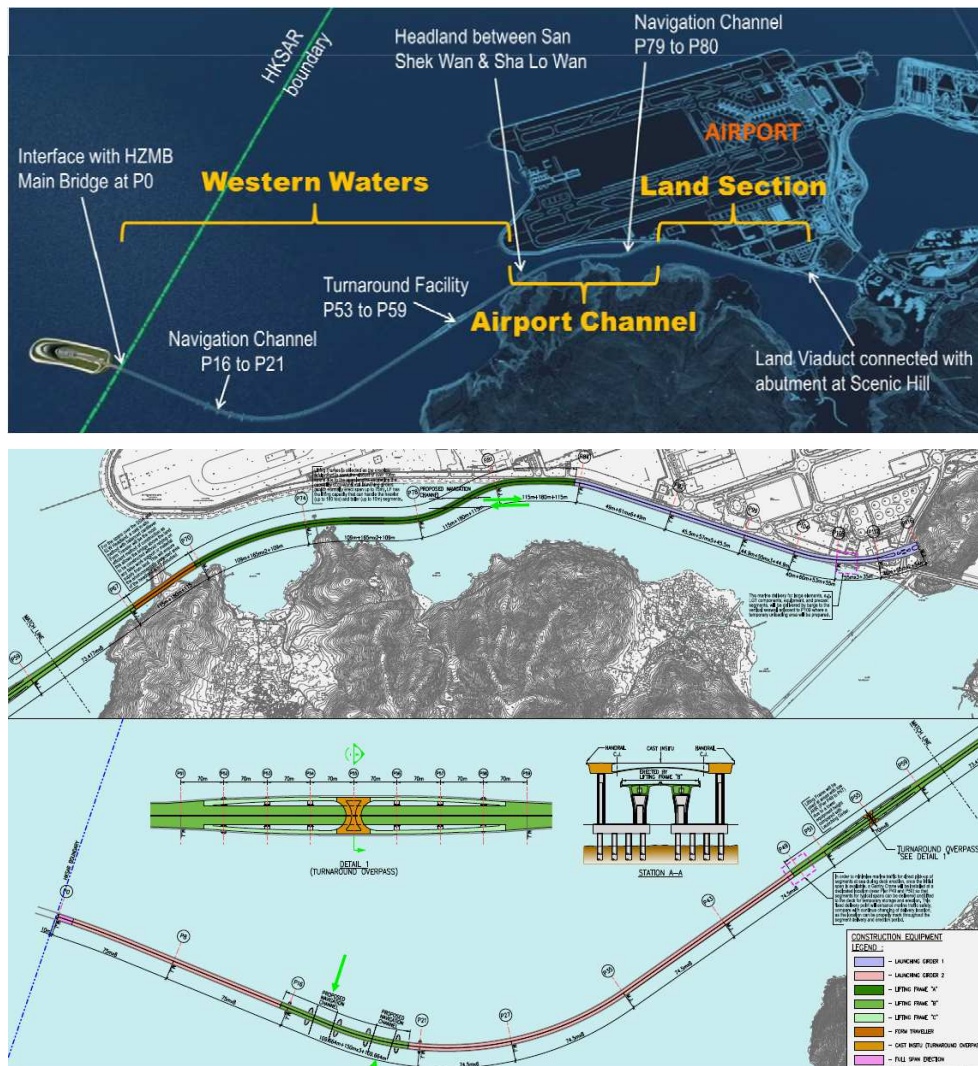


Fig.1. Localisation du barreau HZMB-HKLR. ©photothèque BYTP

Les contraintes du projet

A l'ouest du projet, dans la zone de connexion du barreau HZMB-HKLR avec le reste du pont HZMB, le fond de mer se situe à 30m-40m composé de sols argileux. En raison de la présence de failles, le sol rocheux peut se situer à plus de 100 m de profondeur. Proche de la côte, la géologie change de manière significative avec un fond rocheux à faible profondeur. La présence d'un site archéologique impose de ne pas construire d'ouvrages permanents ou provisoires et donc d'adopter des portées de 180 m. De telles portées sont également nécessaires dans la passe de l'aéroport d'Hong Kong où un chenal de navigation double de 46 m est imposé. Les semelles dans cette passe sont enterrées dans le fond marin afin de réduire les effets hydrodynamiques tandis que, pour la zone de navigation, elles dépassent le niveau de l'eau de +3.95m. Les viaducs terrestres épousent enfin la côte pour rejoindre le tunnel de Scenic Hill.

