



Réalisation de Paralumes en Béton Fibré Ultra Performant (BFUP) à l'extrémité du tunnel du Vieux-Port à Marseille

F Laravoire, A Chastel, J Vanni – Marseille Provence Métropole
 A Schmitt, T Robinson, J Resplendino – SETEC TPI
 N Bennati, B Dimanche, A Simon, FB Cartiaux – Eiffage TP

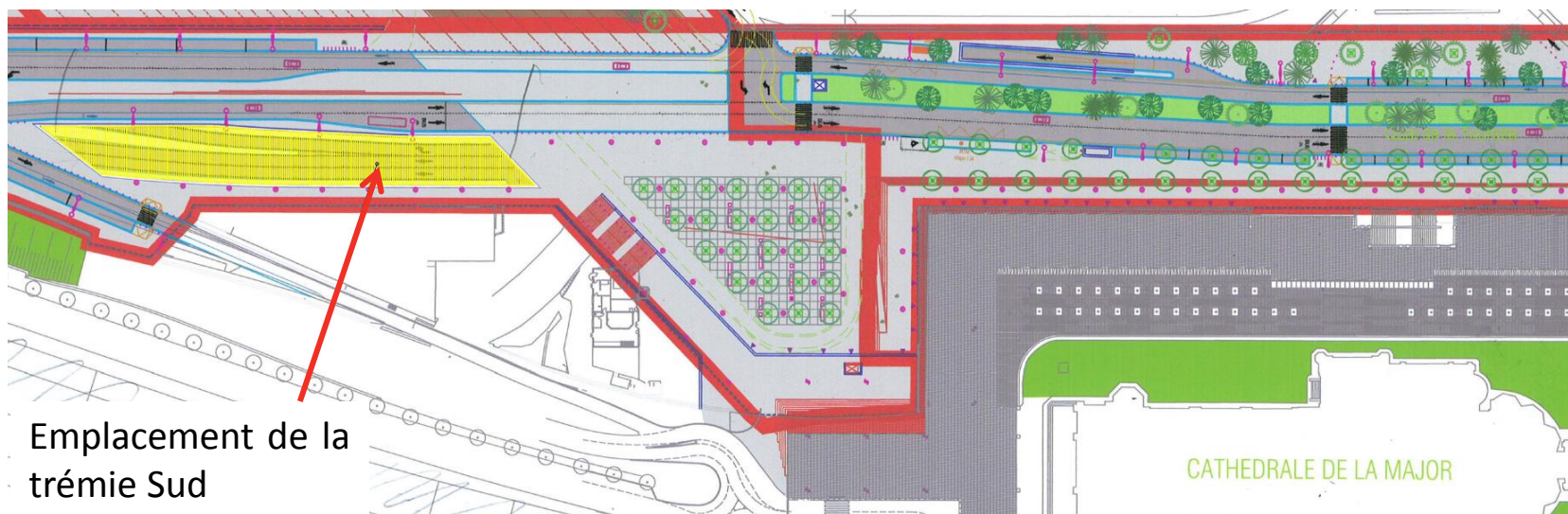
SOMMAIRE

-  **1 - Le Projet**
-  **2 - Le BSI Formule Feu**
-  **3 - Les Etudes d'Exécution**
-  **4 - Les Epreuves de Convenance**
-  **5 - La Préfabrication**
-  **6 - Le Chantier**



1 - Le Projet

Le projet de paralume porté par la communauté Urbaine Marseille Provence Métropole (CUMPM) s'inscrit dans le contexte général des travaux d'aménagement du boulevard du Littoral et des travaux de mise en conformité du tunnel Vieux-Port. L'opération consiste à mettre en œuvre près de 90 poutres précontraintes en BFUP jouant la fonction de paralume en couverture de la trémie existante entre la sortie du tunnel Joliette et l'entrée du tunnel Vieux port.





Vues d'ensemble de la trémie avant le démarrage des travaux



Les intervenants:

Maître d'Ouvrage:	Communauté Urbaine Marseille Provence Métropole
Maître d'Œuvre:	SETEC TPI
Architecte:	M. MASCARELLI
Contrôleur Technique:	VERITAS
Entreprise Générale:	Eiffage TP Méditerranée
Préfabrication:	Hürks Beton
Bureau d'Etudes:	Eiffage TP Direction des Moyens d'Ingénierie



Le projet en quelques chiffres :

- ◆ CA : 1 610 000€ HT
- ◆ Part BSI : 950 000€ HT
- ◆ 180 bossages frettés en mortier sans retrait
- ◆ 270 appuis en néoprène
- ◆ 90 poutres en BSI, de longueur comprise entre 2.0m et 14.5m, dont :
 - 140 m³ de BSI
 - 11 t Torons T15S
 - 800 m² isolant acoustique en laine de roche
 - 1050 ml de tôles inox perforées
- ◆ 1 poutre caisson de 30 t en béton précontraint (13 m³ de béton C40/50)
- ◆ 2500 m² de peinture anti-graffiti



