

LE SPORTS HUB DE SINGAPOUR

Arnaud GEORGENTHUM

Dragages HK, Macao, Chine

Introduction

Dragages Singapour, filiale de Bouygues Construction et membre du Singapore Sports Hub Consortium, groupement en charge du développement du projet, a livré en Juin 2014 le Sports Hub de Singapour, un vaste complexe dédié aux sports et aux loisirs. Nouvelle référence dans la région, le Sports Hub est appelé à jouer un rôle majeur dans l'accélération de l'industrie du Sport en Asie du Sud-Est (Fig.1).

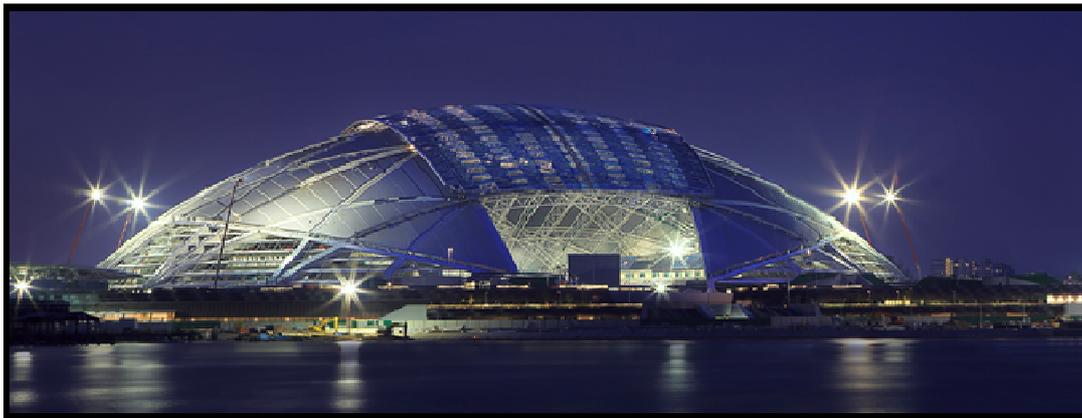


Fig.1. Le Sports Hub de Singapour

Situé sur un site de 35 hectares, à seulement 15 minutes de l'aéroport, le Sports Hub est le plus grand partenariat Public-Privé au monde en matière d'équipements sportifs. Il offre une opportunité unique pour le grand public d'accéder à l'univers du sport. En mettant les dernières technologies à disposition des athlètes nationaux, tout en étant un lieu ouvert à tous les publics, il place le sports au cœur de la communauté et peut accueillir des événements de classe mondiale (rencontres sportives, concerts, expositions, salons).

Le chantier a été livré en Juin 2014, 45 mois après le démarrage des travaux en Septembre 2010. Les travaux ont été entièrement réalisés par Dragages Singapour et ont mobilisé jusqu'à 2500 collaborateurs sur le chantier.

Périmètre du projet

Le projet inclus la conception, le financement, la construction, la maintenance et l'exploitation d'un complexe de loisirs et d'équipements sportifs de niveau international, en remplacement du Stade National existant construit en 1974. Il comprend (Fig.2) :

- La démolition du stade existant,
- Un stade d'une capacité de 55,000 places assises, avec un toit rétractable et un système de refroidissement dans les gradins,
- Un centre aquatique couvert de 3,000 places, permettant l'accueil de compétitions internationales,
- Un parc de loisirs aquatiques pour le grand public,
- Deux salles multisports de 3,000 places assises,
- Une zone de bureaux accueillant les fédérations sportives nationales, un musée dédié au sport et un centre de médecine sportive,
- Des espaces commerciaux et de restauration sur 41,000m²,
- L'intégration et la rénovation du stade couvert existant (salle multisports et de spectacles type Zénith), d'une capacité de 11,000 places,
- La maintenance et l'exploitation de l'ensemble des infrastructures pour une période de 25 ans