En dehors des contraintes de travaux en site maritime, plusieurs autres contraintes se sont imposées : impact écologique sur une espèce de dauphins blancs, logistique dans le transport des matériaux, bruit, pollution et restrictions imposées par l'exploitation de l'aéroport d'Hong Kong.

A cause de portées supérieures à 150 m, plusieurs schémas structuraux ont été imaginés afin de satisfaire les contraintes du projet. L'option d'un pont à haubans a notamment été étudiée, pour être finalement rejetée en raison des restrictions de hauteur à proximité de l'aéroport.

Une autre solution fut de retenir un tablier caisson mixte acier-béton mais jugé de construction et d'entretien trop onéreux, il fut remplacé par une variante en caisson béton préfabriqué. Le challenge technique était alors de construire des ouvrages en voussoirs préfabriqués de plus de 180 m de portée.

La conception des viaducs a été menée selon les règles édictées par le Highways Department of HKSAR Government. Ils sont dimensionnés aux états limites ultimes et de service du BS5400 [8] avec une durée conventionnelle de projet de 120 ans. Deux scénarios (séisme et impacts de bateaux) dérogent à cette règle : ils sont considérés comme des événements extrêmes et donc dimensionnés aux états limites d'intégrité structurale.

L'Eurocode 8 (Parties 1, 2 et 5) a été employée pour la conception sismique [2-4]. Les deux niveaux de performance de l'Eurocode 8 ont été élargies à trois exigences : « absence de dommage », « dommage réparable » et « absence d'effondrement ». Pour la conception aux impacts de bateaux, les recommandations de l'IABSE [5] et celles de l'AASHTO [6] ont été utilisées.

Les ouvrages

Les **viaducs maritimes courants** sont constitués de 8 travées égales de 75 m, commencent à P00 en région administrative spéciale de Hong Kong (HKSAR), dix mètres au-delà de la frontière (Fig.2). Une zone de raccordement est réalisée sur les premiers mètres du projet pour se reprendre sur le tablier côté chinois un peu plus large et moins épais. ML01 et ML02 sont les deux premiers viaducs entre les piles P00 et P16. Entre les piles P16 et P21, en vue de dégager les deux passes navigables en mer, ML03 est le premier grand viaduc à hauteur variable avec 5 travées (109 m+3x150 m+109 m). Au-delà vers Hong Kong, se déclinent les autres viaducs maritimes courants ML04 à ML09 identiques aux ML01 et ML02.

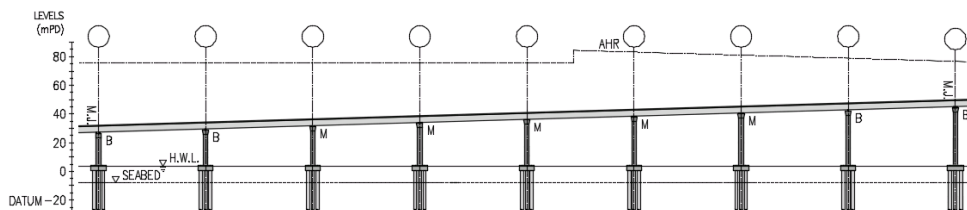


Fig.2. Viaducs en mer. ©photothèque BYTP

Les **grands viaducs** débutent avec le viaduc ML3 et se poursuivent avec les viaducs proches de la passe de l'aéroport (ML10 à ML14). Le viaduc ML3 (Fig.3) est formé de 5 travées (109 m+3x150 m+109 m). Les joints d'expansion et les appuis ne sont installés que sur les piles extrêmes. Le tablier est encastré sur les piles centrales en bilames et repose sur des appareils d'appuis glissant longitudinalement sur les piles culées avec blocage transversal. La forme de ces piles a été choisie pour minimiser la raideur longitudinale de l'ouvrage et pour réduire les effets de blocage dus au retrait, fluage et déformations thermiques.