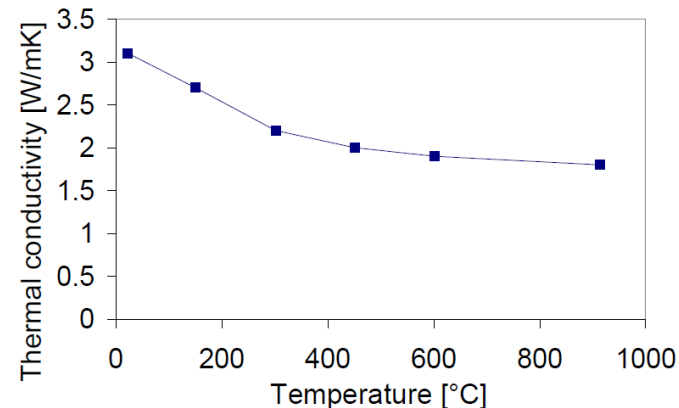
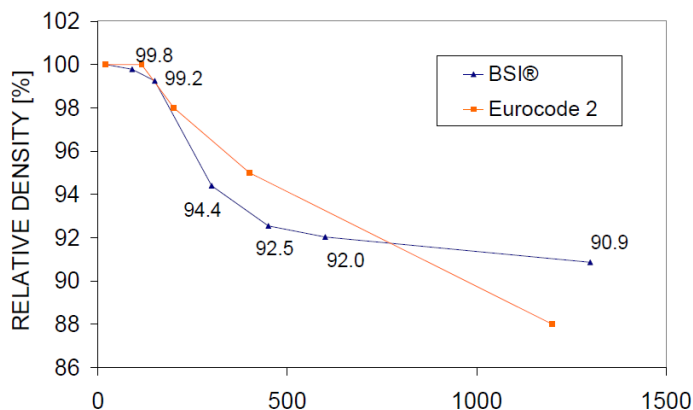
2 - Le BSI Formule Feu

Compte-tenu de l'exigence particulière de tenue au feu de ce projet (stabilité au feu ISO 834 pendant 1 heure), la formule Feu du BSI a été utilisée. Sa composition est la suivante:

Composition pour 1m³

Prémix BSI	2296 kg	+/- 2%
Super-plastifiant	56 kg	+/- 5%
Eau ajoutée	208 kg	+/- 2%
Fibres métalliques droites (Lf=20mm Φ =0.3mm)	195 kg	+/- 2%
Fibres de polypropylène (Lf=12mm Φ =18 μ m)	3 kg	+/- 2%

Et ses propriétés thermiques (λ , ρ C):



La chaleur spécifique est constante et vaut $C = 2000 \text{ J/kg.K}$

Les propriétés du BSI Formule Feu, déterminées selon les recommandations AFGC de 2013, sont les suivantes:

Caractéristiques physiques et mécaniques

Masse volumique	ρ	2.7t/m ³
Résistance caractéristique en compression à 28j	f_{ck}	150MPa
Résistance caractéristique en traction de la matrice à 28j	f_{ctk}	7.5MPa
Résistance caractéristique en traction du matériau fibré à 28j	σ_{bt}	6.1MPa
Valeur moyenne du module d'Young à 28j	E_{cm}	55GPa
Coefficient de Poisson	ν	0.2
Coefficient de dilatation thermique	α	13 μ m/m.°C
Retrait endogène à l'infini	$\epsilon_{ca,\infty}$	600 μ m/m
Retrait de dessiccation à l'infini	$\epsilon_{cd,\infty}$	240 μ m/m
Fluage propre et de dessiccation (chargement à $t_0=2j$)	$\varphi(\infty, t_0)$	1.5*
Fluage propre et de dessiccation (chargement à $t_0=7j$)	$\varphi(\infty, t_0)$	1.0*

(*) pour une déformation de fluage donnée par $\epsilon_{cc}(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0) \cdot \sigma_c / E_{cm}$

Lois de comportement

Plateau en traction directe post-fissuration :
 Fin de la partie élastique linéaire en traction :
 Loi $s(w)$ en traction post-plateau ($w > 0.5\text{mm}$) :
 Contrainte limite en compression :
 Module de déformation :

aux ELS

$\sigma_{bt} = 8.3 / K = 6.1\text{MPa}$
 $\text{Min} [f_{ctk} ; \sigma_{bt}] = 6.1\text{MPa}$
 $\sigma(w) = 6.1 - 2.4(w - 0.5)$
 $\sigma_{bc} = 0.6 f_{ck} = 90\text{MPa}$
 $E_{cm} = 55\text{GPa}$

