

HS2 - Viaducs à voussoirs préfabriqués construits à l'avancement avec haubanage provisoire

François FERNIER (Vinci); Nicolas GALLONE (Vinci); Mathieu MULS (Systra)

Sommaire

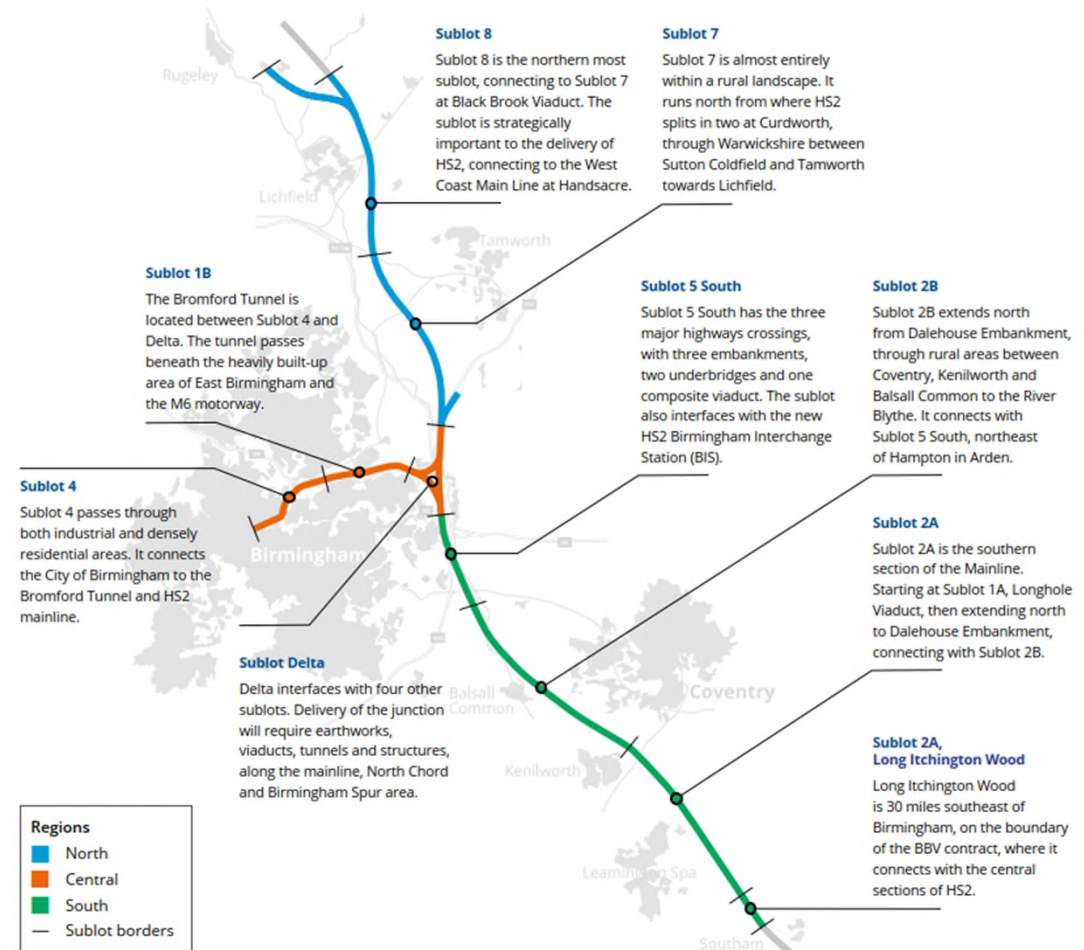
1. Contexte du projet
2. Les ouvrages
3. Pose à l'avancement avec haubanage provisoire
4. Préfabrication
5. Pose par travées entières sur autoroute

Contexte du projet

Le projet HS2

Integrated Project Team

MOA	High Speed 2 (HS2)
Réalisation	Balfour Beatty VINCI JV
Conception	Mott McDonald SYSTRA JV
Longueur	90 km



Delta Junction – les ouvrages PCMS



9 ouvrages répartis en 2 zones géographiques

ZONE GEOGRAPHIQUE	NOM	NBR. VOIES	LONGEUR TOTALE (m)
WATER ORTON RIVER TAME (NORD)	RIVER TAME WEST SINGLE TRACK	1	467
	RIVER TAME WEST DOUBLE TRACK	2	472
	RIVER TAME EAST	1	532
	WATER ORTON 1	1	1425
	WATER ORTON 2	1	1312
COLESHILL (SUD)	COLESHILL EAST	1	592
	COLESHILL WEST SINGLE TRACK	1	616
	COLESHILL WEST DOUBLE TRACK WEST	2	616
	COLESHILL WEST DOUBLE TRACK EAST	2	616

La LGV principale reliant Londres à Manchester passe à l'Est de Birmingham. Les raccordements vers le centre-ville où se situe la future gare forment un Delta.

Les ouvrages PCMS sont situés au droit des bifurcations au Nord et au Sud du Delta.

Contexte géographique

La zone Delta Junction comporte de multiples contraintes :

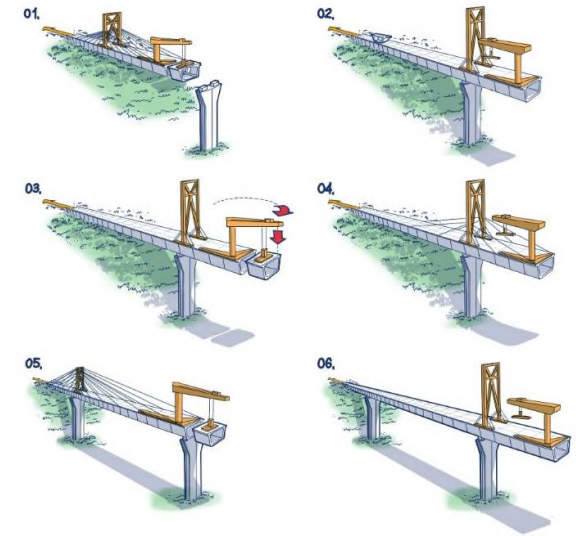
- **Routes et autoroutes** (A446, B4117, B4114, M42, M6), y compris zone d'échangeur autoroutier
- **Voie ferrée** (Birmingham – Nuneaton),
- **Réseaux** multiples : gaz (basse à haute pression), électricité (dont HT), eau potable, eaux usées, télécom
- **Rivière, canaux, ruisseaux,**
- **Zone humide** (Coleshill).



Méthode PCMS

Principes généraux de la méthode PCMS :

- Construction préalable nécessaire : fondations, piles et première travée
- **Préfabrication** des voussoirs,
- **Pose des voussoirs à l'avancement** à l'aide d'une grue de levage en bout de fléau,
- **Voussoirs collés** et connectés à l'aide de **barres de précontrainte temporaires**
- **Haubanage du fléau à l'avancement,**
- Equilibre du **mât de haubanage** grâce aux **haubans de retenu fixés aux 2 dernières travées**
- **Précontrainte interne et externe** mise en tension après assemblage de chaque travée
- **Détension des haubans** et **avancée du mât** en fin de cycle



Aspects principaux de conception

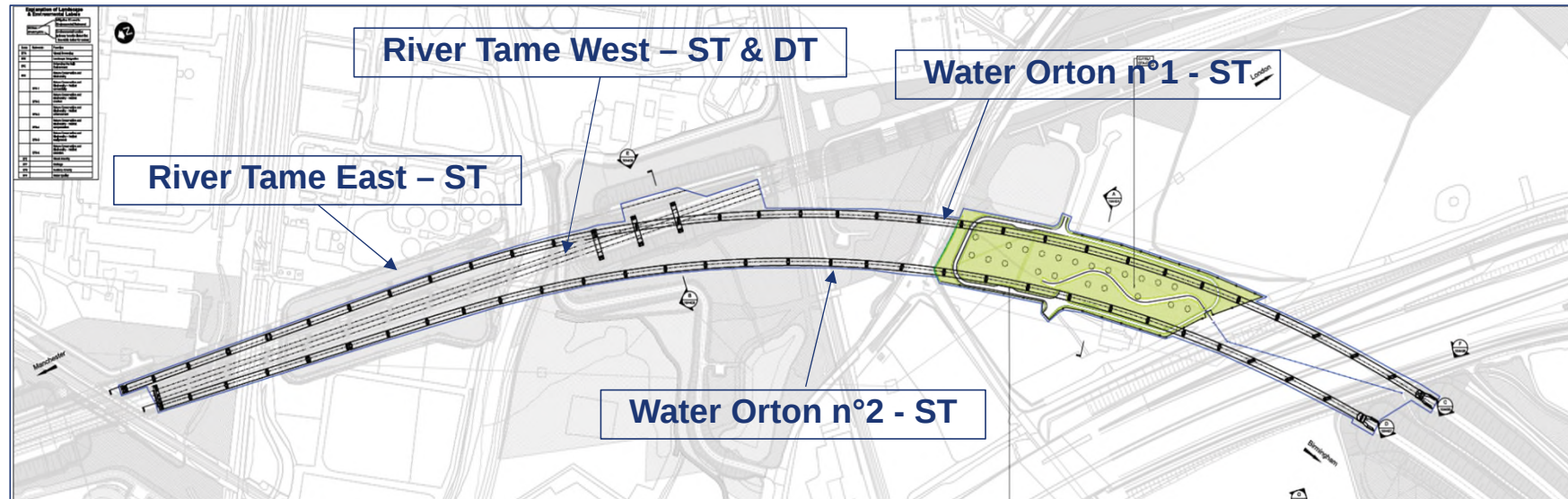
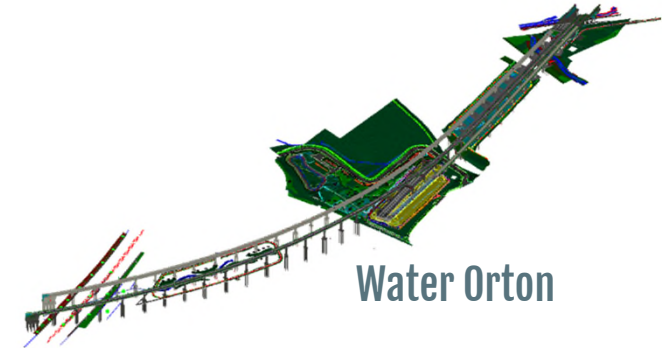
- Calcul aux **Eurocodes + Annexes Nationales anglaises**
- Durée de vie de **120 ans, changement climatique, diminution du CO2**
 - Adaptation des charges (température)
 - Impact sur le rapport d'étude de la durabilité => composition des bétons et enrobage
- Pont ferroviaire
 - Vitesse de conception **360 km/h**
 - **Voie sur dalle** => impacte les études d'interaction voie-ouvrage
- Safe by Design
 - **Contrainte légale** au Royaume-Uni qui nécessite de **prouver** que la conception retenue est **optimale pour la sécurité en construction, opération et maintenance**
- **Dérogation** à l'interdiction d'utiliser de la précontrainte intérieure sur un pont franchissant une autoroute.
 - Mesures de protection => isolation électrique de la précontrainte, tests poussés de la précontrainte

Les ouvrages

Les ouvrages

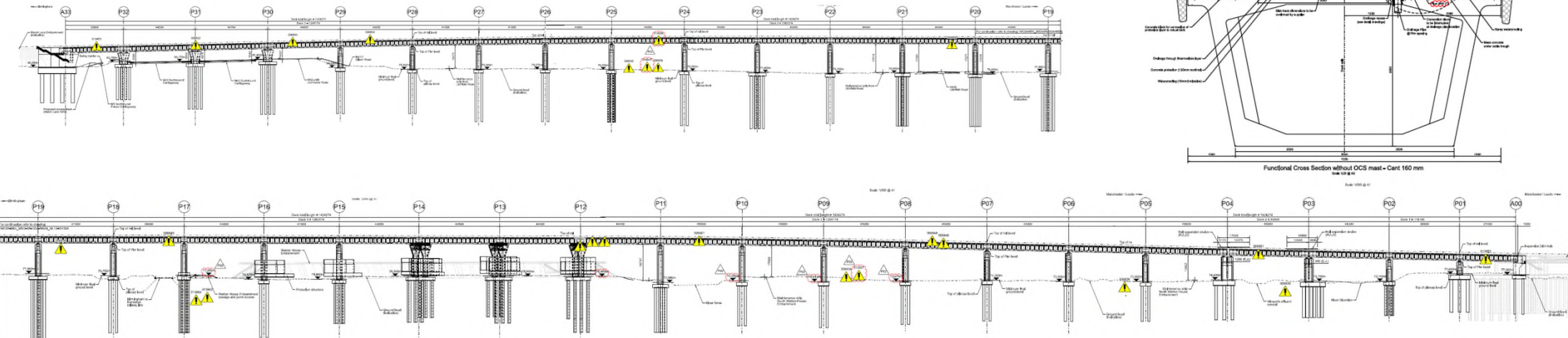
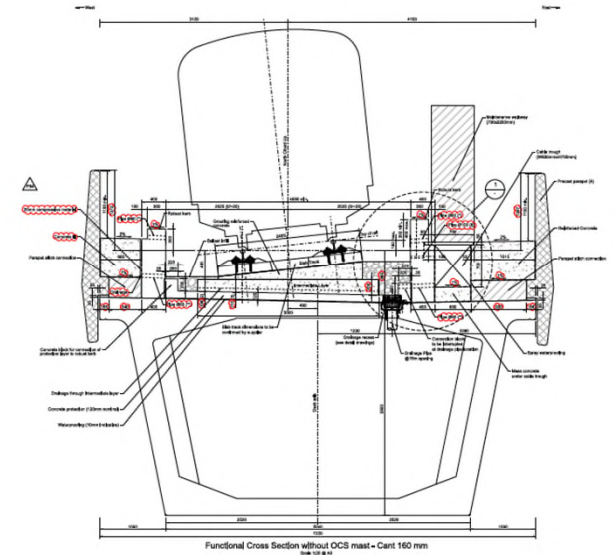
Water Orton No. 1 & Water Orton No. 2&3 :

- 2 viaducs de 1312m et 1425m comportant 3 tabliers
- WO1 (33 travées) : 115m + 45m (travée inerte) + 1265m
- WO2 (31 travées) : 162m + 45m (travée inerte) + 1105m
- Courbe jusqu'à 1270m de rayon (vitesse 170 km/h)



Water Orton No. 1 & Water Orton No. 2&3 :

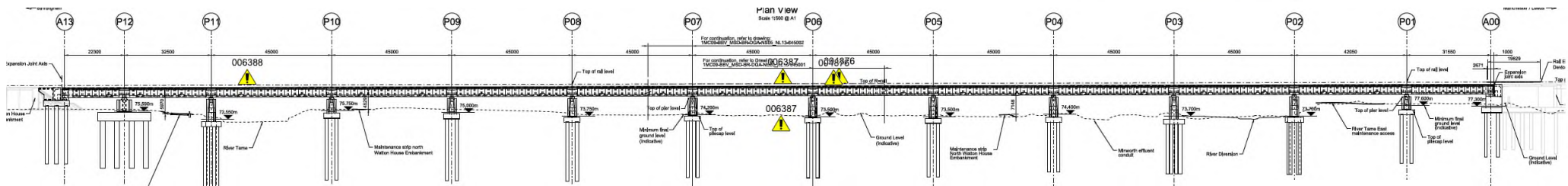
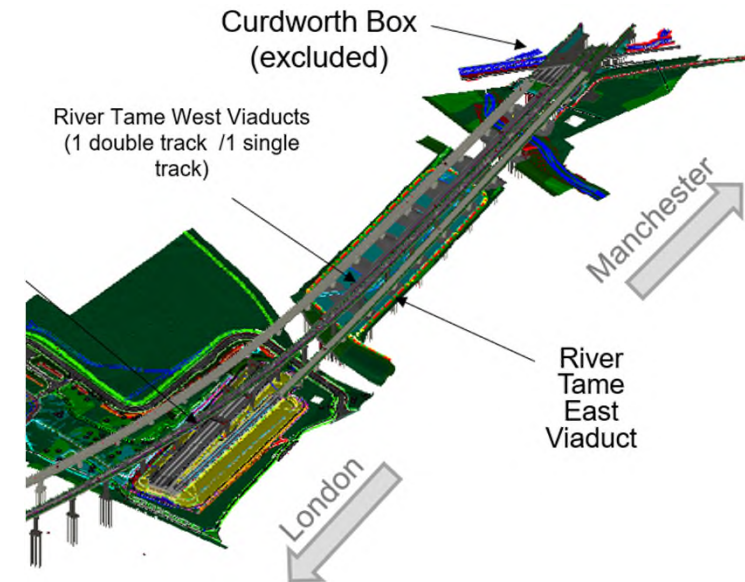
- Viaducs portant 1 voie
- Passage au-dessus de la ligne principale (WO1)
 - 3 portiques avec piles béton et poutre mixte de 28m
 - Structures de protection en béton
- Franchissement autoroutes, rivière et voie ferrée