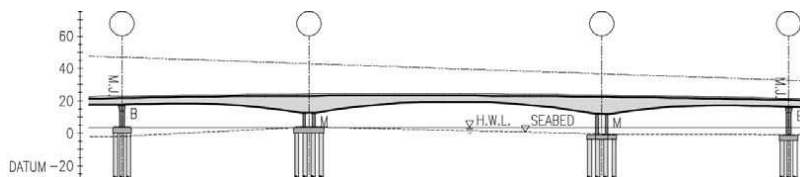


Fig.3. Grands viaducs. ©photothèque BYTP

Proche des terres, un ouvrage continu à trois travées (115 m+180 m+111 m) permet de franchir un site archéologique (Fig.5). Enfin, le couloir maritime proche de l'aéroport est couvert par 2x2 viaducs (109 m+2x165 m+109 m et 115 m+2x180 m+115 m). La portée de 180 m constituait une limite pour les ponts à voussoirs précontraints construits jusqu'à ce jour. Avec des hauteurs de caisson variables de 4 m à 10 m, l'élancement est de 1/45 à mi-portée et de 1/18 sur appui.

Les **viaducs terrestres** longent l'île artificielle de l'aéroport entre P84 et P115. La proximité de l'aéroport nécessite des ouvrages bas, mais la présence de nombreux réseaux (dont un de kérosène) et le passage au-dessus de routes et des fondations de la digue constituent les contraintes principales. L'ouvrage est constitué de 5 viaducs (ML15 à ML19) d'une longueur de 1,7 km. Le nombre de travées varie de 4 à 8 (portées de 55 à 65 m).

A ces viaducs s'ajoute l'**ouvrage de retournement** [7] dont les rampes d'accès participent assez largement à la complexité du projet sur les viaducs depuis ML07 à ML09 (Fig.4).



Fig.4. Ouvrage de Retournement. ©photothèque BYTP

Les fondations

725 pieux forés composent le projet, dont 65 pour les viaducs terrestres (2,8 m de diamètre) et 660 pour les viaducs en pleine mer (2,3, 2,5 et 2,8 m de diamètres). A cause d'une géologie chaotée, les pieux ont des longueurs variant de 7 m à 107 m.

Les pieux en mer (P00 à P68) sont soit forés à la boue par la Méthode Kelly, soit à la tarière pour les pieux tubés (Méthode Reverse Circulation Drilling). La méthode Kelly est utilisée de P16 à P49, ainsi que sur P00. Les pieux font de 80 à 400 m³ par unité. Les plateformes de travail sont des structures métalliques mobiles reposant sur des tubes métalliques battus de 1,20 m de diamètre.

Les pieux les plus longs sont ceux des viaducs maritimes où la géologie est caractérisée par une couche épaisse (max. 40 m) de dépôts marins, superposés à des couches alluvionnaires argileuses ou sableuses. Le fond rocheux peut dépasser les 100 m au-dessous du niveau de la mer, ce qui a imposé l'emploi de pieux forés frottants. Ces pieux sont tubés et injectés en pointe [7].

Les semelles

Les semelles sont des éléments classiques en béton armé. A l'exception des viaducs du couloir de l'aéroport, la partie supérieure des semelles est à +3.90 m, ce qui les rends visible des bateaux y compris à marée haute. Le nombre de pieux associés varie de 3 à 6. Pour procurer un environnement de travail sec et sûr, des coques préfabriquées sont utilisées comme coffrage perdu, mais intégré à la semelle permanente comme protection supplémentaire vis-à-vis des agressions marines.