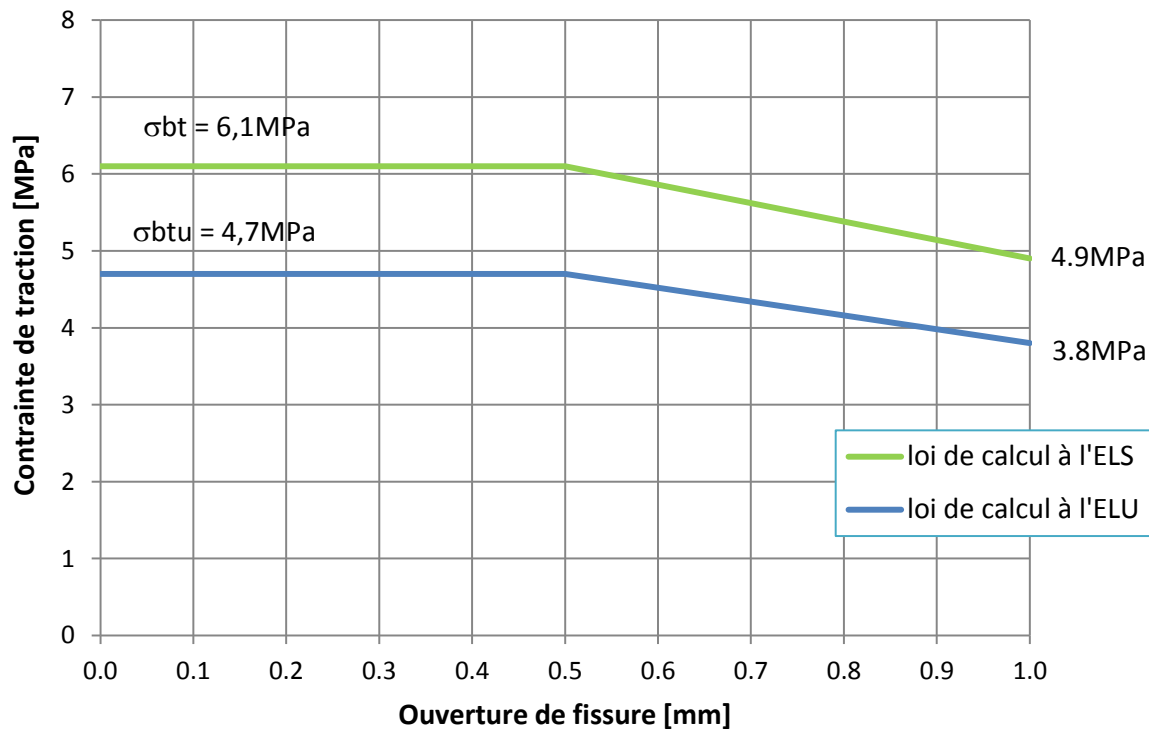
aux ELU

$\sigma_{btu} = 8.3 / (K \gamma_{bf}) = 4.7\text{MPa}$
 $\text{Min} [f_{ctk} / \gamma_{bf} ; \sigma_{btu}] = 4.7\text{MPa}$
 $\sigma(w) = 4.7 - 1.8(w - 0.5)$
 $\sigma_{bcu} = 0.85 f_{ck} / \gamma_b = 85\text{MPa}$
 $E_{cm} = 55\text{GPa}$