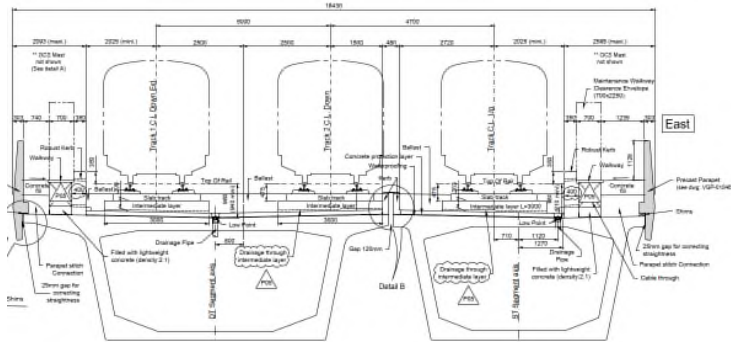
Les ouvrages

River Tame East & River Tame West :

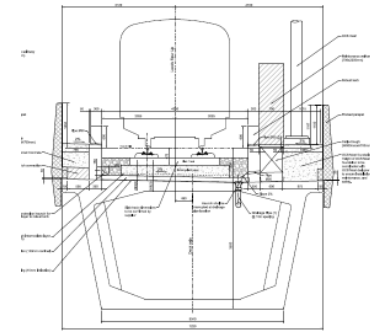
- 3 viaducs de 532m, 472m et 467m avec tablier continu
- River Tame East : 1 voie portée
- River Tame West : 2 tabliers portant 1 ou 2 voies



West



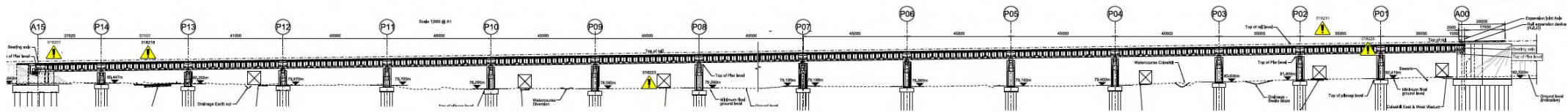
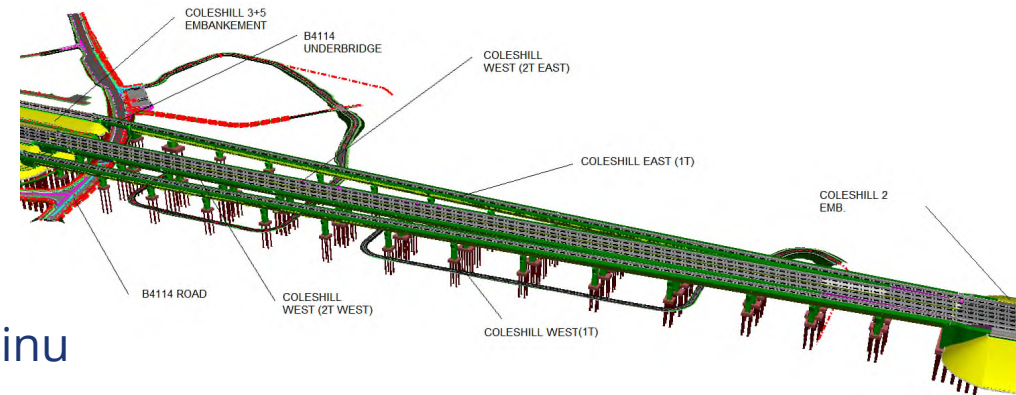
East



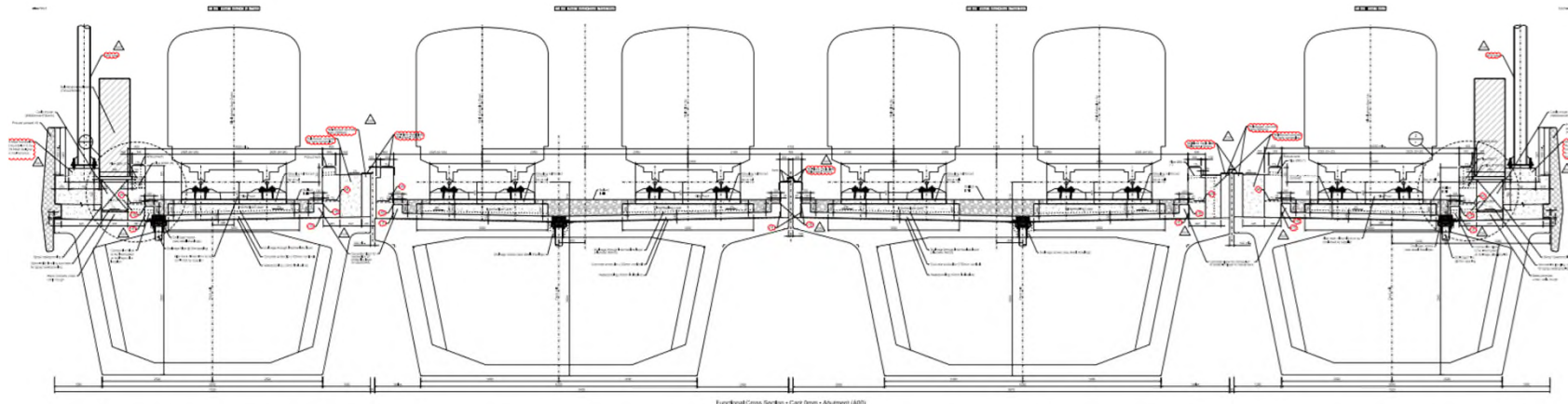
Les ouvrages

Coleshill East & Coleshill West :

- 4 viaducs de 592m, 616m avec tablier continu
- Coleshill East : 1 voie portée
- Coleshill West : 3 tabliers portant 1 ou 2 voies

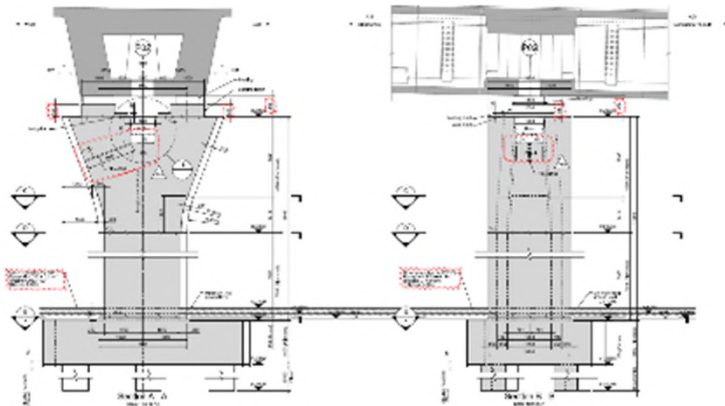


West



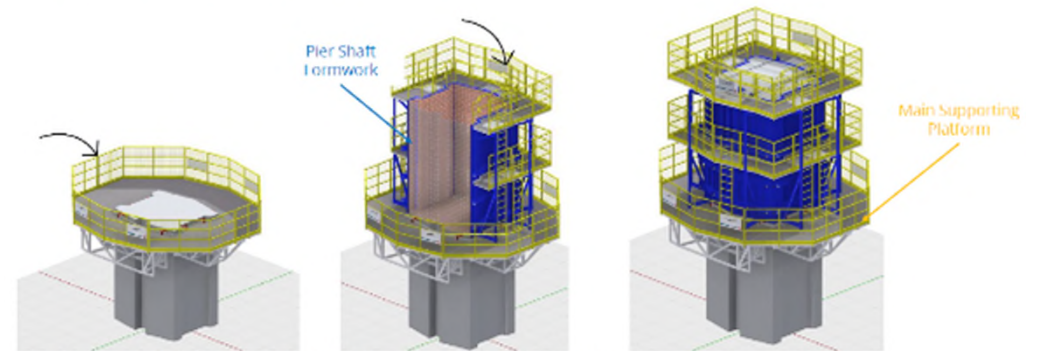
East

Piles standardisées en béton armé



Pier & Pier Heads - Methodology

- 56 Piers and up to 12m in height and cast in situ

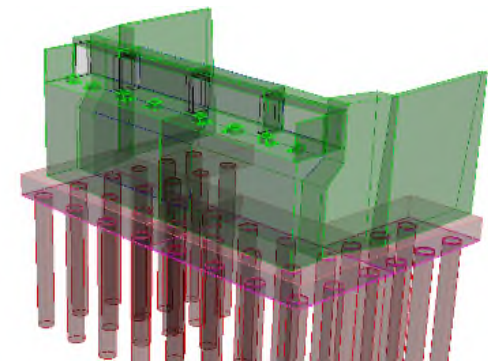
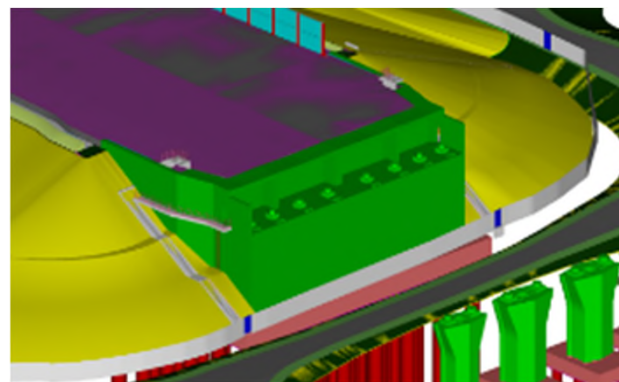
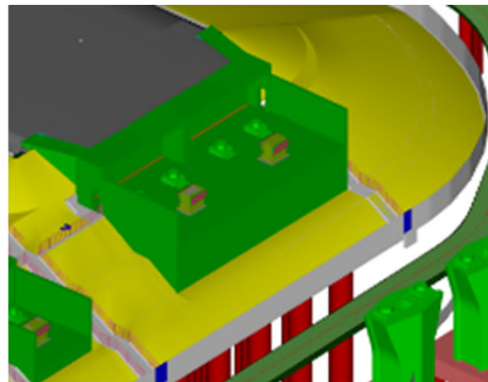
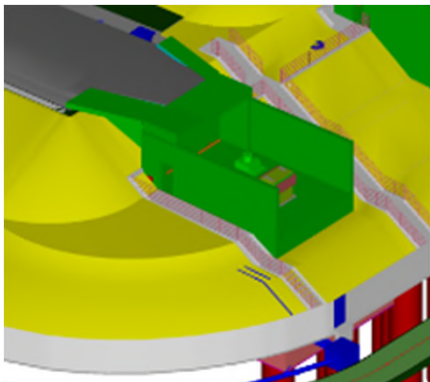
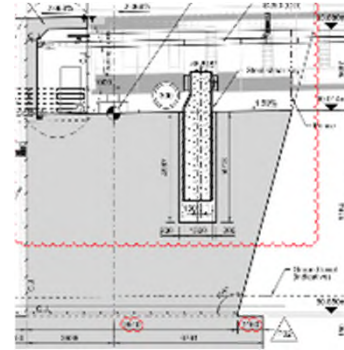


- Bespoke steel formwork designed and manufactured on the project
- Shaft to be poured by 5m lift
- Pier head poured in one go

Les ouvrages

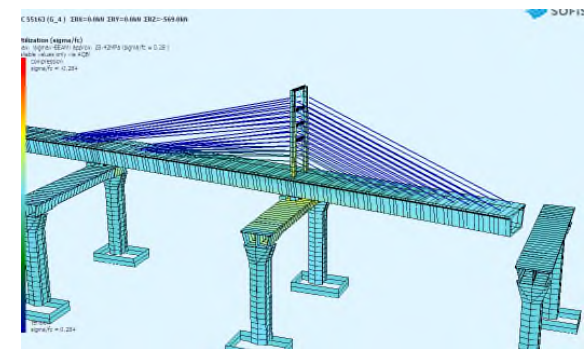
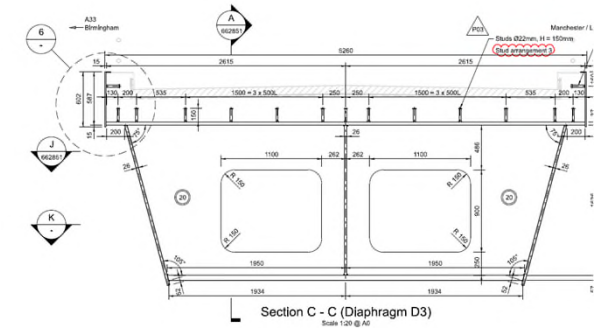
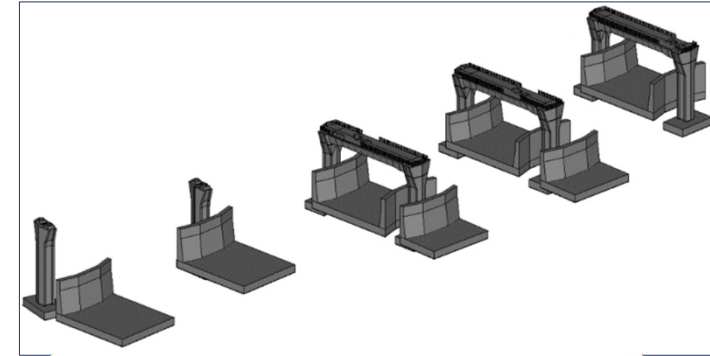
Culées

- Soutiennent de 1 à 4 tabliers
- Les appuis du tablier sont glissants
 - Avec clé de cisaillement métallique pour fixer le tablier longitudinalement
 - Ou sans clé de cisaillement
- Conception spécifique pour chaque culée (pas de standardisation possible)