Il y a 7 types de coques dont deux sont présentées à la Fig.5 [9]. L'épaisseur des parois et de la dalle est respectivement de 300 mm et 450mm. Ces coques doivent remplir des exigences de résistance et de durabilité. Elles doivent en effet résister aux contraintes de confinement du cœur de béton, aux sollicitations de houle, et aux effets thermiques liés à la phase d'hydratation du béton coulé. Bien que les coques ne participent pas à la reprise des charges d'exploitation, elles satisfont aux mêmes critères de durabilité des bétons spécifiés dans le contrat, à savoir une durée de projet de 120 ans (Fig.6).

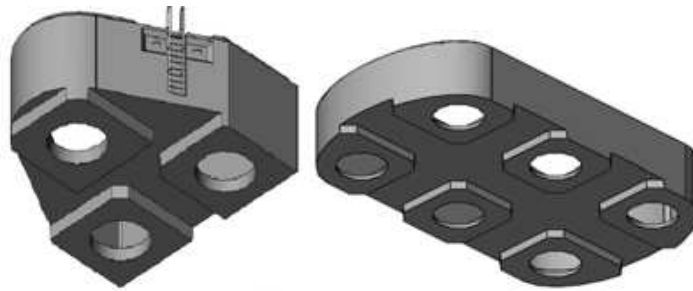


Fig.5. Exemples de coques préfabriquées en béton. ©photothèque BYTP

La géométrie complexe de ces coques a nécessité une modélisation 3D aux éléments finis pour simuler le comportement structural aux différentes phases de construction. Les contraintes thermiques d'hydratation constituent le cas de charge principal. Les contraintes de traction s'élèvent à 6-7 MPa. Sans contrôle thermique, une quantité significative d'armatures passives auraient été nécessaires pour éviter la fissuration. Pour cela, une idée novatrice d'isolation thermique a été conçue. Une couche mine de matériau isolant aux caractéristiques thermiques et mécaniques a été introduite et montée sur les faces internes des coques.



Fig.6. Coque préfabriquée de semelle. ©photothèque BYTP

Les piles

Hormis les piles courtes de P45 à P67 coulées en place, les piles des **viaducs maritimes courants** sont préfabriquées et creuses (Figs.7-8). Les dimensions extérieures et intérieures de ces piles sont respectivement 5,0 mx3,2 m et 3,0 mx1,5 m.



Fig.7. Piles préfabriquées des viaducs maritimes ©photothèque BYTP

Les voussoirs des colonnes préfabriquées sont à joints conjugués, donc impliquant des clouages permanents qui s'ancrent soit dans la semelle, soit dans la première levée de pile coulée en place. Des câbles de précontrainte en U sont utilisés pour relier les différents voussoirs. En tête, ces câbles s'ancrent dans la tête de pile préfabriquée, les ancrages en service étant noyés dans le remplissage béton coulé en place (Fig.8).