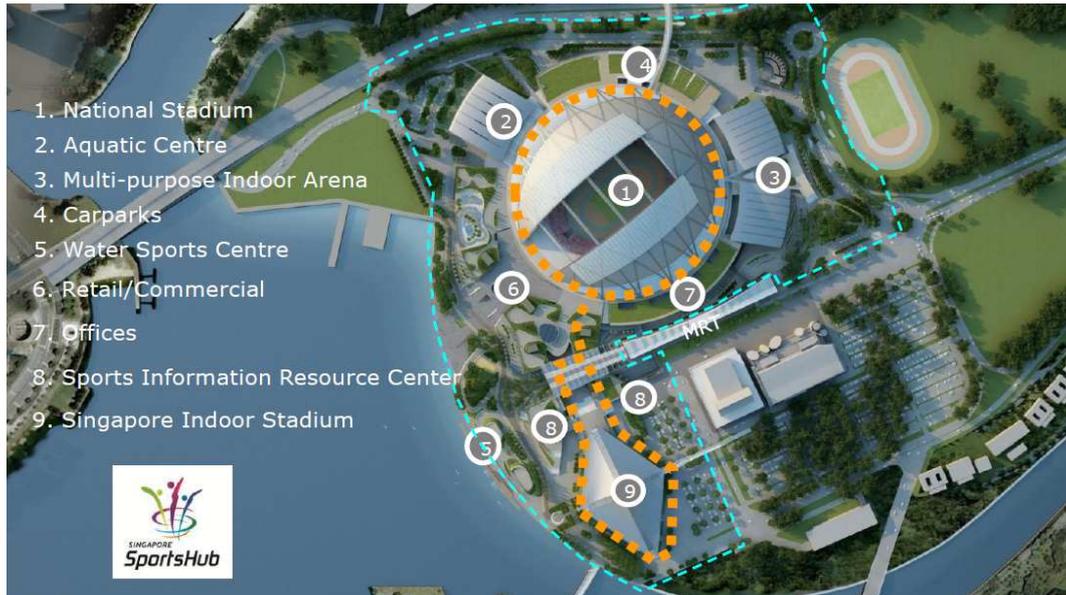


Fig.2. Vue générale du Singapore Sports Hub.

Le plus grand dôme au monde

La structure métallique de la toiture

Le nouveau stade national est coiffé par un dôme sphérique en acier de 312 mètres de portée. La charpente s'élève à une hauteur de 82 mètres au-dessus du terrain et couvre l'intégralité de l'enceinte sans appuis intermédiaire sur la structure béton.

La toiture présente une large ouverture en partie centrale d'environ 240 mètres de long par 82 mètres de large, presque entièrement recouverte par le toit rétractable en position fermée (Fig.3).

La structure du toit est appuyée sur un anneau de compression en béton post-contraint, situé au 3ème niveau de la zone des gradins, reprenant ainsi les effets de poussée des arches de la toiture (Fig.5).