Portiques et structures de protection

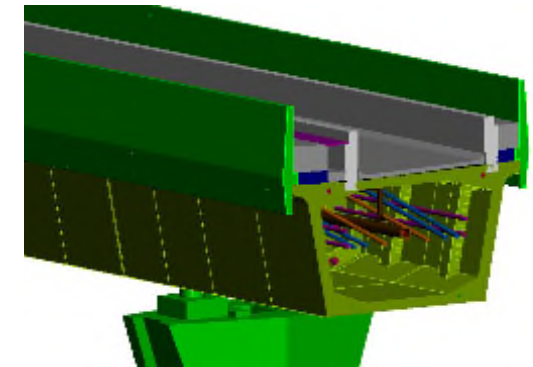
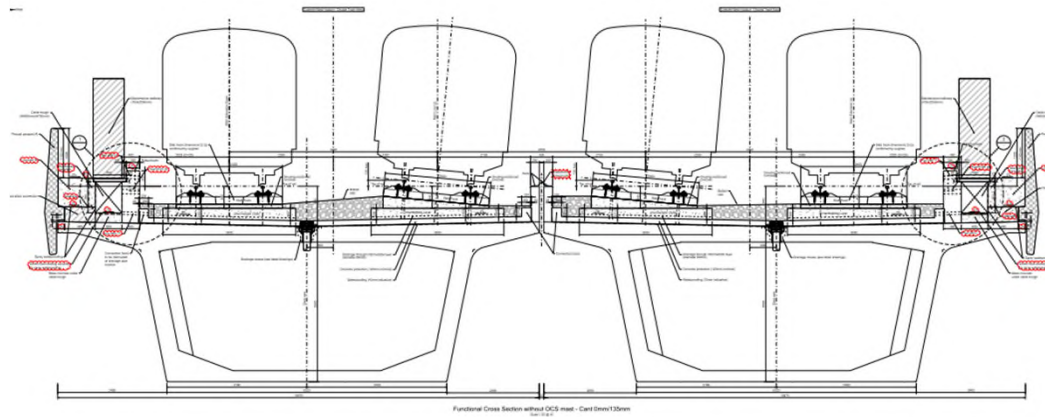
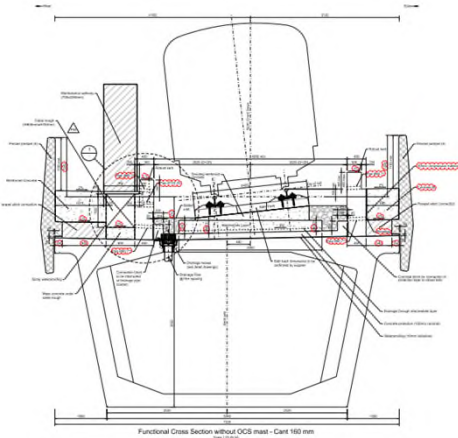
- Pour passage au-dessus de la ligne principale (WO1)
- 3 portiques avec piles béton et poutre mixte de 28m
- Structures de protection en béton
- Complexité supplémentaire pour la méthode PCMS du fait de la souplesse verticale



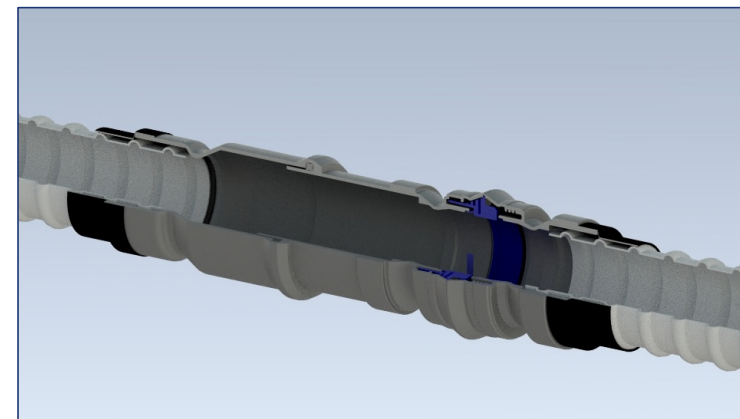
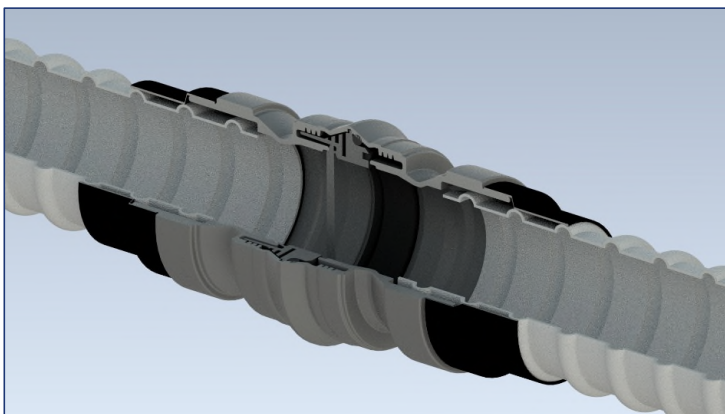
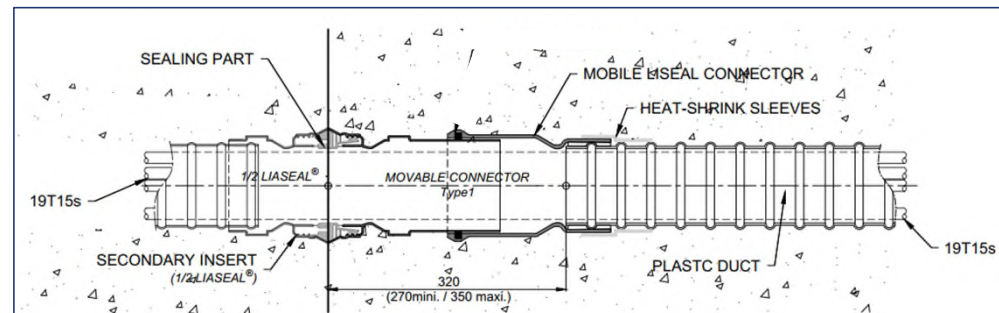
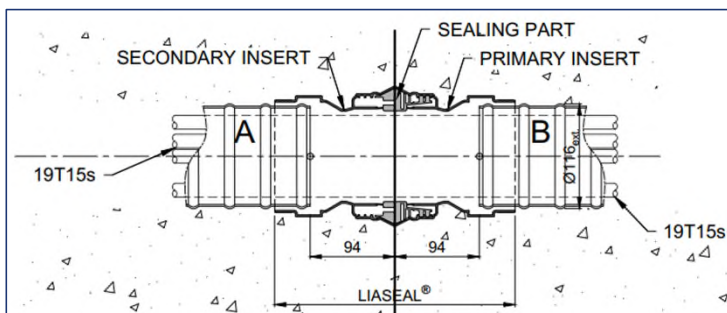
Les ouvrages

Tablier

- Hauteur : 3,50m
- Largeur : 7,22m ~ 10,875m
- Longueur voussoir : 1,95m à 2,60m



Précontrainte



Pose avec mat de haubanage

Pose avec haubannage provisoire

Pendant la phase n°1 (Design préliminaire), le nombre de solutions envisagées pour construire les ouvrages a été réduit à 3 :

- Poutres précontraintes préfabriquées, portées 25m (PRAD)
- Ponts mixtes poutres acier et dalle béton, portées 45m et plus
- Ponts à voussoirs préfabriqués construits à l'avancement avec le mat de haubannage, portée 45m



Pose avec haubanage provisoire

C'est le pont à voussoirs préfabriqués qui a été retenu à la fin de la phase n°1, pour les raisons suivantes :

- **Industrialisable**, tant pour la fabrication des voussoirs que pour leur pose,
- Solution **économique** compte tenu du nombre de voussoirs installés (2 742 voussoirs),
- Technique de construction **polyvalente** qui s'adapte à tous les types de tracés,
- Pas de travail **depuis le sol** une fois que les piles ont été construites,
- Peu de nuisances sonores,
- **Impact environnemental faible**,
- Cadence de pose d'**une travée de 45m en 6 jours** par mat (2 postes),
- Adapté au **franchissement** de cours d'eau, voies de chemin de fer, routes et autoroutes,
- A été utilisé avec **succès** sur des projets précédents par Vinci,

Pose avec haubannage provisoire



Viaduc autoroutier de Compiègne, France,
portée = 57m (2007-2009)



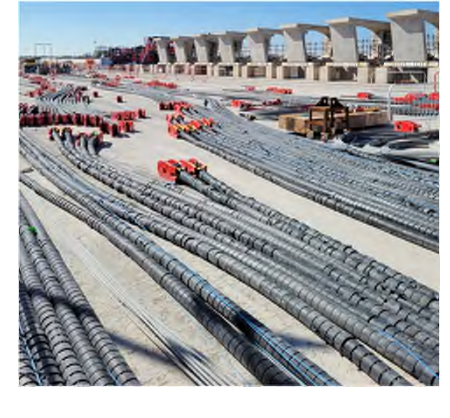
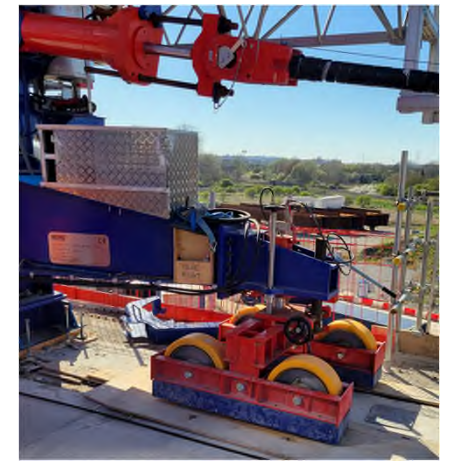
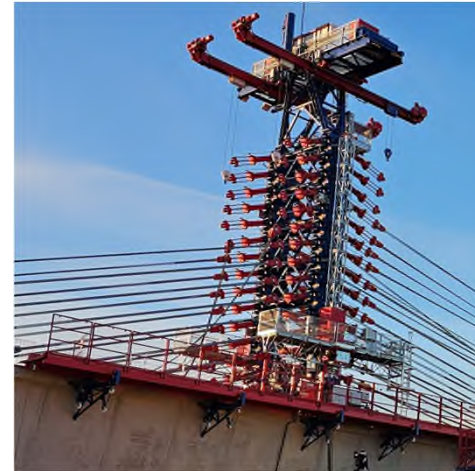
LGV Tours-Bordeaux, France, portée 47m (2011-2017)



Pose avec haubanage provisoire

Les équipements principaux développés pour la pose au mat sont les suivants:

- Le mat, les haubans et les ancrages



Pose avec haubannage provisoire

Les équipements développés pour la pose au mat sont les suivants:

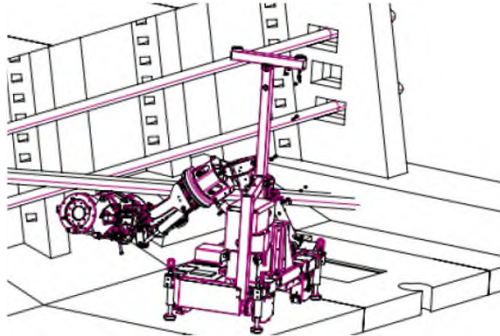
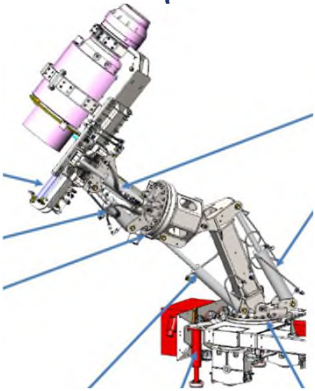
- La potence
- La console d'accostage
- Le SPMT



Pose avec haubanage provisoire

Les équipements développés pour la pose au mat sont les suivants:

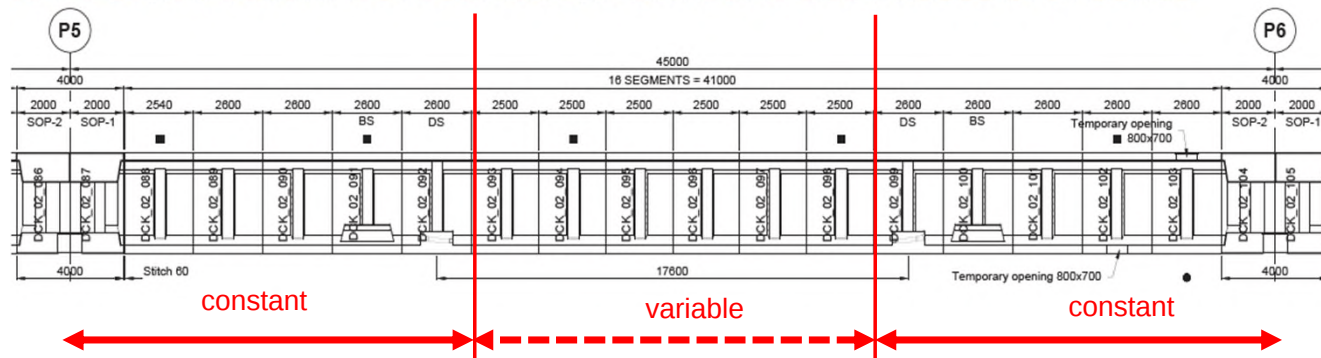
- Le porte-vérin dans le tablier (à commenter par Nicolas)



Pose avec haubanage provisoire

Standardisation des voussoirs

- Il faut construire 6 viaducs continus à 1 voie (117 travées, 2002 voussoirs) et 3 viaducs continus à 2 voies (41 travées, 740 segments), total 2742 segments, 6.6km
- Ces quantités nécessitent de standardiser pour que le projet soit sûr, efficace, et profitable,
- Il faut s'assurer d'une parfaite coordination entre toutes les équipes (Design, Construction Yard, Construction pose, Méthodes, précontrainte provisoire, précontrainte définitive, coffrages, ferrillages),
- La standardisation concerne:
 - Le Design structurel: segmentation du tablier, géométrie des voussoirs, cages de ferrillage, masques aux joints de voussoirs pour la précontrainte
 - La séquence de construction. les réservations et inserts des phases provisoires

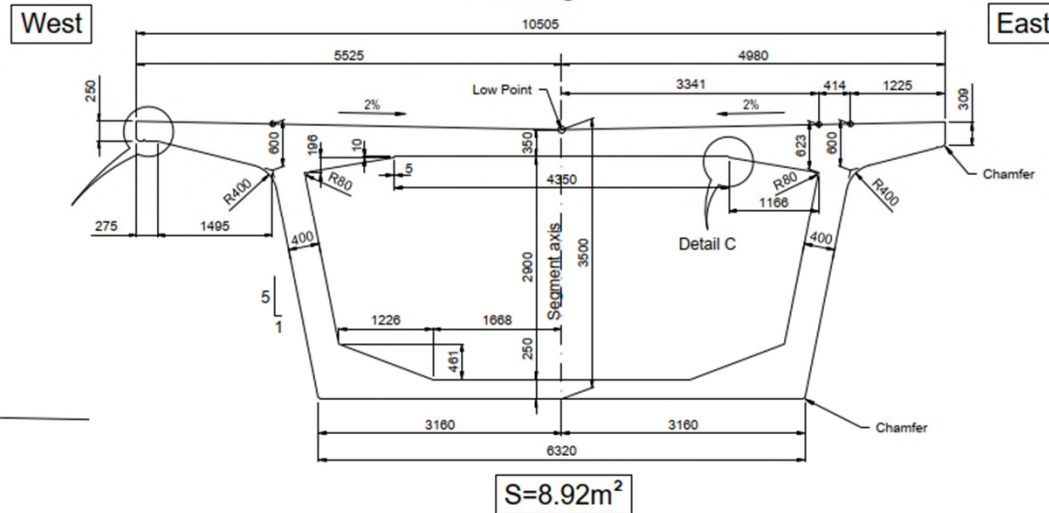


Pose avec haubanage provisoire

Standardisation des voussoirs

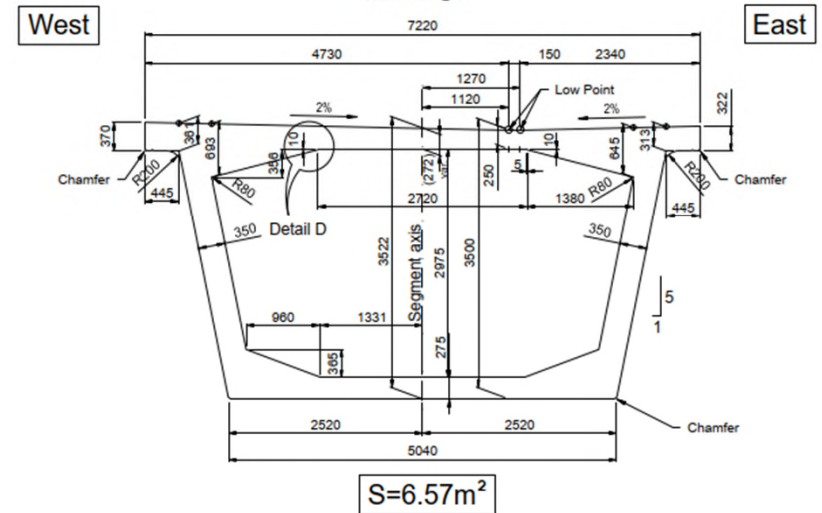
TYPICAL SECTION - GEOMETRIC DEFINITION
(Double Track)