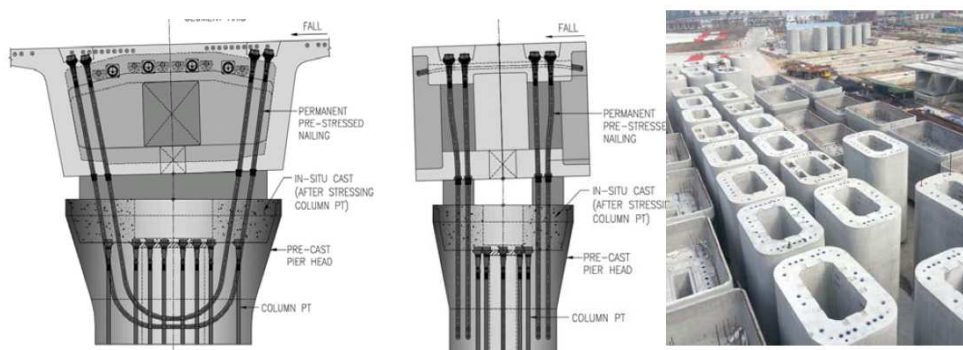


Fig.8. Connexion pile-tablier des viaducs maritimes. ©photothèque BYTP

Deux types de colonnes doivent être distinguées, celles dites fixes sur lesquelles le tablier est encastré, et les glissantes munies d'appareils d'appuis (MAGEBA). Les têtes de piles sont élargies par rapport au fût pour permettre la reprise des efforts du tablier. Vis-à-vis du séisme, les appareils d'appuis spéciaux sont munis d'un dispositif fusible, de telle façon que sous les sollicitations extrêmes, des butées parasismiques reprennent les efforts transversaux.



Fig.9. Piles des grands viaducs. ©photothèque BYTP

Les piles des grands viaducs sont toutes coulées en place. Le tablier est encastré sur les piles centrales en bilames et repose sur des appareils d'appuis glissant longitudinalement sur les piles culées avec blocage transversal (Fig.9). L'encastrement sur des doublets de piles est une disposition appropriée avec des piles hautes, en particulier sur ML03 : il préserve une souplesse longitudinale par rapport aux déformations linéaires et au séisme longitudinal. Les piles des viaducs terrestres sont de section carrée 3,20x3,20 m sont directement montées sur un pieu bétonné à l'intérieur d'une chemise métallique provisoire de 3 m de diamètre et 32 mm d'épaisseur foncée jusqu'au rocher. La section utile d'encastrement dans le rocher présente un diamètre de 2,78 m (Fig.10).

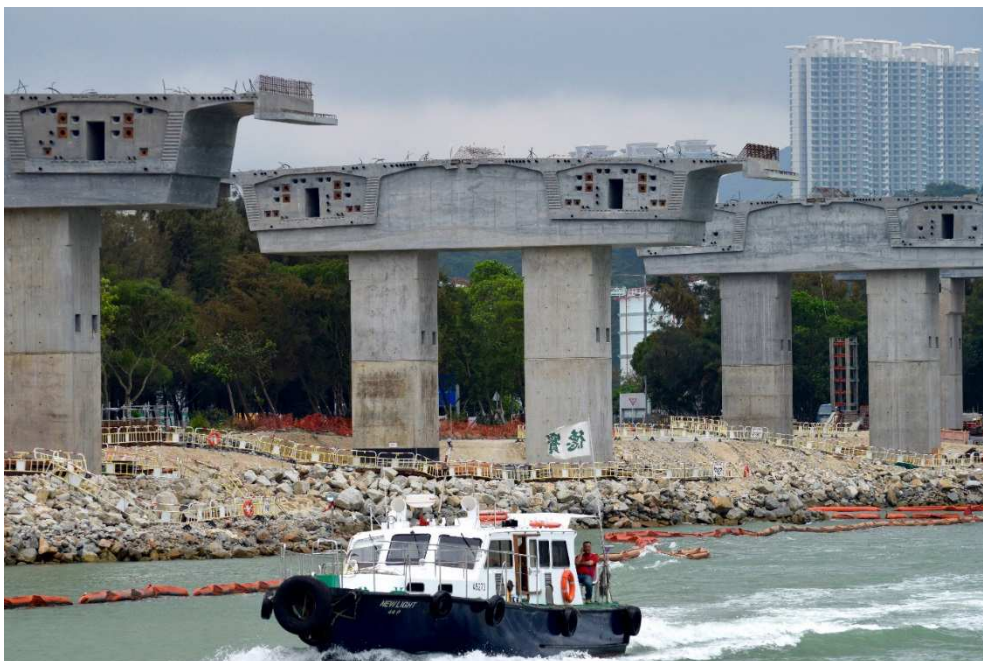


Fig.10. Piles des viaducs terrestres. ©photothèque BYTP

Les tabliers

La section typique des **viaducs maritimes courants** est un tablier double de 4 m de hauteur. La chaussée a une largeur de 14,80 m pour chacune des deux directions de circulation, et comprend un séparateur central de 1,30 m (Fig.11).