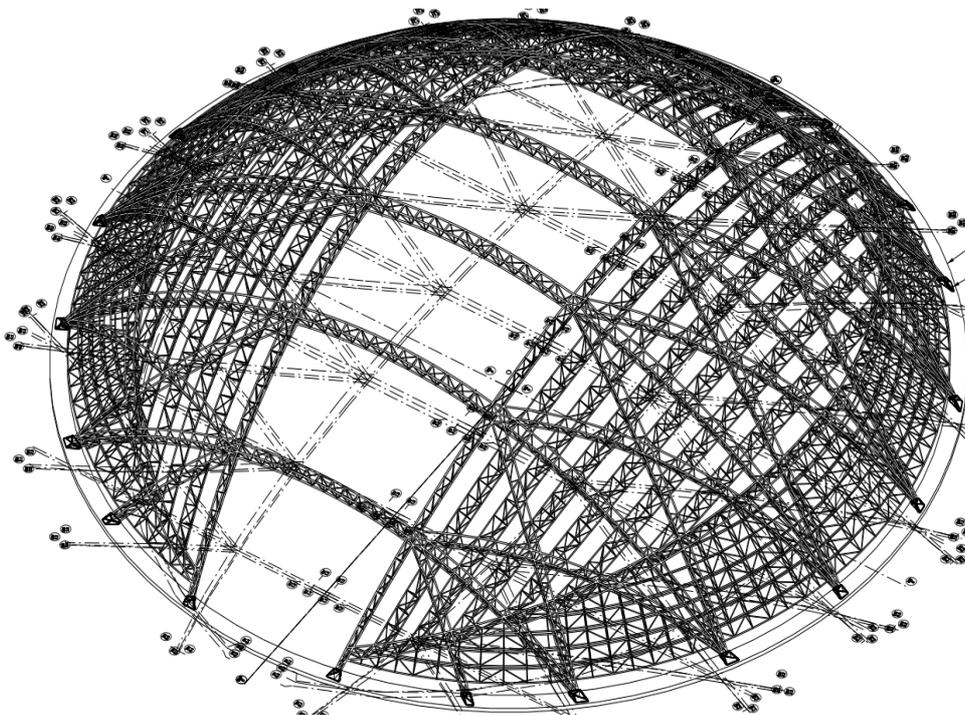


Fig.3. Structure de la toiture.