Scale: 1:50 @A1



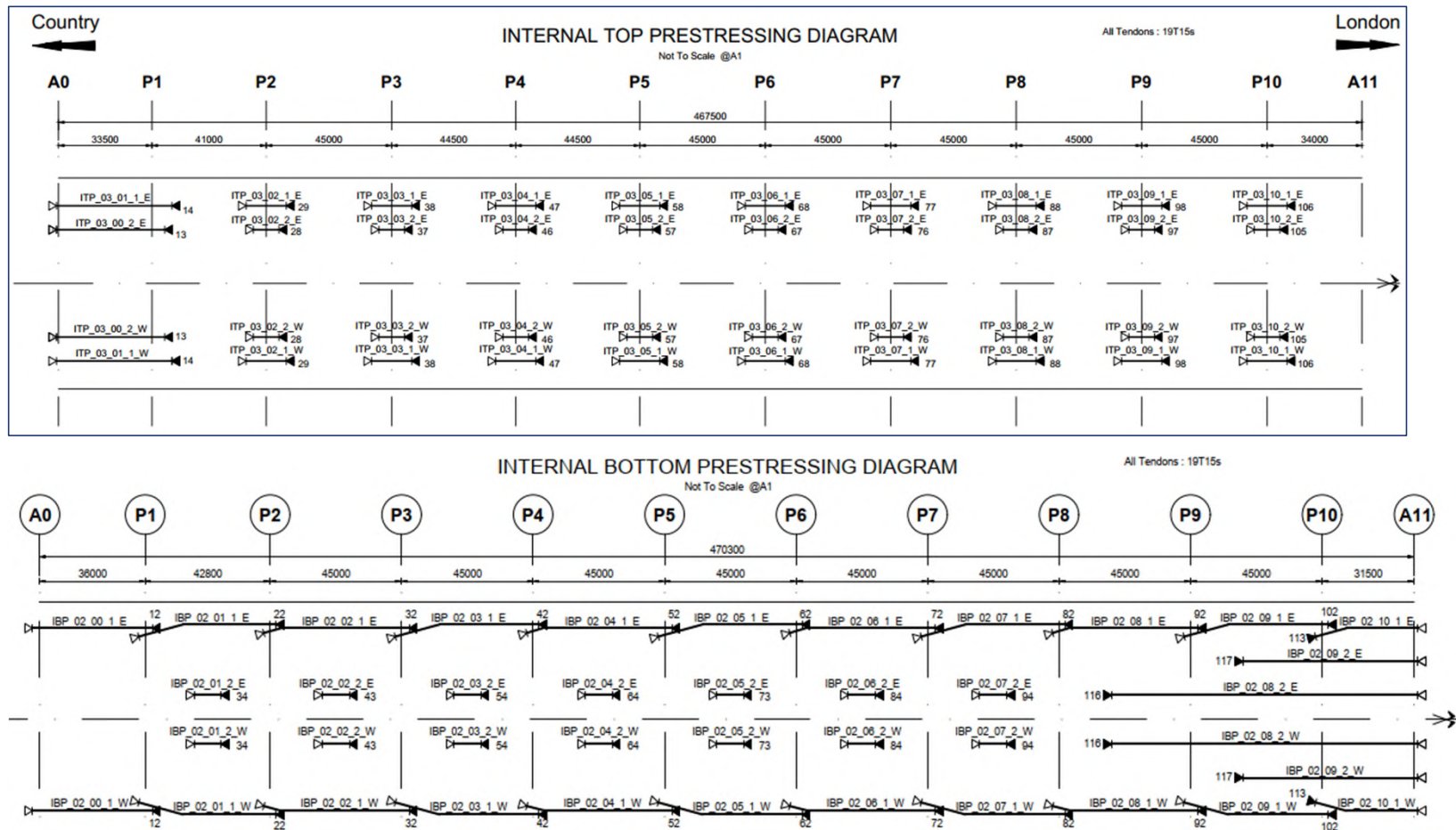
TYPICAL SECTION - GEOMETRIC DEFINITION
(Single Track)

Scale: 1:50 @A1



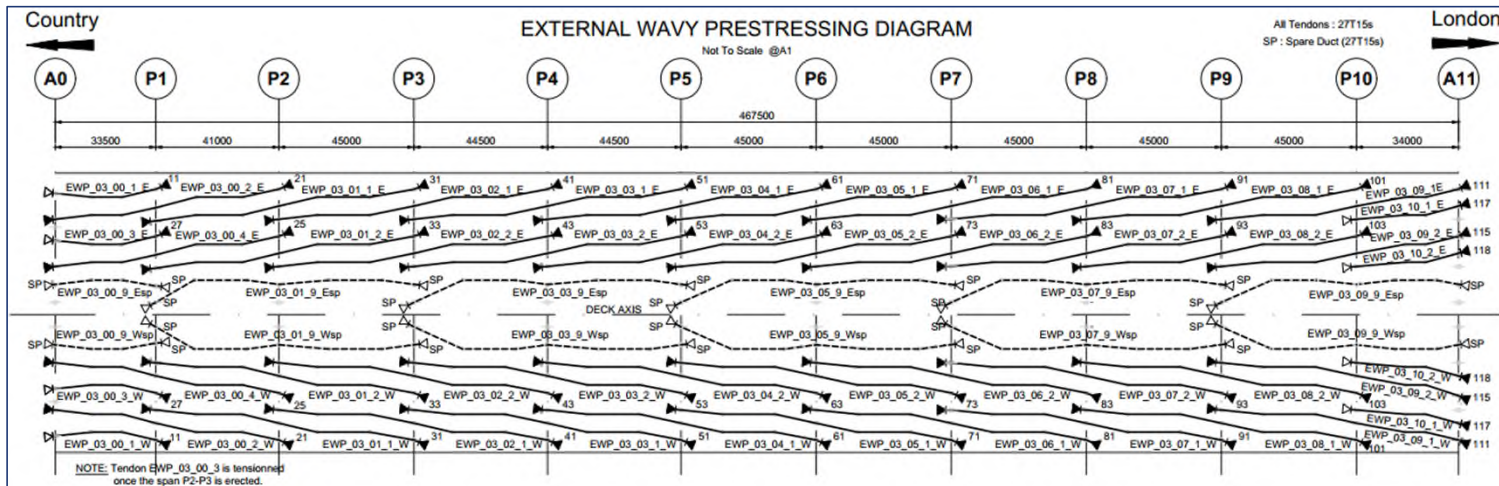
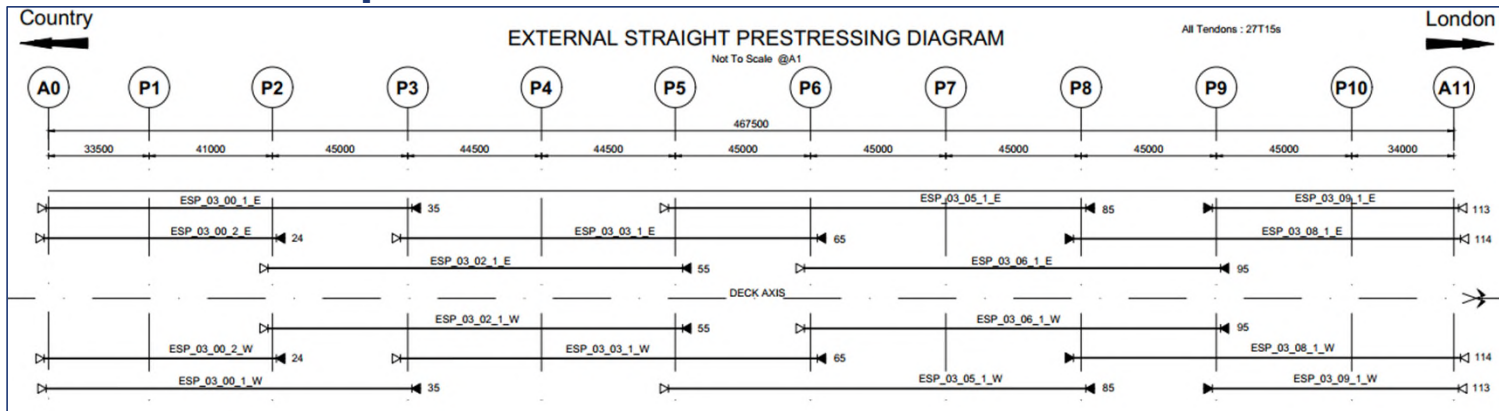
Pose avec haubanage provisoire

Standardisation de la précontrainte



Pose avec haubanage provisoire

Standardisation de la précontrainte



Pose avec haubanage provisoire

Standardisation de la séquence de pose - Travée de rive

1. Installation d'un treillis (avec contre-flèche),
2. Pose des voussoirs sur le treillis
3. Encollage des voussoirs, assemblage par barres de précontrainte provisoire,
4. Précontrainte permanente pour permettre le décintrage,
5. Levage de la travée et enlèvement du treillis,
6. Réglage de la travée en plan et dé-vérinage,
7. Clavage des appareils d'appui.



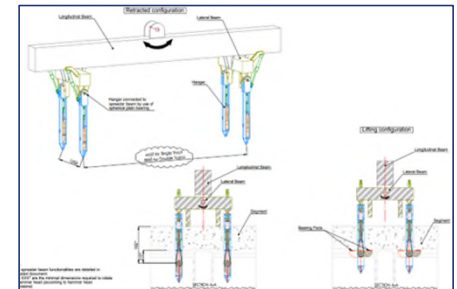
Pose avec haubanage provisoire

Standardisation de la séquence de pose – Travée courante

1. Approvisionnement du voussoir,
2. Encollage du voussoir,
3. Assemblage avec barres de précontrainte,
4. Avancement de la potence sur le voussoir installé,
5. Mise en tension des haubans,
6. Pose progressive des voussoirs jusqu'à la pile suivante,
7. Accostage sur la pile suivante,
8. Clavage de l'appareil d'appui et mise en précontrainte,
9. Transfer du mat à la pile suivante.



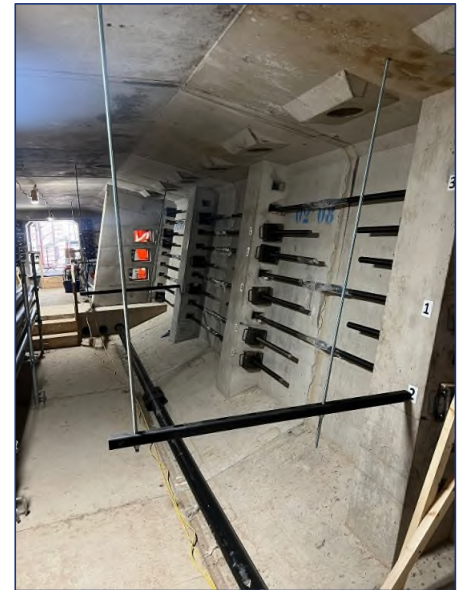
Palonnier automatisé



Pose avec haubannage provisoire

Standardisation de la séquence de pose – Travée courante

1. Approvisionnement du voussoir,
2. **Encollage du voussoir,**
3. **Assemblage avec barres de précontrainte,**
4. Avancement de la potence sur le voussoir installé,
5. Mise en tension des haubans,
6. Pose progressive des voussoirs jusqu'à la pile suivante,
7. Accostage sur la pile suivante,
8. Clavage de l'appareil d'appui et mise en précontrainte,
9. Transfer du mat à la pile suivante.



Pose avec haubanage provisoire

Standardisation de la séquence de pose – Travée courante

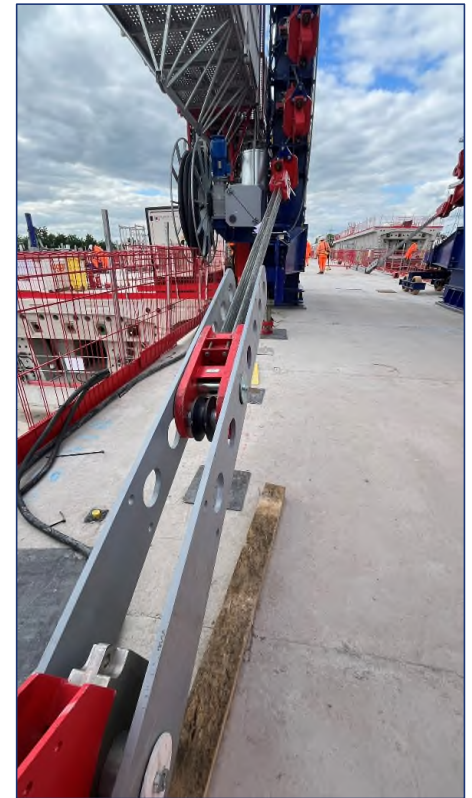
1. Approvisionnement du voussoir,
2. Encollage du voussoir,
3. Assemblage avec barres de précontrainte,
- 4. Avancement de la potence sur le voussoir installé,**
5. Mise en tension des haubans,
6. Pose progressive des voussoirs jusqu'à la pile suivante,
7. Accostage sur la pile suivante,
8. Clavage de l'appareil d'appui et mise en précontrainte,
9. Transfer du mat à la pile suivante.



Pose avec haubannage provisoire

Standardisation de la séquence de pose – Travée courante

1. Approvisionnement du voussoir,
2. Encollage du voussoir,
3. Assemblage avec barres de précontrainte,
4. Avancement de la potence sur le voussoir installé,
- 5. Mise en tension des haubans,**
6. Pose progressive des voussoirs jusqu'à la pile suivante,
7. Accostage sur la pile suivante,
8. Clavage de l'appareil d'appui et mise en précontrainte,
9. Transfer du mat à la pile suivante.



Pose avec haubanage provisoire

Standardisation de la séquence de pose – Travée courante

1. Approvisionnement du voussoir,
2. Encollage du voussoir,
3. Assemblage avec barres de précontrainte,
4. Avancement de la potence sur le voussoir installé,
5. Mise en tension des haubans,
- 6. Pose progressive des voussoirs jusqu'à la pile suivante,**
- 7. Accostage sur la pile suivante,**
8. Clavage de l'appareil d'appui et mise en précontrainte,
9. Transfer du mat à la pile suivante.