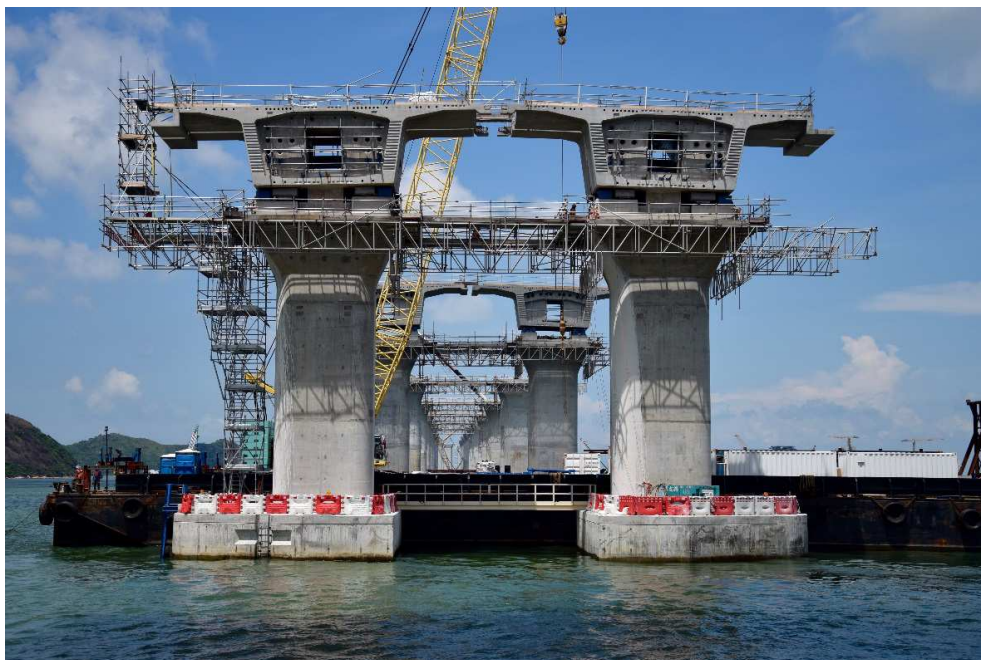


Fig.11. Tablier des ouvrages en mer. ©photothèque BYTP

Le tablier est porté par deux colonnes séparées reposant sur deux semelles de forme triangulaire, qui reprennent chacune trois pieux de diamètre 2,30 m. Les galeries techniques sur les rives des caissons constituent une particularité dans la mesure où elles sont préfabriquées avec les voussoirs.

Les fléaux des travées en mer sont constitués de 2x10 voussoirs, plus deux demi-voussoirs sur piles. La construction se fait par encorbellements successifs, soit à la chèvre de levage, soit à la poutre de lancement. Les voussoirs sur piles sont montés à la grue.

Afin de réduire les actions de maintenance, à l'exception des deux premières piles de part et d'autre du viaduc, le tablier est totalement encastré sur les piles. Bien que le balancement des travées ne soit pas optimum sur les rives, cette répartition régulière est requise pour satisfaire une spécification architecturale fixée par le marché. Une précontrainte mixte (interne, extérieure) a été retenue afin de minimiser les poids propre du tablier et réduire les temps de lavage. Les câbles internes ont pour vocation de supporter le poids propre des fléaux tandis que la précontrainte extérieure est destinée à reprendre les autres charges. Ces câbles sont conçus pour être remplacés et des gaines supplémentaires ont été prévues à cette intention. Afin d'améliorer la performance et la construction des déviateurs, une surface en forme de diabololo a été adoptée, à la différence des tubes à simple courbure communément utilisés sur les chantiers de Hong-Kong.