Diagrid Dome Structural Scheme

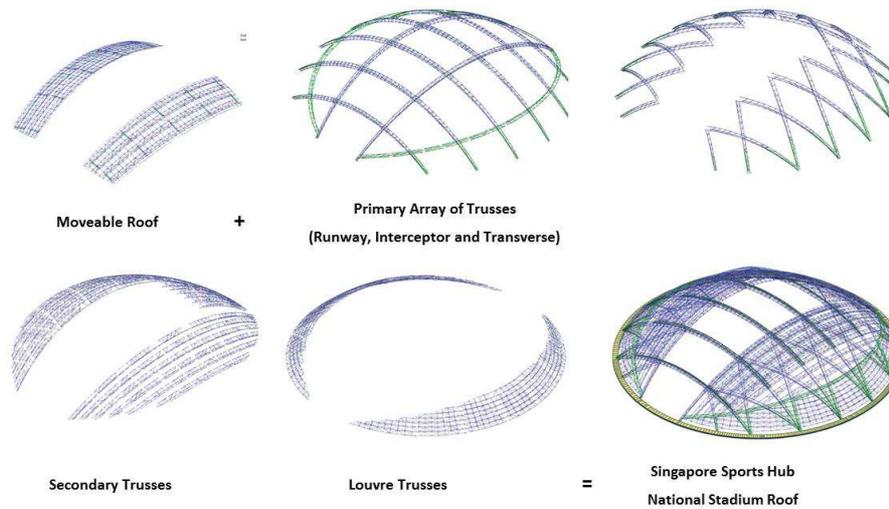


Fig.4. Eléments principaux de la toiture

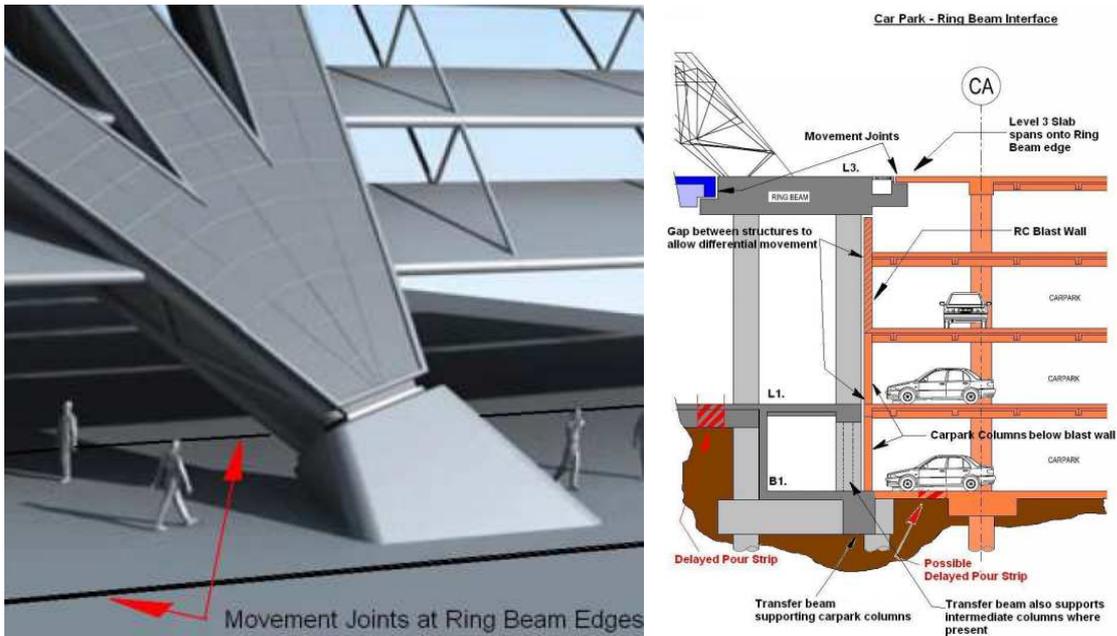


Fig.5. Ceinture en béton post-contraint servant d'appui vertical et horizontal pour les poutres treillis du dôme.

La structure métallique du dôme est constituée de poutres treillis triangulaires tubulaires, de hauteurs variables, de 2.5 m au droit des appuis jusqu'à 5.0 m en partie centrale (Fig.4). Le ratio « poids de structure / surface projetée » s'élève pour le toit fixe à 142 kg/m² (45 863 m²) et à 59 kg/m² pour le toit mobile (19 700 m²).

Les chiffres de la toiture

- 10,000 tonnes d'acier
- Surface développée de 73,000 m²
- 312 m de portée
- 26 000 membrures
- 40 000 connections soudées
- Toit rétractable de 2 500 tonnes
- 4 km de passerelles
- 74 supports provisoires pendant les phases de montage avec des hauteurs allant jusqu'à 80 mètres.



Le mécanisme du toit mobile

Avec ses nombreux éléments architecturaux et techniques novateurs, le stade de Singapour est unique.

Le climat tropical impose de nombreux challenges en termes de conception. L'Ingénieur et Architecte du projet (ARUP Sports & Venue) souhaitait à la fois créer un espace à l'abri de la chaleur et de la pluie, mais aussi en faire un espace ouvert et dynamique. Le toit mobile procure à la fois une protection contre les aléas climatiques tout en répondant aux besoins d'une programmation événementielle très variée.

Le toit mobile est constitué de 2 coques sphériques (Fig.6), pesant chacune 1,250 tonnes, couverture et équipements inclus. Chaque partie du toit mobile comprend une structure métallique en poutres treillis tridimensionnelles, une couverture en coussins gonflables ETFE¹ d'une superficie totale de 10 000 m², une gouttière périphérique avec un habillage en aluminium formant un profil en aile d'avion, ainsi que bien sur l'ensemble du mécanisme permettant de générer et de contrôler les mouvements