Pose avec haubanage provisoire

Standardisation de la séquence de pose – Travée courante

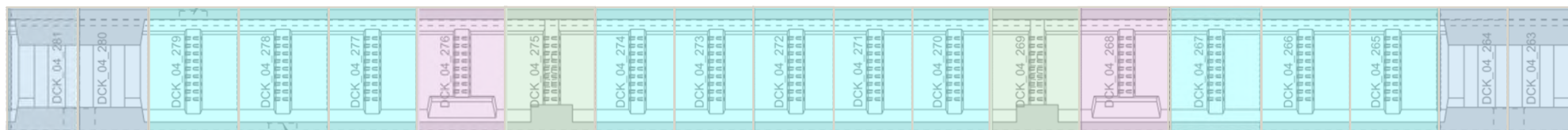
1. Approvisionnement du voussoir,
2. Encollage du voussoir,
3. Assemblage avec barres de précontrainte,
4. Avancement de la potence sur le voussoir installé,
5. Mise en tension des haubans,
6. Pose progressive des voussoirs jusqu'à la pile suivante,
7. Accostage sur la pile suivante,
8. **Clavage de l'appareil d'appui et mise en précontrainte,**
9. **Transfer du mat à la pile suivante.**



Préfabrication des Voussoirs



➤ Types de voussoirs selon leur position le long du viaduc et les besoins de précontrainte:



 Voussoir sur pile 'VSP' ou culée 'VSC'	 Voussoir avec bossage
 Voussoir standard	 Voussoir déviateur

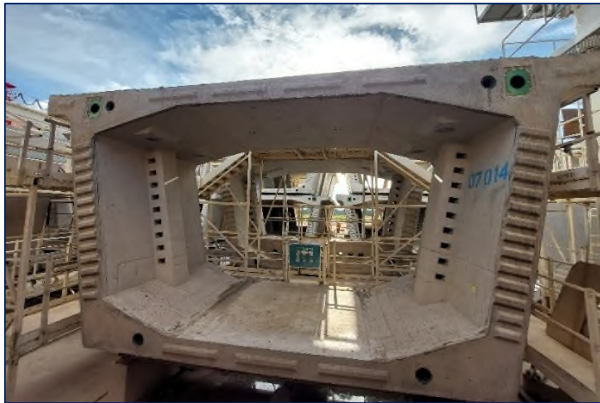
➤ Synthèse des quantités de gouvernement par type de tablier et par type de voussoir:

Type Tablier	Type Voussoir	Quantité Voussoirs [No]	Armatures Unitaire [T]	Béton Unitaire [m3]	Ratio Armatures [kg/m3]	Quantité Totale Armatures [T]	Quantité Totale Béton [m3]
Mono voie	Standard	1,311	4.1	18.0	227	5,309	23,598
	Déviateur	234	8.5	22.0	386	1,982	5,148
	Bossage	192	8.5	22.0	386	1,626	4,224
	VSC	40	11.5	29.0	396	458	1,160
	VSP	226	11.5	29.0	396	2,589	6,554
Double voie	Standard	466	5.5	24.5	224 (min)	2,569	11,417
	Déviateur	82	9.6	25.0	384	785	2,050
	Bossage	59	9.6	25.0	384	565	1,475
	VSC	18	12.0	28.0	428 (max)	216	504
	VSP	114	12.0	28.0	428 (max)	1,366	3,192
Total		2,742	-	-	294 (moy)	17,466	59,322



➤ Types de voussoirs:

Voussoirs Standards: les plus légers, représentant la majeure partie de la travée. Pas d'interface avec la précontrainte externe. Gains intégrés dans les dalles supérieure et inférieure pour la précontrainte interne. Poids compris entre 42 et 60T.



Voussoirs avec Bossage: voussoirs avec poutre renforcée pour l'ancrage de la précontrainte interne. Poids compris entre 50 et 66T.



Voussoirs Déviateur: avec un diaphragme permettant la déviation de la précontrainte externe ondulée ainsi que des raidisseurs latéraux destinés à recevoir la précontrainte externe rectiligne. Poids compris entre 56 et 68T.



Voussoirs Spéciaux: voussoirs sur pile et voussoirs sur culée. Avec une dalle inférieure épaissie au droit des appareils d'appui, ainsi que des diaphragmes épaissis pour l'ancrage des câbles de précontrainte externes et internes.

- Poids des VSP: entre 72 et 80T
- Poids des VSC: entre 77 et 82T



Préfabrification des Voussoirs



➤ Vues Aériennes:



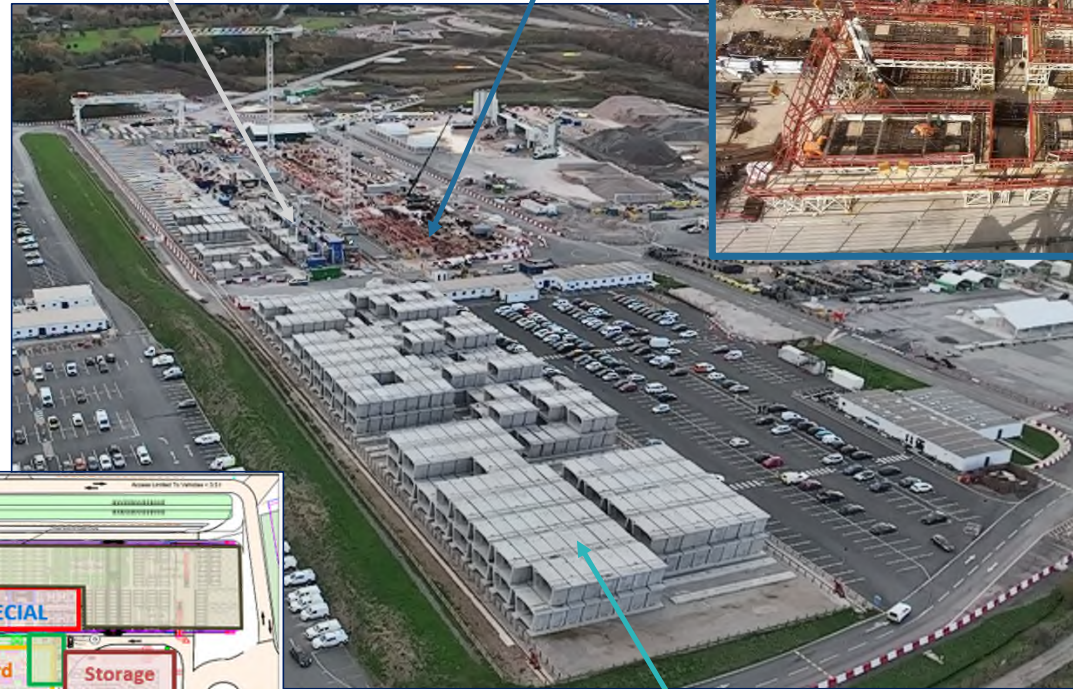
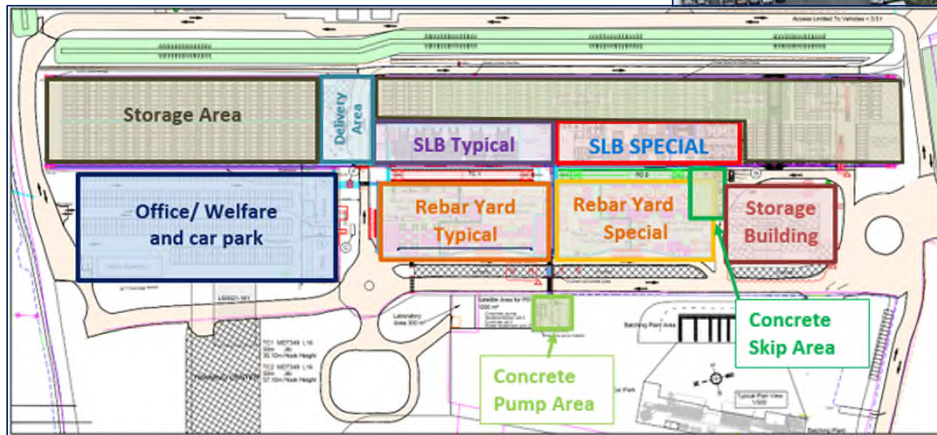
Aire de Cellules de Préfabrification

Aire de Préfabrication des Armatures



➤ Chiffres Clés:

- Superficie totale: 55,000m²
- Main d'oeuvre: 190 compagnons



Stockage des voussoirs

➤ Principaux Equipements:

- 1no. pont roulant sur rails 90T CMU / 54m portée
- 2no. grues à tour sur rails 16T CMU
- 2no. pompes stationnaires de bétonnage
- 2no. mâts de bétonnage 24m portée

Préfabrication des Voussoirs



➤ Préfabrication et Assemblage des Armatures:

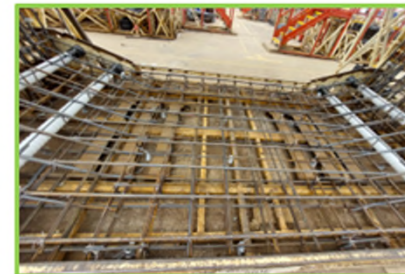
1. Assemblage des sous-éléments dans des **gabarits de montage** de plus petite taille:
 - Dalle inférieure
 - Âmes avec nervures
 - Dalle supérieure
 - Voiles
2. Levage et mise en place des sous-éléments dans le **gabarit final** de la cage d'armatures
3. Assemblage et liaison de l'ensemble des éléments dans le gabarit final de la cage d'armatures
4. Ration d'assemblage:
 - **15hrs/T** pour les voussoirs standards
 - **22hrs/T** pour les voussoirs spéciaux



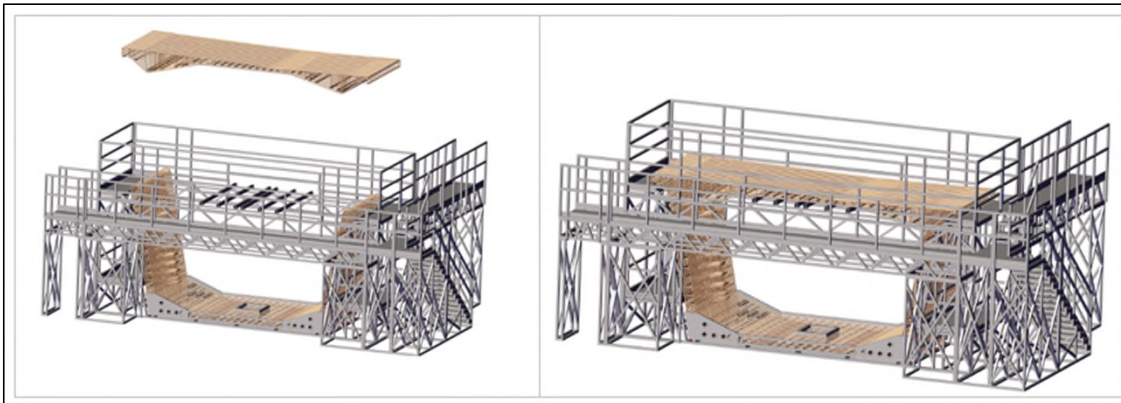
Web sub element



Top Slab sub element



Bottom slab sub element





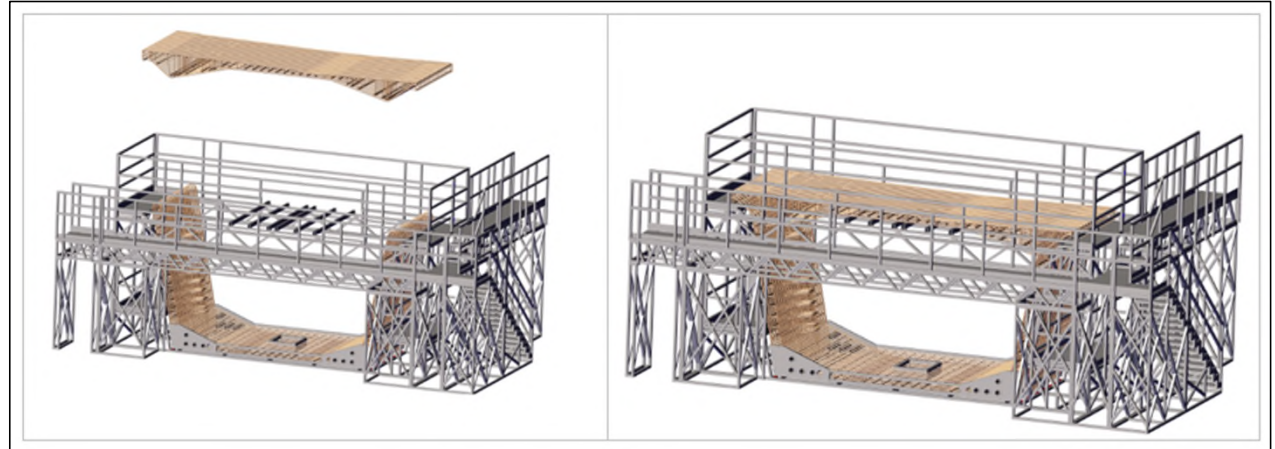
➤ **Gabarits d'assemblage:**



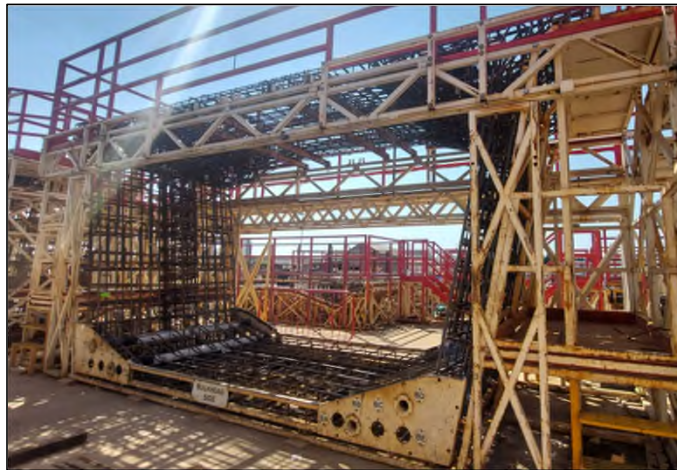
1. Gabarit sous-élément – Dalle supérieure



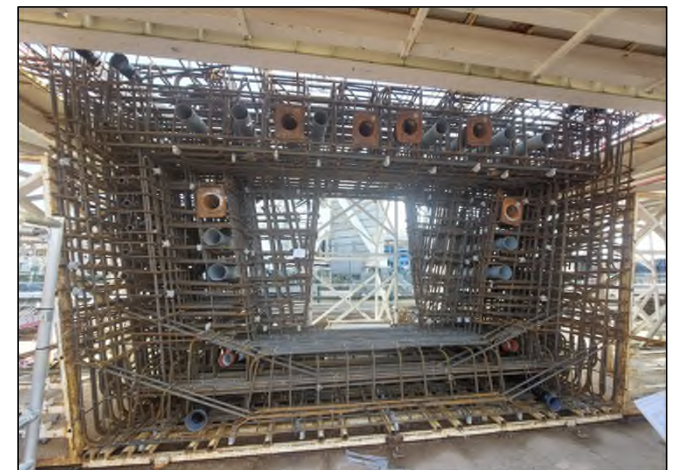
2. Sous-élément assemblé – Dalle supérieure