Pour les **grands viaducs**, le tablier est encastré sur un doublet de piles bilames, ce qui procure une rigidité aux viaducs tandis que les appuis glissants (avec blocage transversal) aux deux extrémités autorisent les mouvements de retrait, fluage et thermiques. Ce choix structural se traduit par une forte interaction entre les tabliers, les piles et les fondations. Le fonctionnement en « portique » dans le sens longitudinal est donc très sensible à la raideur des fondations (notamment pour les piles de petite hauteur) et aux sollicitations/déformation induites par le séisme ou les mouvements longitudinaux. Afin de réduire ces effets, les fléaux sont vérinés avant clavage.

Les tabliers des deux directions ont 16,82 m de largeur. Cependant, dans les zones à forte courbure (ML13, ML14 et partie de ML12), les voussoirs sont élargis à 18,47 m de façon à satisfaire aux critères de visibilité. Dans ces zones, les tabliers sont connectés transversalement par une double entretoise au niveau des VSP (Voussoirs sur Pile). Cette configuration conduit à une interaction entre les deux tabliers et le portique, ceci dans les deux directions transversale et longitudinale (Fig.12).



Fig.12. VSP des grands viaducs. ©photothèque BYTP

Les VSP forment les éléments les plus complexes de la conception du tablier. Ils servent deux fonctions : en premier lieu, de transfert des efforts longitudinaux du tablier vers les doublets de piles bilames, en second lieu de connexion entre les tabliers adjacents via les deux entretoises (Fig.13).

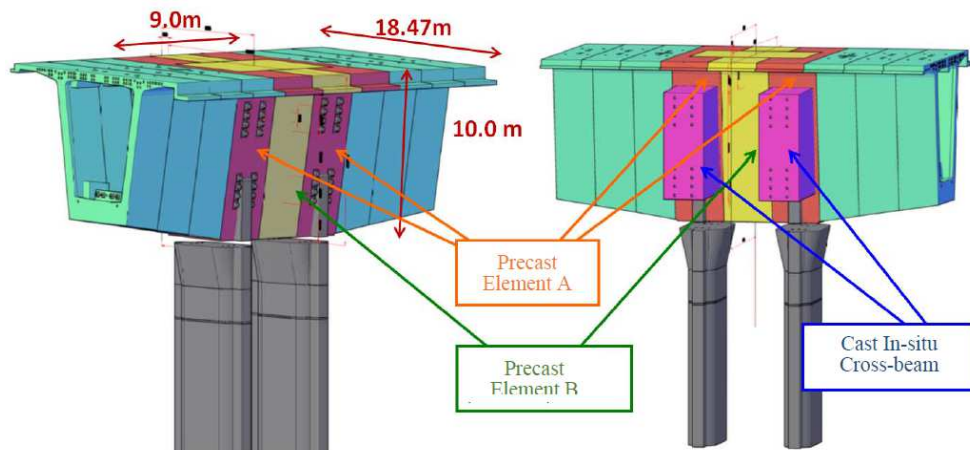


Fig.13. VSP sur les viaducs ML13-ML14. ©photothèque BYTP

Un VSP se compose de trois éléments préfabriqués servant de coffrage extérieur pour la réalisation de la partie avec les entretoises. Des clés de cisaillement servent de connexions entre les parties préfabriquées et coulées en place. Une précontrainte transversale permet de réduire les effets du fluage différentiel et d'améliorer les efforts de cisaillement.

Le tablier des viaducs terrestres repose sur un portique coulé en place, chaque colonne de section carrée étant supportée par un seul pieu (Fig.14). Le tablier est constitué d'un bi-caisson des piles P84 à P111 et d'un tri-caisson entre P111 et P115. Les viaducs sont érigés par encorbellement successifs par lanceur. Afin d'assurer un comportement structural adéquat, les viaducs reposent sur des appuis glissants aux extrémités et sont encastrés sur les piles intermédiaires.



Fig.14. Viaducs terrestres. ©photothèque BYTP

Standardisation des voussoirs

La clé du succès d'un tel ouvrage est de pouvoir rationaliser la fabrication des voussoirs. Dans ce projet, leur géométrie a été étudiée avec soin afin de limiter les méthodes de construction et les équipements nécessaires. Pour les portées de 75 m, un caisson type constant de 4 de hauteur a été utilisé. Pour les longues portées (150 m à 180 m), la hauteur des voussoirs varie de 10 m (max.) en pile à 4 m à mi-portée.