avec $K = 1.35$

$\gamma_{bf} = 1.3$

$\gamma_b = 1.5$





3 - Les Etudes d'Exécution

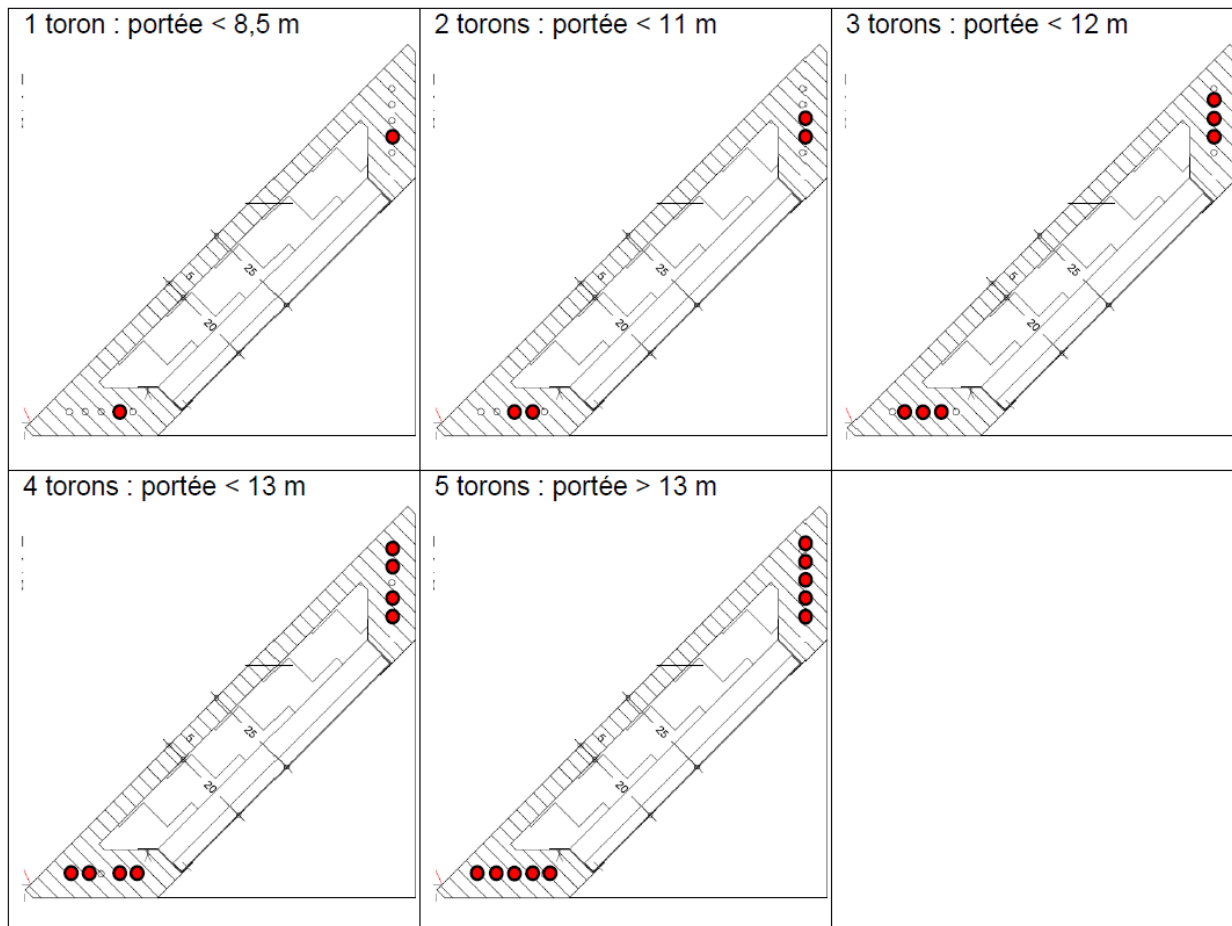
-Etudes réalisées par la DMI d'Eiffage TP et contrôlées par SETEC TPI.

-Mise en application du guide AFGC de 2013.

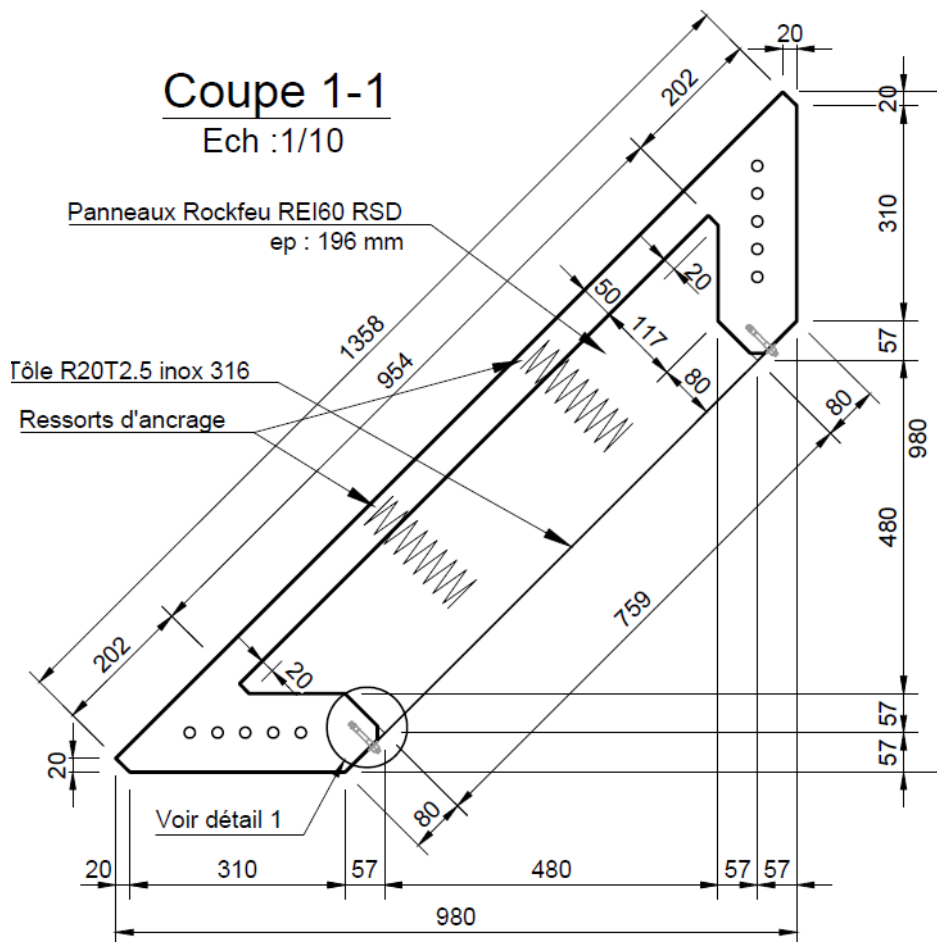
-Optimisation de la précontrainte selon la portée des éléments (portée comprise entre 2.0m et 14.50m).