3. Sous-élément levé et assemblé dans le gabarit final



Gabarit final – Voussoir standard



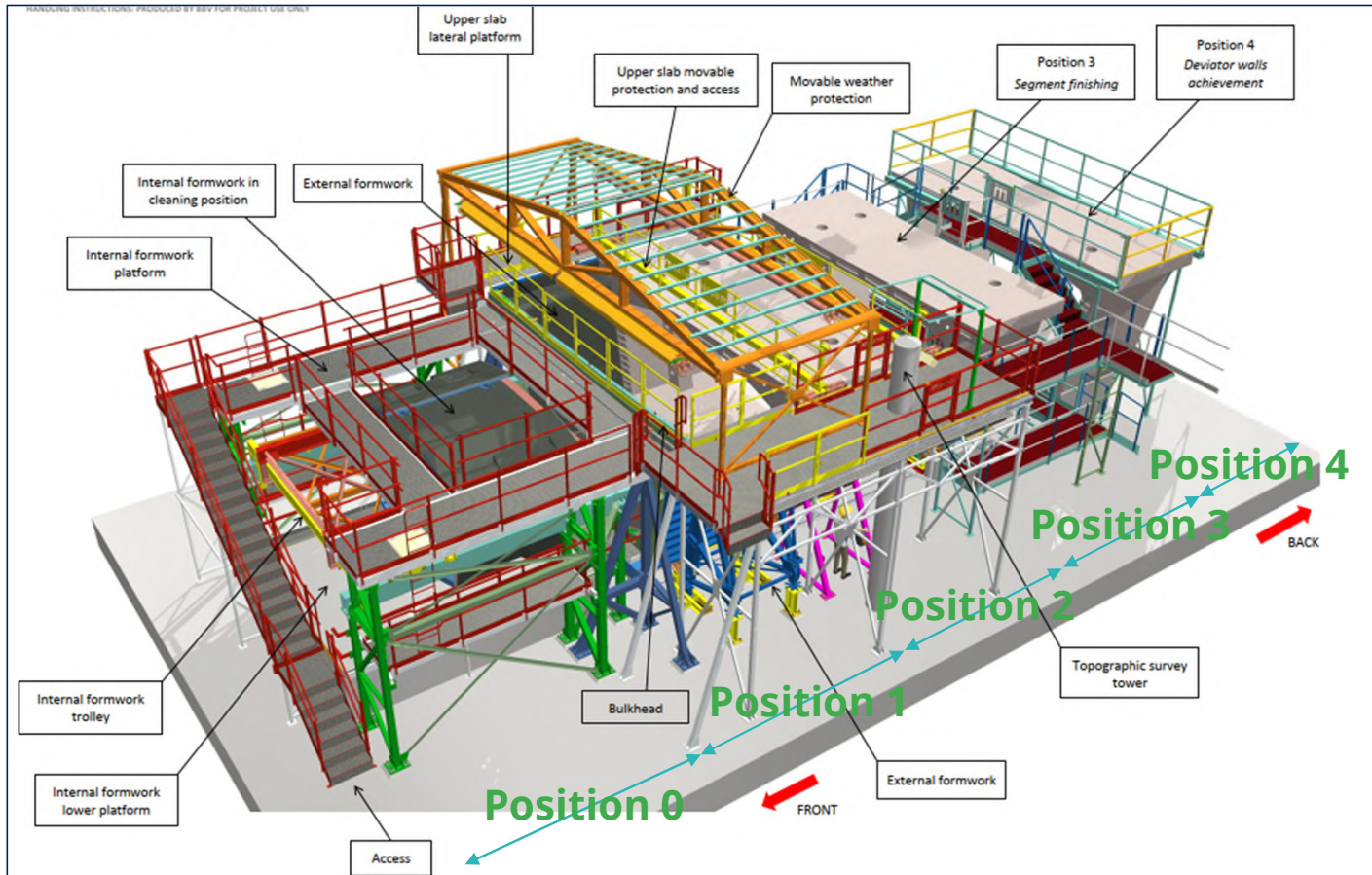
Gabarit final – Voussoir spécial

Préfabrication des Voussoirs



➤ Cellules de Préfabrication:

La Cellule de Préfabrication (9no. au total) est une ligne de production équipée d'un coffrage extérieur et d'un noyau intérieur qui permet la fabrication complète d'un voussoir, au travers de quatre positions ou étapes fonctionnelles successives.



Position 0 – Nettoyage du coffrage:

Cette zone comprend l'aire de nettoyage du coffrage intérieur ainsi que les accès sécurisés permettant les interventions sur le poste de bétonnage

Position 1 – Poste de bétonnage:

Il s'agit de la zone de bétonnage des voussoirs. La cage d'armatures y est mise en place par levage. Ce poste comprend le coffrage de fond et les panneaux de coffrage extérieurs, des garde-corps mobiles, des systèmes de chauffage externes ainsi qu'une bâche isolante supportée par une structure de toiture.

Position 2 – Voussoir de contre-moule:

La Position 2 accueille le voussoir de référence, qui est aligné avec le nouveau voussoir avant le début du bétonnage. Le voussoir repose sur un chariot mobile équipé de vérins permettant des réglages fins de positionnement. Une fois l'alignement réalisé, le voussoir de référence est verrouillé afin de rester parfaitement stable pendant toute l'opération de coulage.

Position 3 – Poste de finition:

Ce poste est dédié à l'ensemble des opérations de finition, de réparation éventuelle et de contrôle avant le transfert du voussoir vers la zone de stockage.

Position 4 – 2^e phase des voussoirs déviateurs:

Cette position est utilisée pour le bétonnage des voiles latéraux de deuxième phase des voussoirs déviateurs.



➤ **Cycle de Préfabrication:**

1. Contrôle géométrique du voussoir précédent coulé en Position 1



2. Décoffrage du voussoir précédemment bétonné



3. Voussoirs en Positions 1 et 2 déplacés respectivement vers les Positions 2 et 3



4. Ajustement du voussoir contre-moule (chariot x,y,z)



5. Ajustement du coffrage extérieur et du masque extérieur





➤ **Cycle de Préfabrication:**

6. Mise en place et Ajustement de la cage d'armatures en Position 1



8. Bétonnage



9. Cure

7. Mise en place et ajustement du coffrage intérieur



10. Stockage



Préfabrication des Voussoirs



➤ Palonnier Automatique de Levage:

Conçu et fourni par **BVS Bulbuloglu**
Certifié par **Amtri Veritas**

Il s'agit d'un palonnier automatique avec deux configurations de levage:

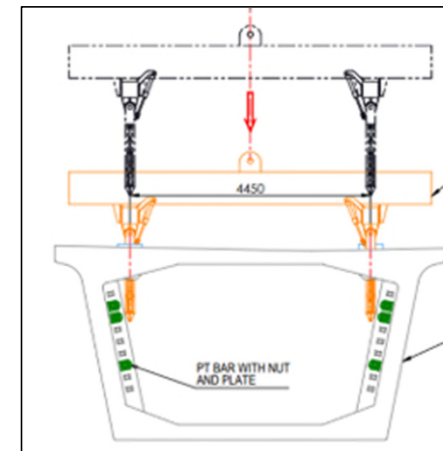
1. Chapes de levage:

Pour les voussoirs spéciaux, des axes sont poussés dans les chapes de levage elles-mêmes fixées sur l'extrados des voussoirs.



2. Réservations de voussoirs:

Pour les voussoirs standards, les suspentes sont insérées à travers la dalle supérieure, et les têtes marteaux sont basculées à leur sous-face pour permettre ensuite le levage.



Préfabrication des Voussoirs



➤ Transport des Voussoirs:

- Voussoirs chargés et arrimés à l'usine de préfabrication par le biais du pont roulant
- Voussoirs chargés sur des charpentes à pattes, transférables sur les baies de déstockage présentes sur les différents sites
- Voussoirs considérés comme charges exceptionnelles, transportés sur le réseau routier public et avec l'appui de véhicule d'escort
- Operations de transport sous-traitées à **Allelys**



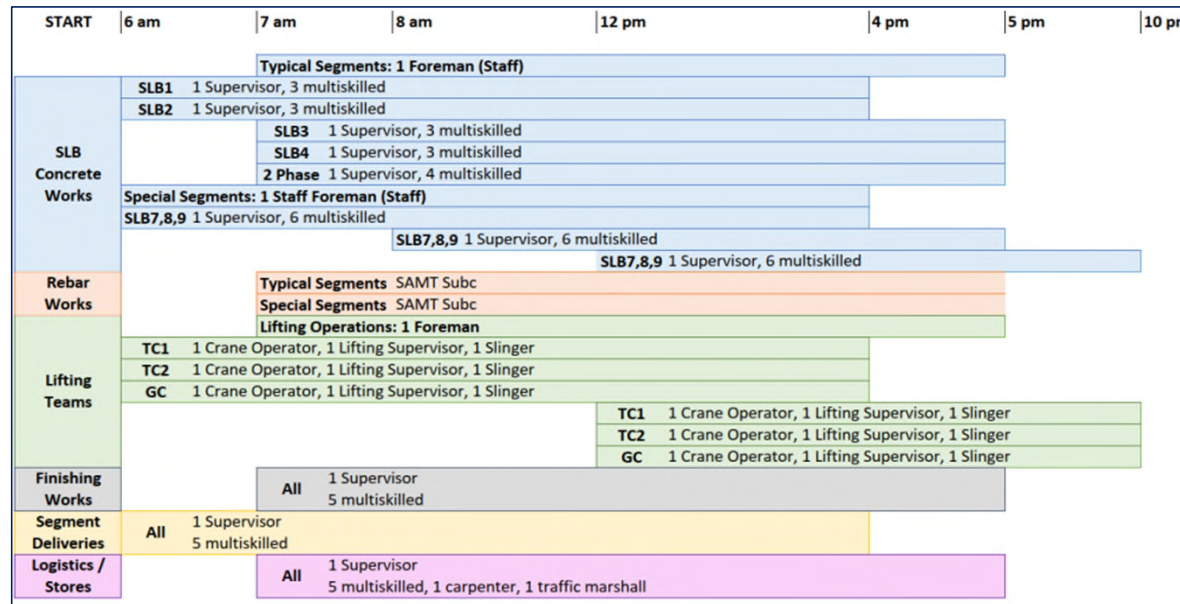
Préfabrication des Voussoirs



➤ Performance de Préfabrication:

- Construction des infrastructures de l'usine: **15 mois** depuis Janvier 2022
- Fabrication des voussoirs: **43 mois** depuis Juillet 2022
- Temps de travail: **10 heures par jour (7,75 heures effectives)**, 5 jours par semaine, 21 jours travaillés par mois (intempéries, jours fériés etc)
- Production en pointe:
 - 6 voussoirs standards par jour (issus des 6 cellules) soit **30 voussoirs par semaine**
 - 1 voussoir special par jour (issus des 3 cellules) soit **5 voussoirs par semaine**
 - Total de **35 voussoirs par semaine**
- Transport des voussoirs: **48 mois** depuis Novembre 2023
- Transport en pointe:
 - 8 voussoirs par jour soit **40 voussoirs par semaine**
 - 4 rotations par remorque et par jour (2 remorque en continue)
- Main d'oeuvre en pointe: **81 compagnons mobilisés** hors sous-traitance (assemblage armatures par **SAMT**)

➤ Organisation journalière:



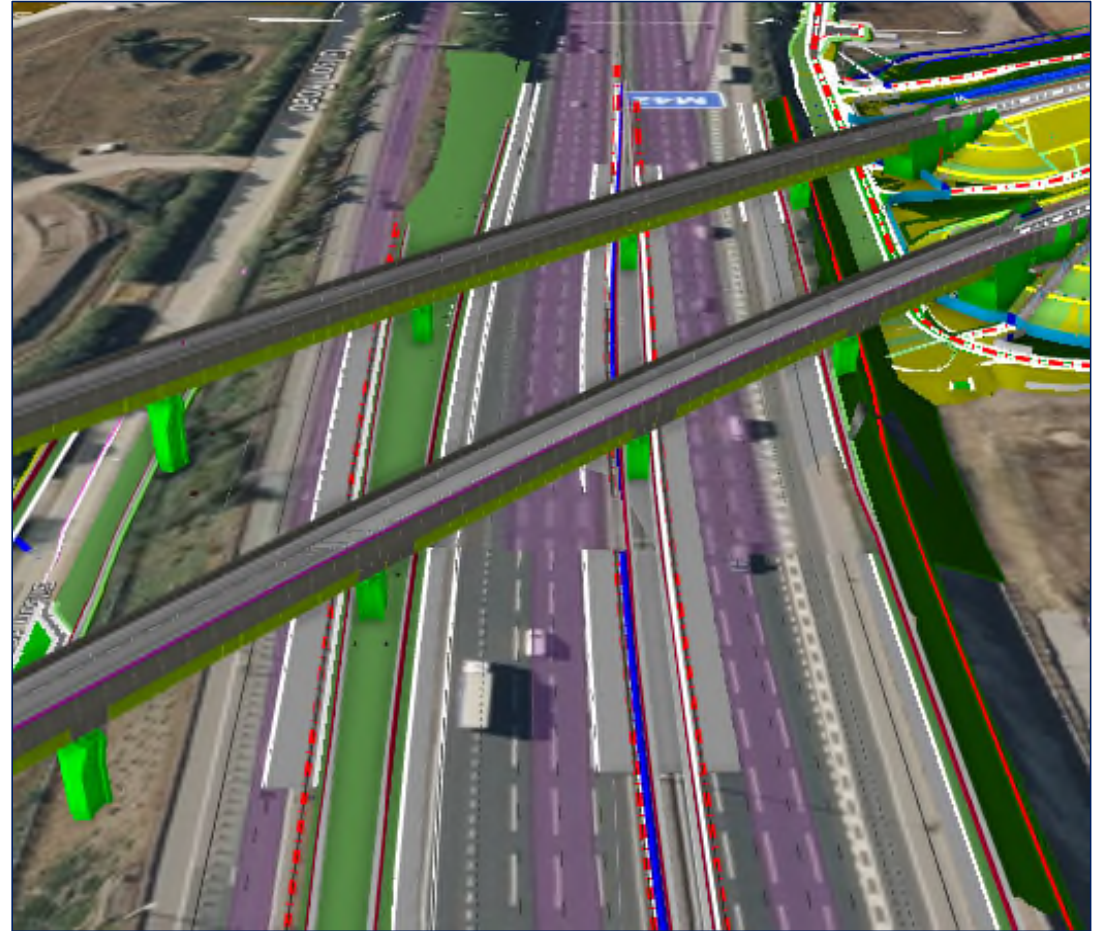
Travées sur Autoroutes

M42&M6 Toll

Travées sur Autoroutes M42&M6 Toll

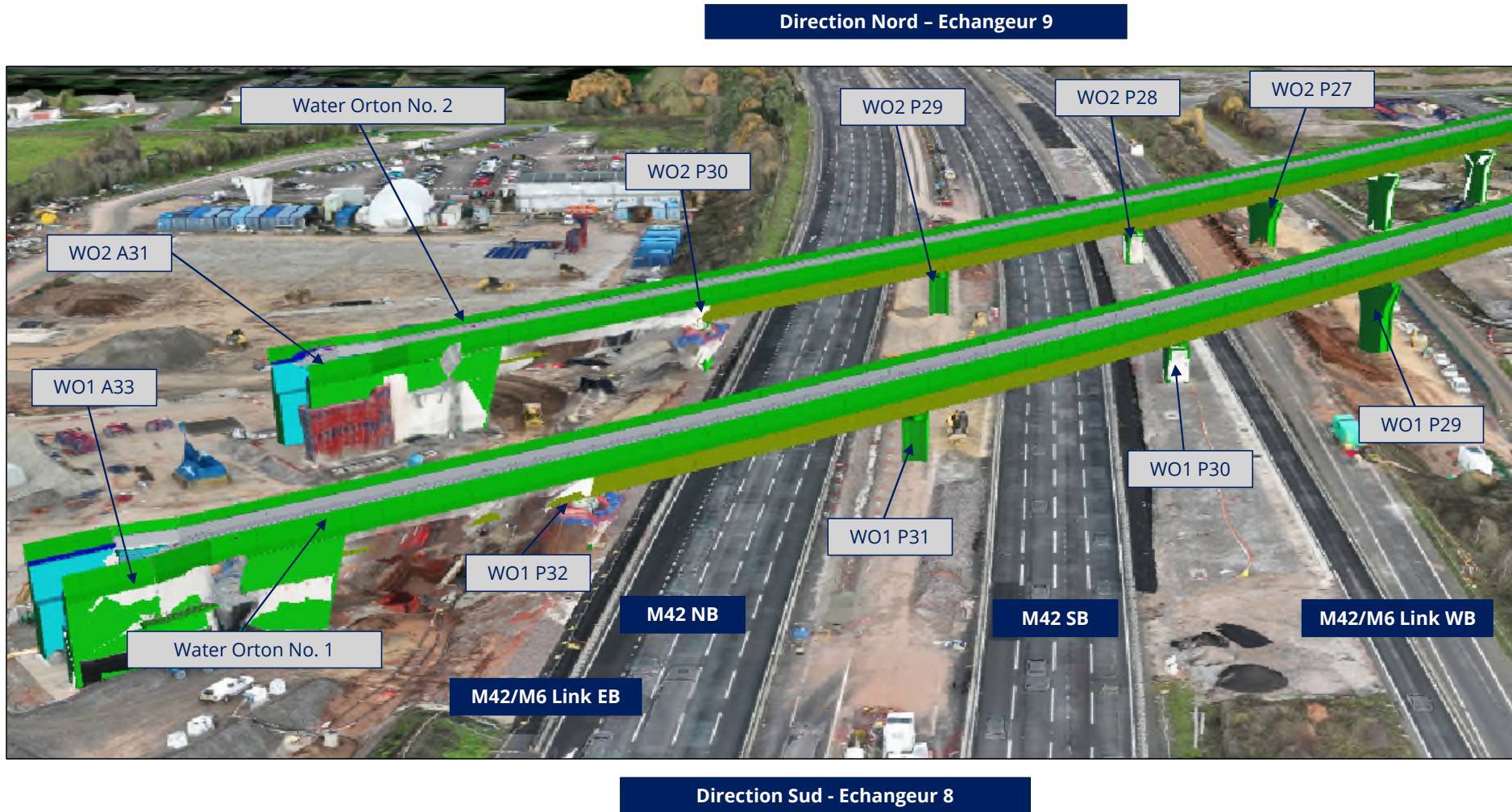
➤ Localisation du Projet et Intentions:

- Travées sur autoroutes: **6 travées au total** (3 travées pour chacun des deux viaducs) et franchissant 3 chaussées:
 - **M42 sens nord** 'Northbound' – Section commune avec la section à péage de M6 Toll
 - **M42 sens sud** 'Southbound' – Section commune avec la section à péage de M6 Toll
 - **Bretelle de liaison M42/M6** en direction ouest 'Westbound'
- Mise en œuvre d'une méthode spécifique de montage avec préfabrication des travées complètes, puis transport et mise en place à l'aide d'un **convoi de fardiers automoteur**.
- L'objectif était de **réduire l'impact sur le réseau autoroutier** grâce à des fermetures de circulation limitées aux week-ends, contrairement à la solution utilisant la pose à l'avancement au mât de haubanage et à la potence, qui aurait nécessité une fermeture complète de plusieurs semaines (considération pour les phases provisoires et la distraction des automobilistes).
- À un stade préliminaire, **6 fermetures de week-end** étaient prévues. Ce nombre a ensuite été ramené à **3 fermetures de week-end** en réalisant le transport de **2 travées par week-end**, afin de diminuer davantage l'impact sur le réseau autoroutier.
- **Une aire d'assemblage** dédiée à la préfabrication des travées a été aménagée à proximité immédiate de l'autoroute.



Travées sur Autoroutes M42&M6 Toll

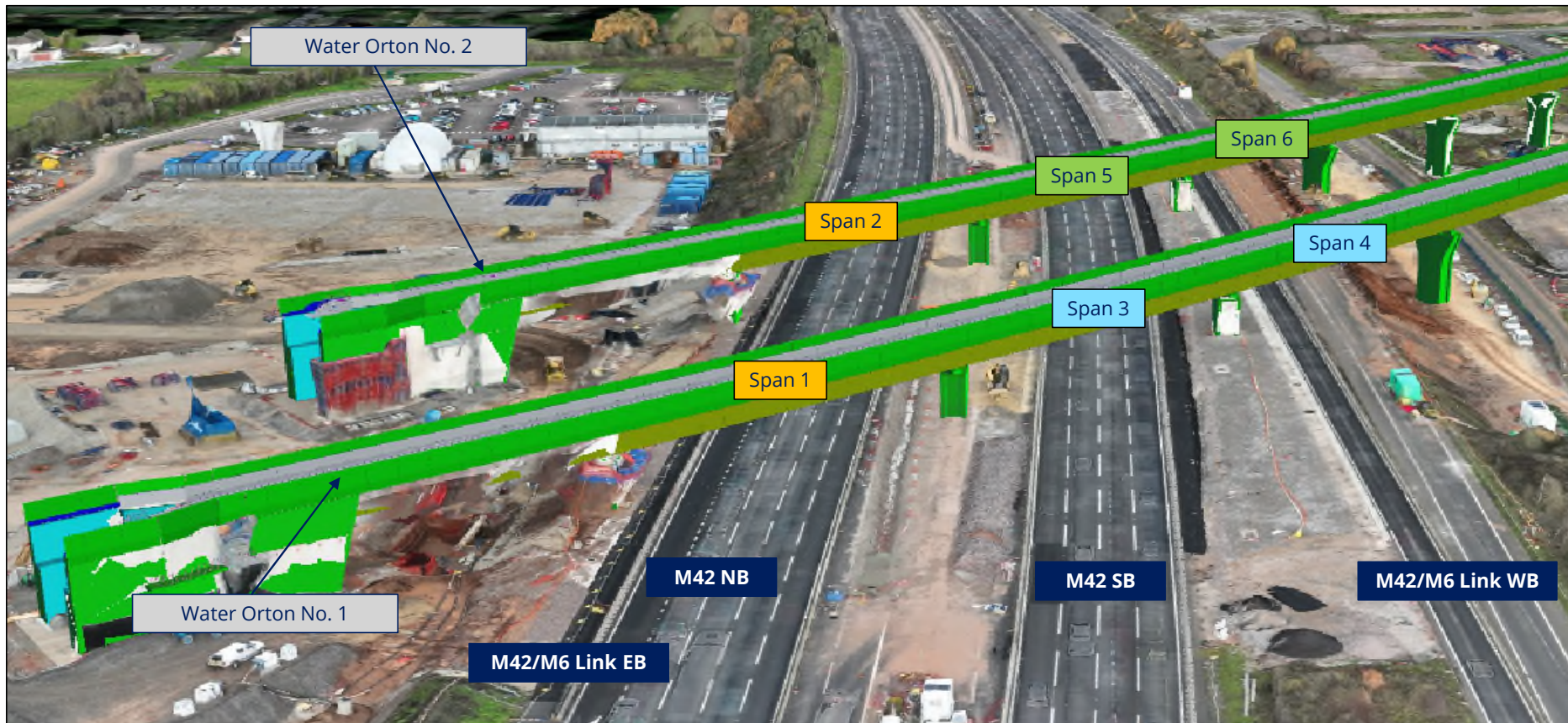
➤ Localisation du Projet et Identification:



Travées sur Autoroutes M42&M6 Toll

➤ Séquence de Travaux:

Direction Nord - Echangeur 9



1^{ère} Fermeture Weekend
**Ven. 24/07/2026 (21h) -
Lun. 27/07/2026 (5h)**

2^e Fermeture Weekend
**Ven. 14/08/2026 (21h) -
Lun. 17/08/2026 (5h)**

3^e Fermeture Weekend
**Ven. 18/09/2026 -
Lun. 21/09/2026 (5h)**

Direction Sud - Echangeur 8



Travées sur Autoroutes M42&M6 Toll

➤ Intervenants du Projet:

Acteurs Principaux du Projet



Parties Prenantes



M6toll

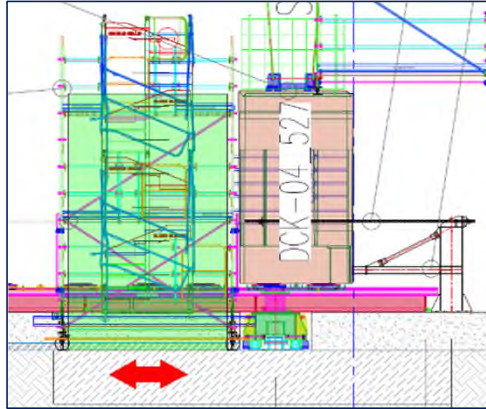


Sous-traitants de BBV

Travées sur Autoroutes M42&M6 Toll



➤ Préfabrication des Travées sur l'Aire d'Assemblage:



- **Une sequence de méthodologie détaillée** pour l'exécution de chaque travée.
- **Une aire d'assemblage dédiée**, avec ses infrastructures et équipements spécifiques, a été conçue pour l'assemblage des travées.
- Travaux provisoires: la plateforme granulaire, les fondations en béton armé et les voies d'assemblage et de ripage.
- **Deux voies d'assemblage longue 48m** ont été aménagées en réutilisant les caissons de grue à tour Patry disponibles sur le chantier. Cette installation permettait d'assembler l'ensemble des 6 travées, composées chacune de **16 à 19 voussoirs**.
- **Des chariots** ont été positionnés sur les voies et sous chaque voussoir afin de permettre leur déplacement longitudinal à l'aide de barres de précontrainte ainsi que l'encollage successif des voussoirs.
- **Une structure de maintien horizontale** a été mise en place en extrémité pour soutenir et régler les premiers voussoirs et afin de garantir leur alignement précis.
- **Un échafaudage spécifique** a été préassemblé puis levé en position pour l'ensemble des opérations de précontrainte.
- **Des câbles de précontrainte extérieurs temporaires rectilignes** ainsi que **des barres de précontrainte supplémentaires** ont été installés afin de permettre le vérinage et la manutention de la travée complète.

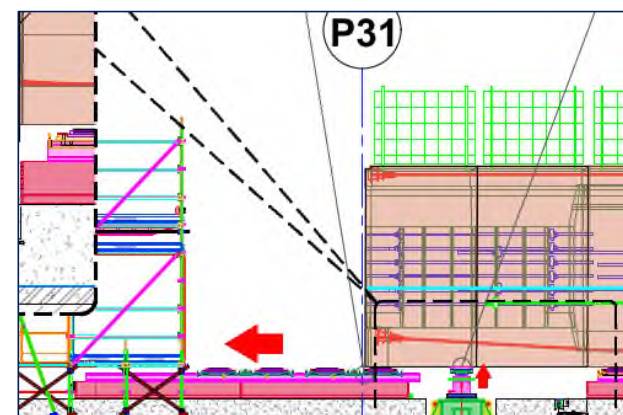
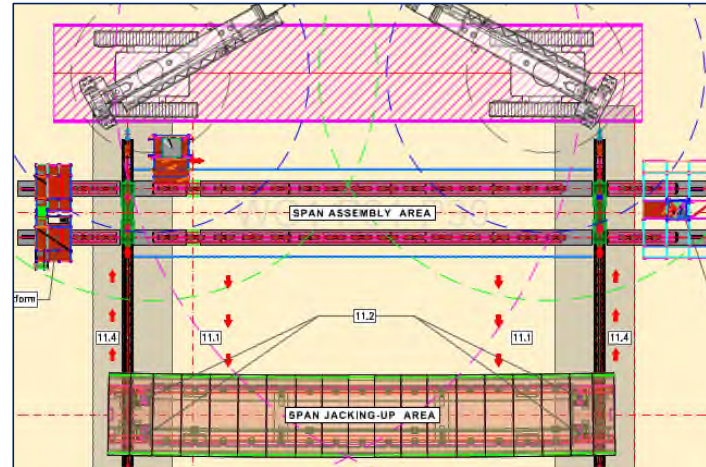


Travées sur Autoroutes M42&M6 Toll



➤ Ripage des Travées:

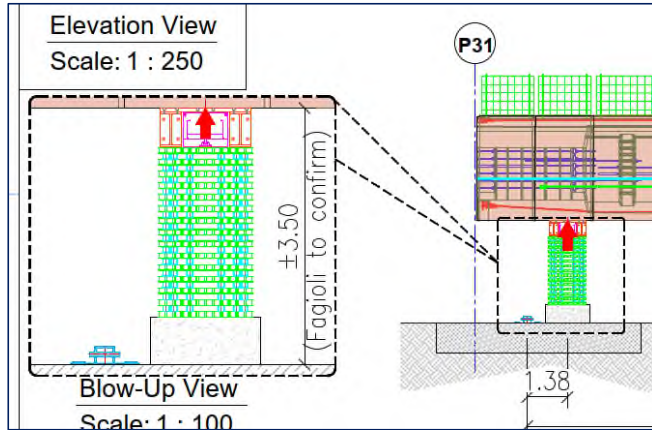
- Une fois la **précontrainte achevée**, la travée était considérée comme entièrement assemblée et prête pour les opérations de vérinage et de ripage.
- Le **système de ripage** était constitué de voies et de chariots équipés de vérins hydrauliques, avec une configuration spécifique de la deuxième voie pour la travée la plus courte (WO2 P27-P28, composée de 16 segments uniquement).
- 4 vérins hydrauliques de 320T** avec une course de 50mm (pression de service: 700 bars) étaient installés sur les poutres de ripage afin de soulever la travée et de libérer les voies d'assemblage.
- Une **méthode spécifique** de retrait des voies d'assemblage aux extrémités a été développée afin de dégager l'espace nécessaire au ripage.
- Le système de ripage utilisait **2 vérins double effet de 260T** avec une course de 1000mm (pression de service: 150 bars) permettant de riper la travée par passes successives (880mm) et cela sur **une longueur de 19m**.
- Les **poutres de ripage** reposaient sur **des rollers express BÖRKEY de capacité 200T** permettant de limiter le coefficient de frottement à environ 3%.



Travées sur Autoroutes M42&M6 Toll



➤ Mise à Niveau des Travées et Transfert sur Convoi Automoteur:



- Le tablier est transféré sur les **4 vérins hydrauliques de 600T** avec une course de 120mm. Le système fonctionne avec **des poutres en acier de 80mm** de hauteur empilées manuellement sous les vérins.
- Les 4 vérins sont **pilotés simultanément par ordinateur** afin de maintenir une charge et une course uniformes sur l'ensemble des vérins.
- La phase de levage est d'environ 2,40m** afin d'atteindre **une hauteur totale de 3,50m** pour le transfert sur convoi automoteur.
- La position des vérins de levage nécessite un ajustement pour toutes les travées. Les vérins sont installés sur des massifs en béton mis à niveau à l'aide d'un calage au mortier.
- Le transfert sur convoi est réalisé à l'aide **du système de levage intégré aux convois** ainsi que par **le débattement des fardiers** afin de garantir l'horizontalité de l'ensemble. Chaque convoi dispose de **48 lignes d'essieux (8 modules de 6 lignes d'essieux, configurés en 2 x 4)**.
- Le système de levage installé sur les modules est composé de **4 châssis hydrauliques de levage de 500T** chacun. Un convoi est équipé d'un système ENERPAC JS500 et l'autre d'un système fabriqué par GREINER.
- Un système d'arrimage** est installé et le convoi est stationné/amarré aux échafaudages afin de maintenir l'accès à l'intérieur et au-dessus de l'ouvrage et pour permettre d'achever les travaux de préparation.