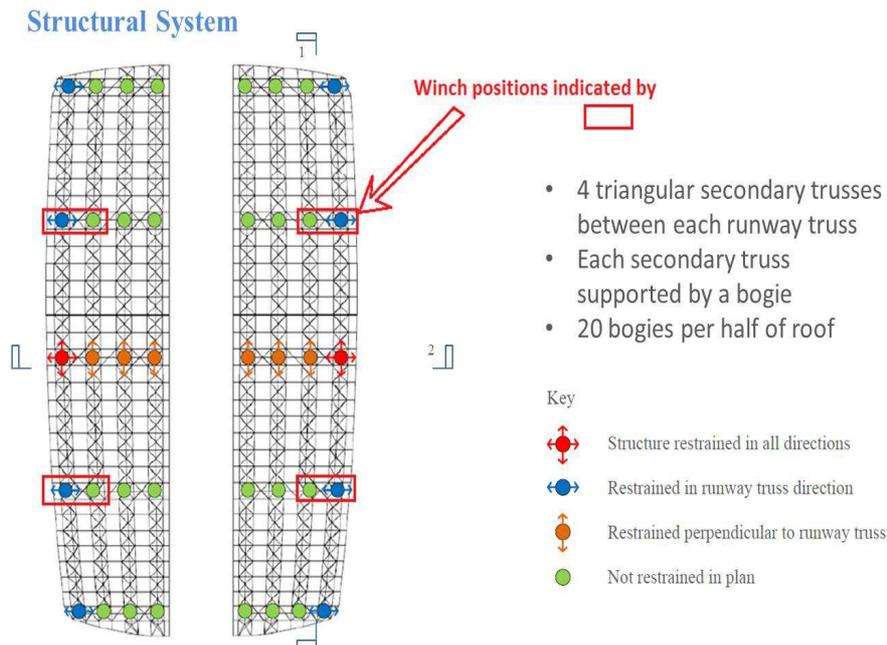


Fig.6. Principes structurels du toit mobile et de son mécanisme.

Les treuils utilisés pour tirer le toit en phase de fermeture sont embarqués dans la structure mobile. Cette solution a non seulement eu l'avantage de libérer de l'espace au sol à l'intérieur de la zone des gradins, mais également de réduire le nombre de pièces mécaniques en mouvement (suppression des poulies de renvoie et réduction des longueurs de câbles). Elle a eu également des effets positifs sur le dimensionnement de la structure du toit fixe en supprimant les efforts verticaux descendants, dus aux changements de direction des câbles. Toutefois, elle a nécessité l'installation d'un vaste réseau de passerelles et plateformes d'accès pour l'inspection et la maintenance des divers composants situés à 80 mètres au-dessus du sol.

Les panneaux de la toiture mobile circulent sur 5 voies de roulement ; ils sont guidés transversalement sur la voie centrale et reposent chacun sur 20 bogies circulant le long de rails qui épousent la forme sphérique du toit. Les mouvements de fermeture et d'ouverture s'effectuent en 20 minutes. Les panneaux sont tractés par 8 treuils chacun, suspendus à la structure du toit mobile et ancrés en amont sur la partie centrale du toit fixe.

En position ouverte, la pente moyenne est de 20 degrés. La traction maximum dans les 8 câbles, pour vaincre les effets de la gravité, les frottements et les forces de vent (le toit pouvant être utilisé avec un vent maximum de 13 m/s mesuré au sommet du toit), est de 450 tonnes.

Le toit fixe subit des déformations locales sous les effets des charges roulantes. Quant au toit mobile, n'étant retenu par ses câbles qu'en 2 points, il se déforme sous son propre poids en fonction des effets de la gravité qui varient avec l'angle d'ouverture (Fig.7). Il en résulte des déplacements relatifs entre les deux structures (transversaux et angulaires) qui sont absorbés par des appuis sphériques glissants, spécialement développés pour le projet (Figs.8-9).

¹ ETFE : Ethylène tétrafluoroéthylène : matériau utilisé comme alternative au verre, sous la forme de coussins gonflables, pour ses qualités de légèreté, de déformabilité, de transmission de la lumière et ses propriétés thermiques



Fig.9. Appuis articulés et glissants (1) entre les bogies et la structure du toit mobile et points d'ancrage (2) des câbles sur le toit fixe.