-A l'ELS caractéristique la contrainte de traction maxi est de 6.6MPa en travée, tandis que la contrainte maxi compression est de 26MPa en travée et 34.1MPa en zone d'about.

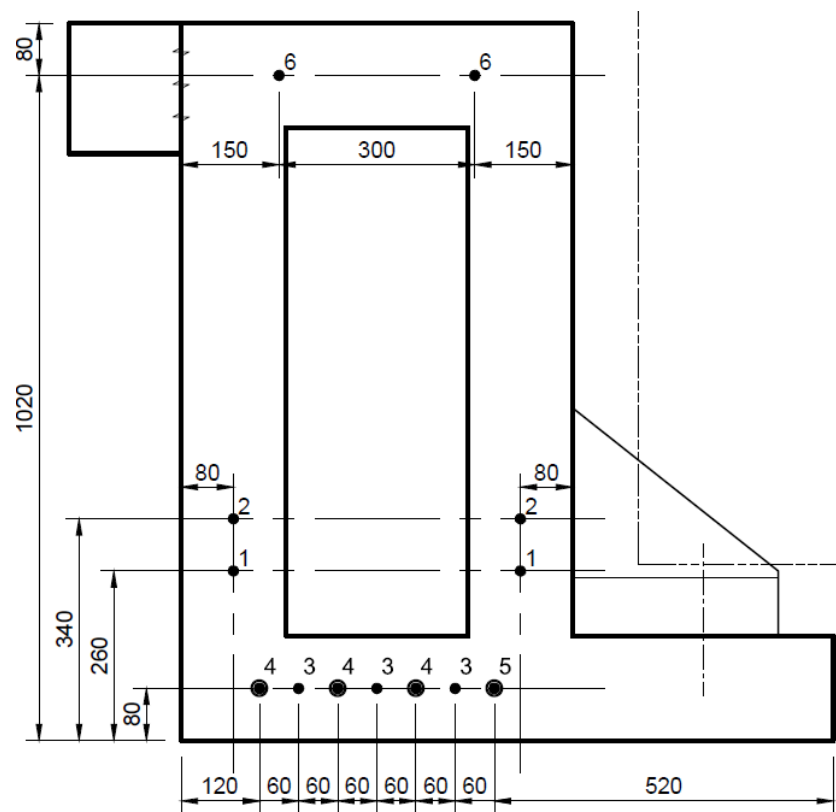
Les 5 sections de paralumés, fonction de leur portée