Travées sur Autoroutes M42&M6 Toll



➤ Préparation avant la Coupure d'Autoroutes:

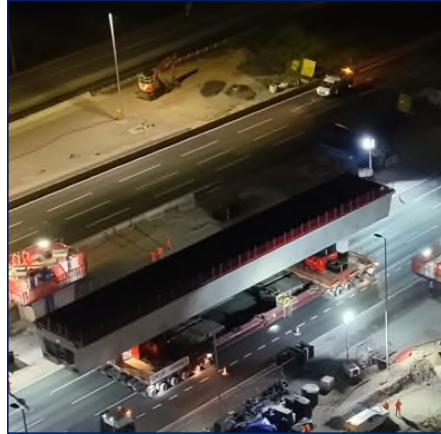
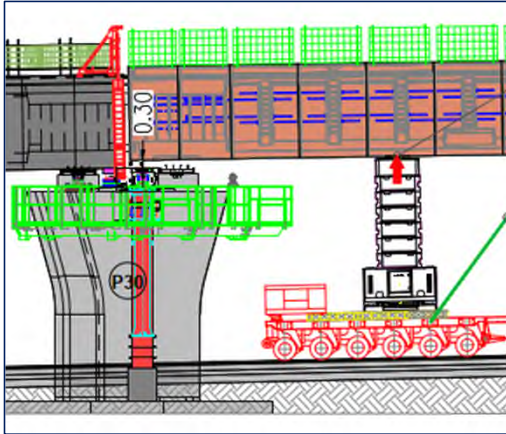
- Les deux tabliers sont prêts sur leurs convois en position de stationnement. **Les systèmes d'arrimage** aux convois sont installés. Huit chaînes, mises en tension à 7T, sont fixées aux points d'arrimage des modules ainsi qu'à des **anneaux de levage de 20T à rotation 360°**, installés dans les réservations de drainage des voussoirs.
- Des plaques en aluminium** sont installées sur les accotements de l'autoroute afin de protéger le réseau de drainage et d'éviter la dégradation des revêtements due à la rotation des roues des convois. **Des dalles de couverture renforcées** sont mises en place sur les regards de drainage situés sous la trajectoire des convois.
- Toutes les plateformes de travail sur piles, les colonnes et les appuis temporaires équipés **de boîtes de glissement** ainsi que **les coffrages extérieurs de clavage** sont installés sur les piles concernées, là où cela est requis.
- La mise en place de la fermeture de la chaussée débute à **21h00** avec pour objectif une fermeture complète à **22h00**.
- Le responsable de la sécurité et de la gestion du trafic confirme la fermeture effective et l'autoroute sécurisée pour permettre l'accès aux équipes.



Travées sur Autoroutes M42&M6 Toll



➤ Transport des Travées et Mise sur Appuis Provisoires:



- **La dépose des barrières temporaires débute** afin de libérer l'emprise nécessaire au passage des convois. La trajectoire des convois est matérialisée au sol.
- Le convoi quitte la zone d'assemblage en empruntant **la rampe spécialement construite** pour accéder à la chaussée nord de la M42.
- **Le tablier est transporté en position basse (3,5m)** afin de garantir un centre de gravité bas et une meilleure stabilité. La première phase du transport s'effectue entre la zone de stockage et la position de vérinage final.
- À la position de vérinage, le convoi est positionné **parallèlement à l'alignement définitif** du tablier et décalé latéralement (sans être situé entre les piles).
- Les dispositifs d'arrimage sont retirés afin de permettre le levage du tablier jusqu'à une hauteur d'environ 6,5 à 7,0m selon les travées. **Les fûts du système de vérinage** sont répartis sur l'autoroute en amont de la fermeture d'autoroute.
- **Les dispositifs d'arrimage** sont réinstallés et les convois se déplacent latéralement entre les piles afin de réaliser le transfert du tablier sur les appuis provisoires.
- **Des repères implantés sous les voussoirs** pour le positionnement des appuis provisoires sont réalisés préalablement par le géomètre afin de guider la mise en place précise du tablier.

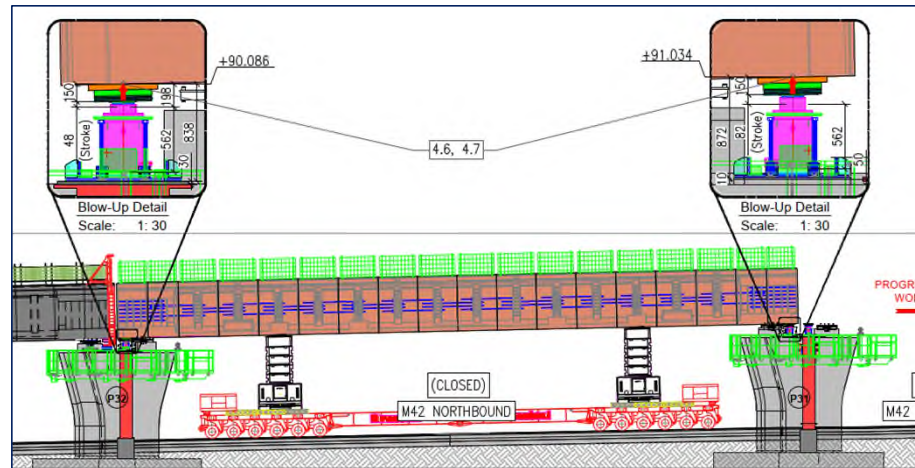
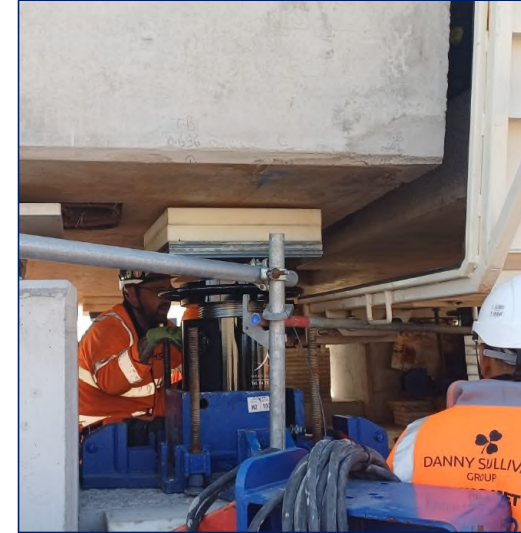


Travées sur Autoroutes M42&M6 Toll



➤ Ajustements des Travées:

- Sur chaque pile, **2 vérins hydrauliques de 350T** avec une course de 220mm sont positionnés dans **des boîtes de glissement offrant 50mm de réglage en plan (X,Y)**. Ils sont reliés selon le principe **du triangle de stabilité**.
- Le transfert du tablier vers les appuis temporaires s'effectue en plusieurs étapes. Le tablier se déplace à l'aide du convoi avec **une précision de $\pm 20\text{mm}$ en plan (X,Y)**. Les derniers centimètres de l'approche sont guidés et contrôlés par le géomètre.
- Une fois la position en plan jugée satisfaisante, le tablier est abaissé à l'aide du système de levage embarqué et de la course des modules (1500mm) afin de l'amener à environ **20mm (Z) au-dessus des appuis temporaires**. À cette étape, le profil en long du tablier est également ajusté grâce à la course des suspensions du convoi.
- Les vérins des appuis temporaires sont ensuite déployés pour reprendre la charge. Le transfert de charge est réalisé **de manière lente et contrôlée** afin de garantir que les pressions hydrauliques restent conformes aux valeurs de calcul sur l'ensemble des vérins. La charge résiduelle présente dans chacun des châssis de levage embarqué est connue en temps réel et communiqué.
- Le tablier est ensuite ajusté avec précision à l'aide **de vérins hydrauliques de 22T** intégrés dans les boîtes de glissement, permettant des déplacements selon les axes X et Y.
- Une fois la position finale obtenue, **les vérins de 350T et les boîtes de glissement sont verrouillés**.



Jacks on P29 / Span 30

Jacks Reactions	Jacks 350T
Pushing Area (cm ²)	502,65
Minimal force (T)	273,00
Resulting Pressure (bars)	543
Maximal force (T)	274,95
Resulting Pressure (bars)	547

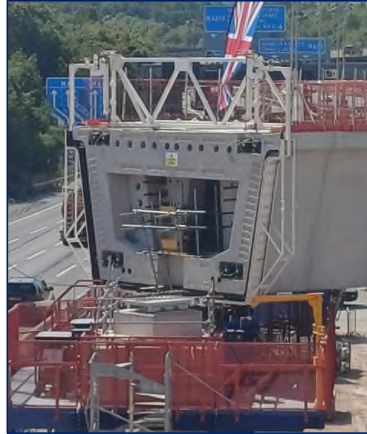
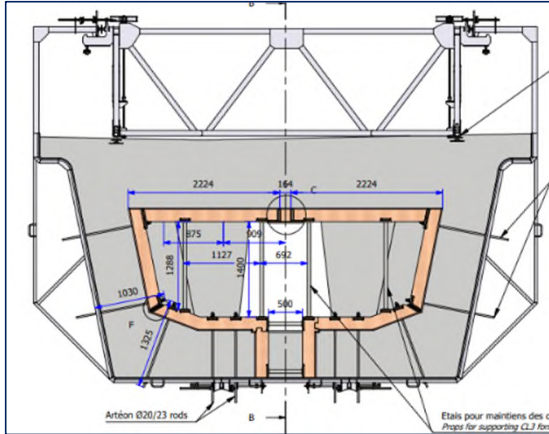
Jacks on P30 / Span 30

Jacks Reactions	Jacks 350T
Pushing Area (cm ²)	502,65
Minimal force (T)	153,27
Resulting Pressure (bars)	305
Maximal force (T)	325,50
Resulting Pressure (bars)	648

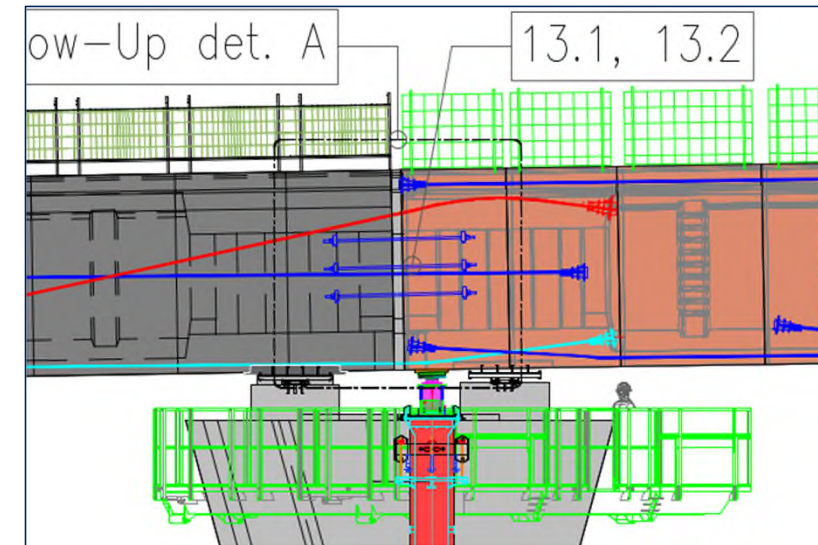
Travées sur Autoroutes M42&M6 Toll



➤ Clavage des Travées et Activités de Précontrainte:

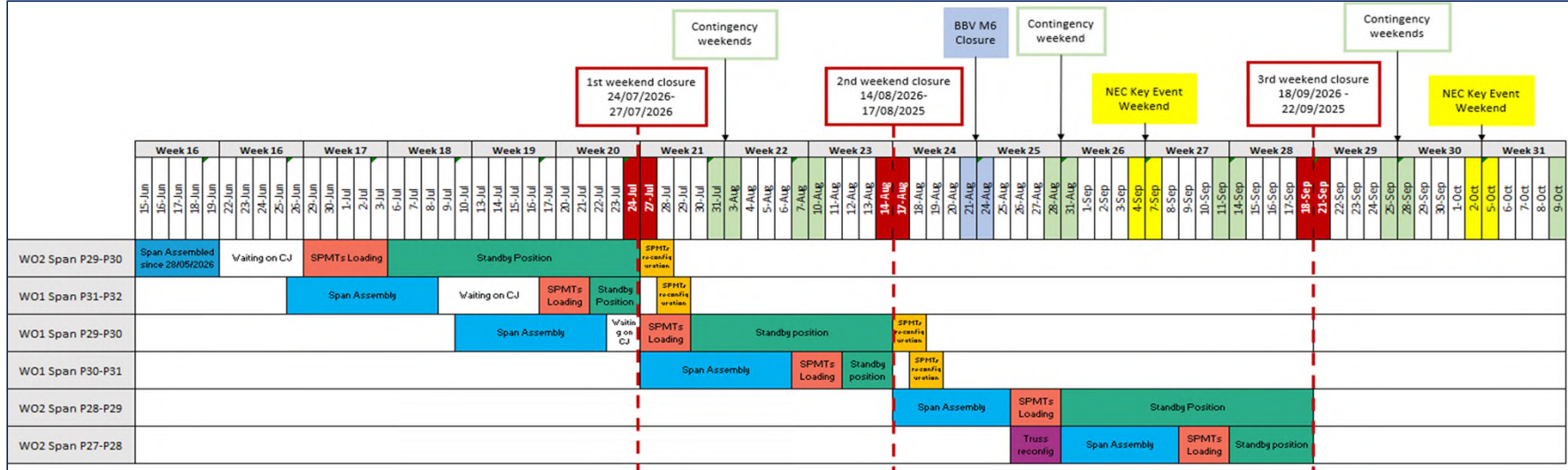


- **Le clavage de 200mm entre travées est réalisé.** Ce clavage permet de corriger les désalignements longitudinaux dus aux tolérances de construction des voussoirs.
- **Le coffrage extérieur en acier** est conçu pour être installé sur la travée N avant la mise en place de la travée N+1. Il peut être abaissé et allongé afin de fournir un dégagement suffisant pour permettre l'installation de la nouvelle travée.
- **Le coffrage intérieur est en bois.** Pour former les réservations destinées au passage des câbles de précontrainte extérieurs ondulés à travers le joint, **des coffrages gonflables SATUJO** sont utilisés et équipés de manomètres pour contrôler la pression.
- **Le joint de clavage** est coulé avec le produit **MAPEI MAPEFILL 110** (environ 2,5m³ par joint) et la résistance du matériau est surveillée à l'aide de **sondes MATURIX**.
- La pose des gaines, l'enfilage des câbles et leur mise en tension (réalisés par FREYSSINET) ne sont autorisés qu'après confirmation que la résistance requise a bien été atteinte. La mise en tension est effectuée à l'aide **du manipulateur de vérin**.
- La mise en tension des câbles entraîne une compression de chaque travée pouvant atteindre 5mm. Une fois cette opération terminée, la réalisation du joint de clavage suivant peut commencer et le scellement définitif des appareils d'appui peut être effectué.



Travées sur Autoroutes M42&M6 Toll

➤ Organisation Générale et Performance:



■ Assemblage de la travée – 10 Jours:

- **BBV:** 12 opérateurs, 3 opérateurs pour l'équipe de levage et 4 maçons
- **Freyssinet:** 6 opérateurs (non affectés à temps plein).
- **Matériels:**
 - Grue sur chenilles à flèche treillis de 300T
 - Equipements de ripage et de vérinage

■ Vérinage de la travée et transfert sur convoi – 2,5 Jours

- **Fagioli:** 12 opérateurs, y compris équipe de levage.
- **Matériels:**
 - 4 vérins de levage de 500T
 - 4 systèmes de levage embarqués de 500T
 - 16 lignes de fardiers automoteurs à 6 essieux chacun

■ Installation de la travée pendant la fermeture d'autoroute:

- **Durée:** fermeture continue de 56 heures.
- **BBV:** 2 équipes successives de 12 heures, chacune composée de 30 opérateurs et 3 opérateurs pour les équipes de levage.
- **Freyssinet:** 2 équipes successives de 12 heures, avec 2 équipes de travail par poste. Chaque équipe est composée de 8 opérateurs.
- **Fagioli:** 1 poste de 12 heures avec 2 équipes de travail, chacune composée de 8 opérateurs.
- **Matériels:**
 - 2 convois de fardiers automoteurs
 - 2 chariots télescopiques rotatifs
 - 4 vérins hydrauliques de 350T avec boîtes de glissement

Merci de votre attention