Le toit mobile et son mécanisme en chiffres

- Chaque panneau mesure 200 m x 50 m et pèse 1250 tonnes avec l'ensemble de ses équipements
- 40 bogies circulent sur 1 km de voies de roulement
- 16 (2 x 8) treuils permettent de tirer les panneaux lors de la fermeture ou de les retenir lors de ouverture
- Ouverture ou fermeture en 20 minutes
- Vitesse de déplacement: 2.5 m/mn
- Force maximum de traction pour fermer le toit: 450 tonnes par panneau

Sécurité

Le mécanisme intègre plusieurs niveaux de redondances mécaniques et électriques, fonctionnant suivant un principe dit de sécurité intégrée ou sécurité positive (Fig.10). En complément des freins mécaniques installés directement sur les réducteurs des moteurs électriques, chaque panneau du toit mobile possède 16 freins, dits de tempête, connectés aux bogies arrières sur chacune des voies de roulement (Fig.11) : ils peuvent être utilisés comme freins de parking (le toit peut rester stationné pour une durée illimitée et en parfaite sécurité dans n'importe quelle position intermédiaire) ; ou comme freins d'urgence, les mâchoires des freins enserrant les rails avec une pression 60 tonnes avec un temps d'activation de 0.2s. En ultime recours, des butées avec des absorbeurs de chocs sont installées à chaque extrémité des voies.



Fig.10. Plateformes d'accès à l'intérieur du toit mobile.

Une multitude de paramètres sont mesurés en continu lors des mouvements, puis transmis au système de contrôle-commande qui les analyse et les régule. Les positions relatives des bogies entre les différentes voies de roulement sont mesurées à l'aide d'un système de lecture optique placé le long des voies. Toute déviation au-delà des valeurs normales (valeurs apprises pendant les phases d'essais et de mise au point) déclenche immédiatement une alarme qui entraîne l'arrêt immédiat du mouvement. Les tensions dans les câbles (Fig.12) sont mesurées avec des jauges de contraintes installées dans les axes au droit des points d'ancrage situés sur le toit fixe, intégrées dans des boucles de régulation permettant d'équilibrer les tensions et de détecter puis stopper tout phénomène de surtension ou sous-tension dont les effets pourraient être dramatiques.

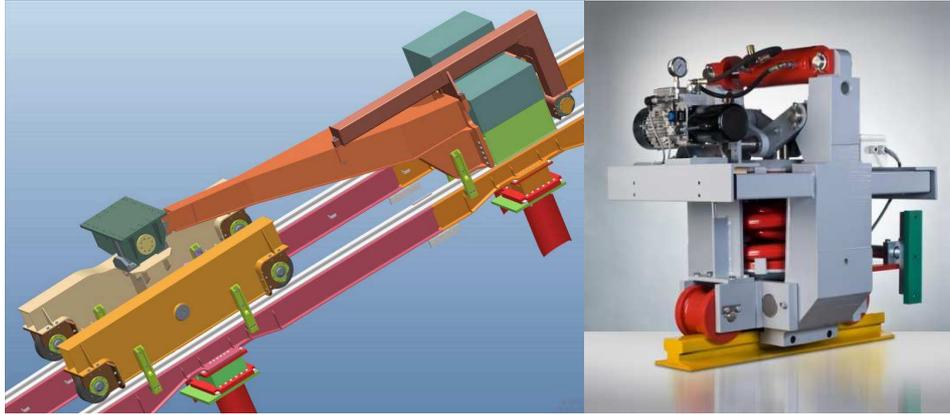


Fig.11. Architecture typique des bogies arrière avec leur remorque équipée de freins d'urgence



Fig.12. Chaque point ancrage est équipé avec une jauge de contrainte permettant de connaître avec précision les tensions dans les câbles.

Les équipements de sécurité sont :

- Freins (freins mécaniques sur les treuils et freins de parking sur les bogies)
- Système de mesure de position
- Système de mesure de tension dans les câbles
- Système de détection de survitesse
- Système de mesure de la vitesse du vent au sommet du toit
- Caméra de vidéosurveillance le long des voies
- Système de protection incendie

Fiabilité

Le toit mobile doit pouvoir être activé à tout moment pour répondre aux exigences des différents événements que le stade doit accueillir. Toutes les pièces mécaniques critiques ont un niveau de redondance de 25% minimum² et ont été dimensionnées pour une durée de vie théorique de 60 ans lorsqu'elles ne peuvent pas être remplacées en moins de 12 heures maximum. Ces dispositions doivent garantir une disponibilité à tout moment du toit mobile.