Coupe courante d'un paralume

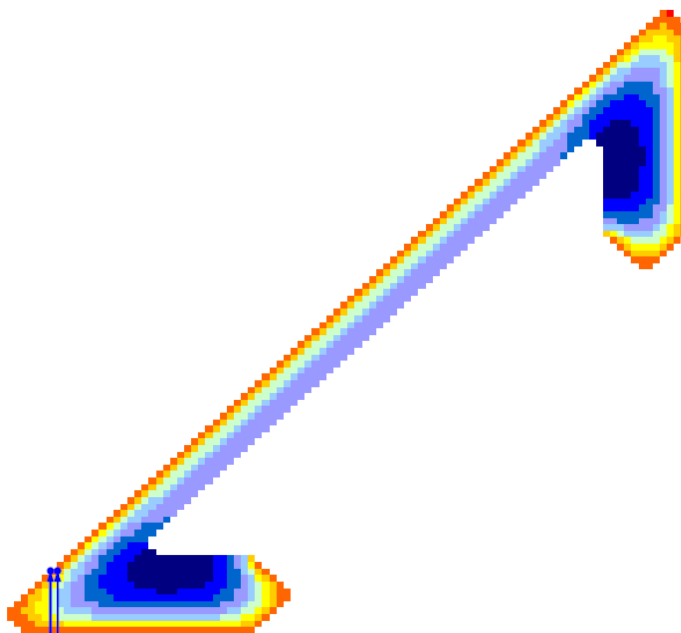


Coupe courante de la poutre-caisson

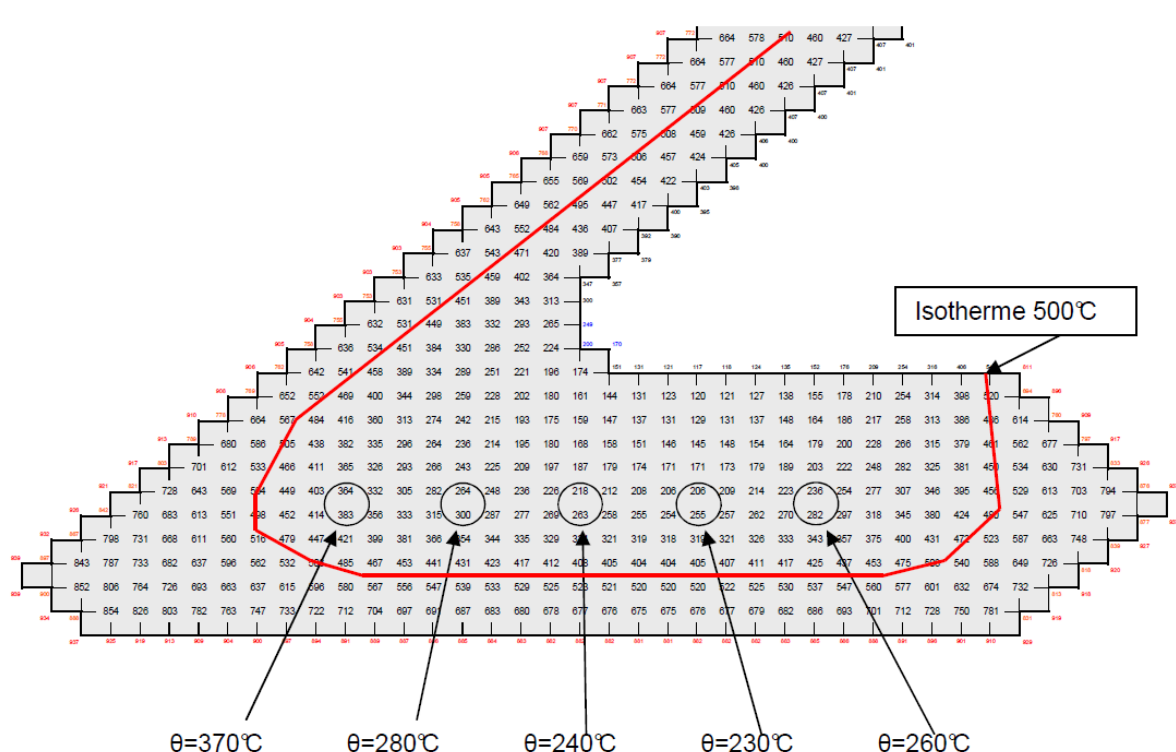


Comportement au feu des structures

En considérant les propriétés thermiques des matériaux (Carte d'identité pour le BSI et Eurocode 2 pour le béton C40/50), le calcul du champ de température est mené conformément aux règles Eurocodes 2 partie 1-2, qui précisent les coefficients de convection et de radiation à prendre en compte sur les différentes faces.