La conception des voussoirs de portées plus courtes a été réutilisée dans celle des portées plus longues. Par exemple, les voussoirs d'une portée de 165 m a été réemployée dans la travée de 180 m : l'écart a été réalisé au moyen de voussoirs additionnels.

Un site de préfabrication des voussoirs a été installé à Zhongshan (Mainland China) dès juillet 2013 avec 6 lignes de production pour couler les 5 694 voussoirs. Cette zone de 20 ha est équipée de toutes les installations nécessaires au coulage du béton et à l'érection des voussoirs. 3 lignes et 33 ensembles de coffrages sont utilisés quotidiennement. Les autres lignes de productions sont conservées pour la réparation et le stockage. Environ 1,000 voussoirs peuvent être stockés au rythme actuel d'érection. Deux jetées de déchargement ont été équipées de grues lourdes de manutention pour charger les barges (2 500 t ou 5 000 t de capacité).

Contrôle géométrique

Grâce au logiciel interne Datums de Bouygues TP, un modèle tridimensionnel est mis à jour après chaque réalisation de voussoir, pour ajuster la géométrie du voussoir suivant. A la pose, la géométrie attendue est réajustée en fonction du réglage des premiers voussoirs afin de réduire tout écart au clavage à mi-travée. Cette méthodologie a été mise en œuvre également pour les piles préfabriquées.

Conclusions

Les viaducs du HKZM-HKLR sont des ouvrages préfabriqués en béton précontraint construits par encorbellement successifs dont les portées varient de 35 m à 180 m. Les ouvrages maritimes représentent 7 km de ce barreau autoroutier et plusieurs techniques de construction ont été nécessaires pour répondre aux challenges imposés par le projet.

Le choix d'encastres entre piles et tablier constituent une approche originale pour réduire les travaux sur site et optimiser les cycles de levage. La conception et la mise en œuvre de coques préfabriquées pour les semelles de fondations sont également des approches novatrices du projet. La pose des voussoirs par encorbellements successifs se fait soit au moyen de lanceurs, soit au moyen de chèvres de levage. Le contrôle géométrique est également un enjeu considérable pour ce genre de projet : ce suivi géométrique permet l'analyse des écarts et le réglage des voussoirs sur pile de façon à réduire, autant faire se peut, les marches aux clavages en travée.

Références

- [1]. Rialland Y., Vivalrajah C., Premaud V., 2015. The Hong Kong Macao bridge. *Travaux*, 915, 102-108.
- [2]. EN1998-1, 2004. *Eurocode 8: Part 1 – General Rules*. European Commission, Brussels, European Union.
- [3]. EN1998-2, 2005. *Eurocode 8: Part 2 – Bridges*. European Commission, Brussels, European Union.
- [4]. EN1998-5, 2004. *Eurocode 8: Part 5 – Foundations*. European Commission, Brussels, European Union.
- [5]. Larsen O.D., 1993. *Ship collision with bridges*. IABSE Structural Engineering Document, N°4, Zurich, Switzerland.
- [6]. AASHTO, 2009. *Guide Specifications & Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges*. Second edition, Washington D.C., USA.
- [7]. Rialland Y., Premaud V., 2016. The Hong Kong Link Road - Contract N°. HY2011/09. *Travaux*, to be published.
- [8]. BS5400-4, 1990. *Steel, concrete and composite bridges: code of practice for the design of concrete bridges*. British Standards, London, U.K.
- [9]. Chan M., Leung Y.W., Premaud V., Poon W.K., Chan S.H., Rialland Y., 2016. Challenges in Hong Kong – Zhuhai – Macao Bridge (HZMB) - Hong Kong Link Road Project. IABSE conference, 9-11 May 2016, Guangzhou, China.