² A titre d'exemple, le toit mobile peut être fermé ou ouvert avec seulement 3 treuils sur 4 par ligne de traction (Fig.13). Chaque treuil est équipé avec 2 moteurs électriques mais peut fonctionner à pleine charge avec un seul moteur.



Fig.13. Treuils fixés sur la partie mobile, suspendus à la structure métallique et équipés de deux moteurs électriques.

Des moyens d'accès et de manutention spécifiques ont été conçus et installés dans la toiture pour permettre l'inspection, la maintenance ou le remplacement de n'importe quel composant 80 mètres au-dessus du terrain.

Les passerelles et plateformes sont suspendues sous la toiture mobile (Fig.10). Elles permettent un accès aux divers composants mécaniques et électriques quelle que soit la position du toit. Elles ont été conçues dans un modèle numérique tridimensionnel global, afin de mieux gérer leurs géométries complexes et détecter toute interférence potentielle durant les mouvements. A l'exception de la voie centrale, les liaisons entre la structure de la toiture mobile et les bogies doivent pouvoir absorber des déplacements transversaux relatifs pouvant aller jusqu'à +/- 500 mm ; il s'agissait donc de s'assurer, en intégrant les tolérances de fabrication, de pose et ces déplacements, que les passerelles pourraient suivre les mouvements de la structure sans interférence avec les voies.

Fabrication et montage

Les différents lots (structure métallique, couverture, mécanisme, etc.) sont tous techniquement complexes. Dragages a su mobiliser des équipes avec une forte expertise dans chacun de ces domaines.

Ceci a été bénéfique pour tous les stades du projet, depuis les phases d'études, de consultation jusqu'au suivi et à la coordination des travaux. Les responsables de chaque lot ont été impliqués dès le commencement des études ce qui a apporté une vraie valeur ajoutée.

Le Consultant [ARUP Engineering], un des principaux acteurs dans le domaine de la conception d'infrastructures sportives, a été totalement intégré dans les équipes du projet, avec des spécialistes couvrant chaque domaine (architecture, structure, acoustique, éclairage, etc.) ce qui a permis une coordination efficace et une prise en compte en amont des contraintes de construction, de maintenance et d'exploitation.

Dragages a pu ainsi sélectionner les meilleures options pour maîtriser au plus près les risques techniques et financiers du projet.

La fabrication et le montage de la charpente ont été confiées au leader de la construction métallique à Singapour, YONGNAM ENGINEERING & CONSTRUCTION.

Les poutres treillis tridimensionnelles formant la structure de la toiture ont été fabriquées en usine par tronçons de longueur de 18 mètres maximum, transportées par convois routiers, préassemblées avant levage en éléments pouvant atteindre jusqu'à 70 mètres de long et 160 tonnes, avant d'être levés avec une ou parfois deux grues de 600 tonnes utilisées en parallèle (DEMAG CC2800 – Figs.14-16).

Les poutres treillis principales ont été provisoirement appuyées sur des supports temporaires, avant d'être connectées les unes aux autres par soudure (Fig.15). L'opération finale de dévérinage simultané des 8 derniers appuis principaux, à l'aide de vérins hydrauliques d'une capacité unitaire de 150 tonnes a été réalisée par VSL, entreprise du groupe Bouygues Construction, leader des systèmes de précontrainte, haubanage et levage de structures lourdes.



Fig. 14. Levage des sections centrales des arches avec 2 grues de 600 tonnes.



Fig. 15. Support de la structure sur appuis temporaires durant les phases de montage.

La structure fonctionnant dès lors comme un dôme, avec ses efforts de compression transmis sous forme de poussée au droit des culées puis l'anneau de compression post-contraint, l'installation du toit mobile pouvait commencer.