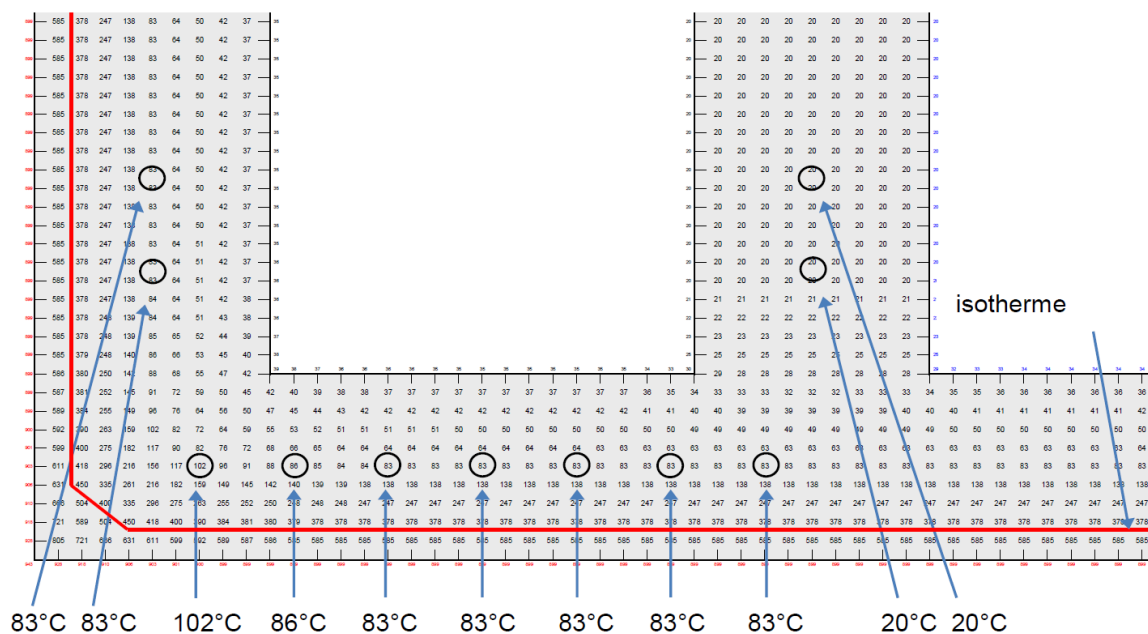
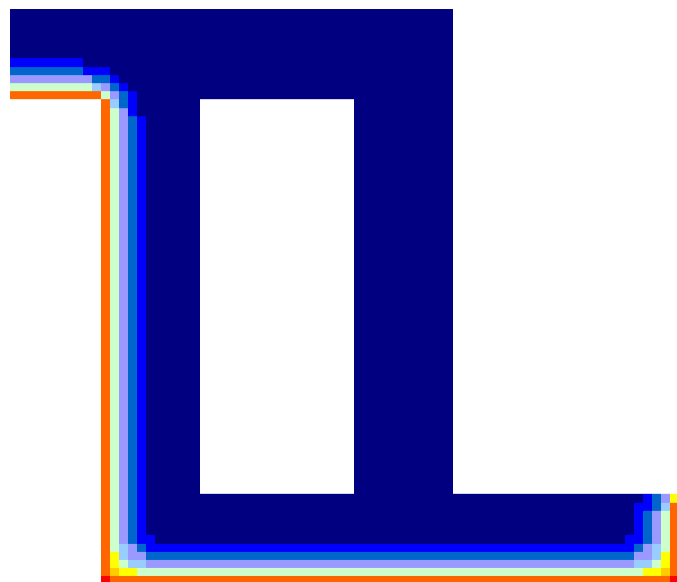


Après 60 minutes, la température du feu ISO 834 atteint 945 degrés.



Comportement au feu des structures

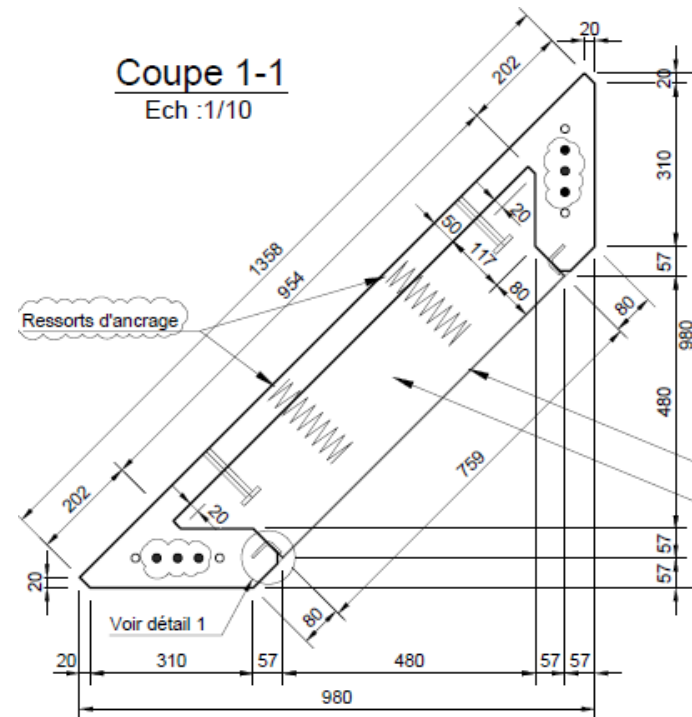
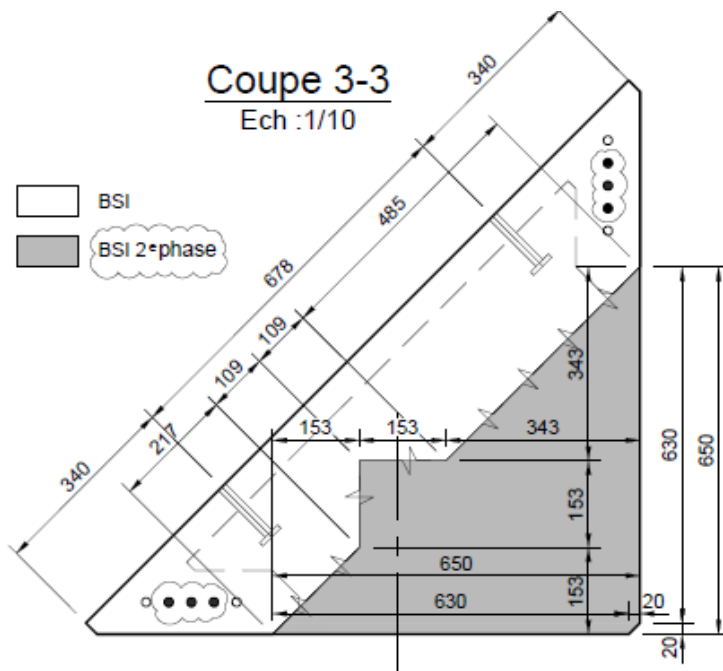
En considérant les propriétés thermiques des matériaux (Carte d'identité pour le BSI et Eurocode 2 pour le béton C40/50), le calcul du champ de température est mené conformément aux règles Eurocodes 2 partie 1-2, qui précisent les coefficients de convection et de radiation à prendre en compte sur les différentes faces.