Les 40 bogies et 32 poutres treillis tridimensionnelles (50 m de longueur x 6 mètres de large et 2.5 mètres de hauteur) ont été transportés à l'aide de moyens spécialisés (SPMT : Self Propelled Modular Transporter ou Unités Automotrices de Transport) depuis une zone de pré-assemblage jusqu'à l'intérieur de l'enceinte du stade, pré-équipés avec leurs passerelles d'accès, câbles, armoires de commande électriques et filets de sécurité.

Les capacités des grues ne permettaient pas d'installer le toit mobile en une seule phase. Il a donc fallu mettre en place dans un premier temps la moitié du toit, puis déplacer chaque panneau de manière simultanée, pour ainsi libérer la place nécessaire à l'installation de la seconde partie du toit mobile (Fig.17). Cette opération de transfert a également été réalisée par VSL à l'aide de vérin à câbles installés sur des structures provisoires au sommet de la toiture fixe (Fig.18).



4.2.3.3, Detail Installation Procedures: SMR3-T4

SMR3-T4 Lifting Load: 85ton

YNE 600ton Crawler Crane

Main Boom: 66m

Luffing Fly Jib: 48m

Lifting Radius: 28m

Super Lift: 100ton

Lifting Capacity: 105ton

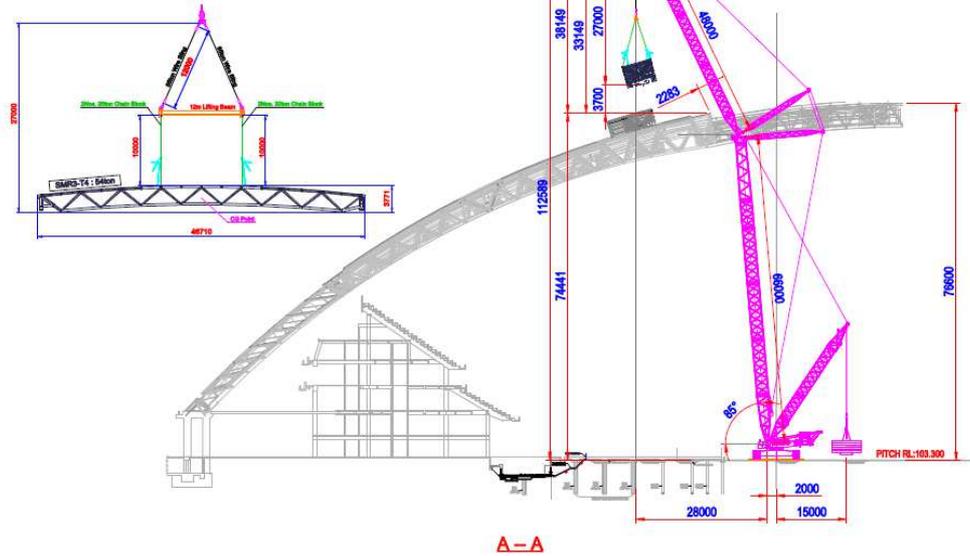


Fig. 16. Document des Méthodes – préparation du levage d'une poutre du toit mobile.

Au final le toit a pu être installé en un temps record de 3 mois, grâce à la mise en place de moyens de levages exceptionnels, avec pas moins de 3 grues de 600 tonnes (DEMAGE CC2800) et bien sûr, le dévouement et le professionnalisme des équipes, mobilisées jours et nuits, 7 jours sur 7 (Fig. 19).



Fig. 17. Levage d'un élément du toit mobile.



Fig. 18. Ripage du toit mobile en phase d'assemblage.



Fig. 19. Vue de la toiture de l'intérieur du stade

Crédits

Projet

Singapore Sports Hub

Entreprise Générale (Conception & Construction)

Dragages Singapore (Bouygues Construction Group)

Consultants

Arup – Sports Venue Design & Engineering

DP Architects – Master Plan & Non-Sport Architecture

AECOM – Landscape Design

DEP Engineering – Design of the Moveable Roof Mechanism and Moveable Tiers