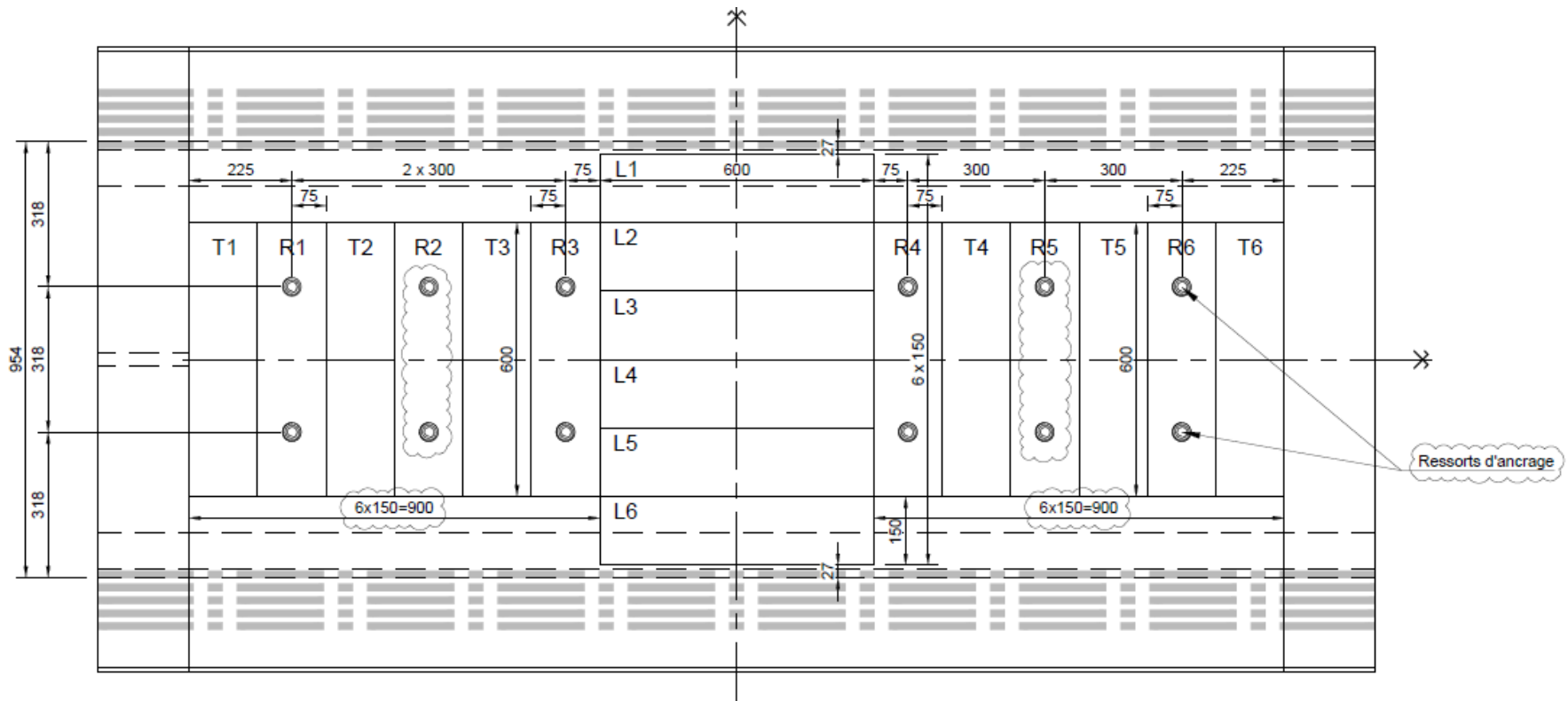
Après 60 minutes, la température du feu ISO 834 atteint 945 degrés.

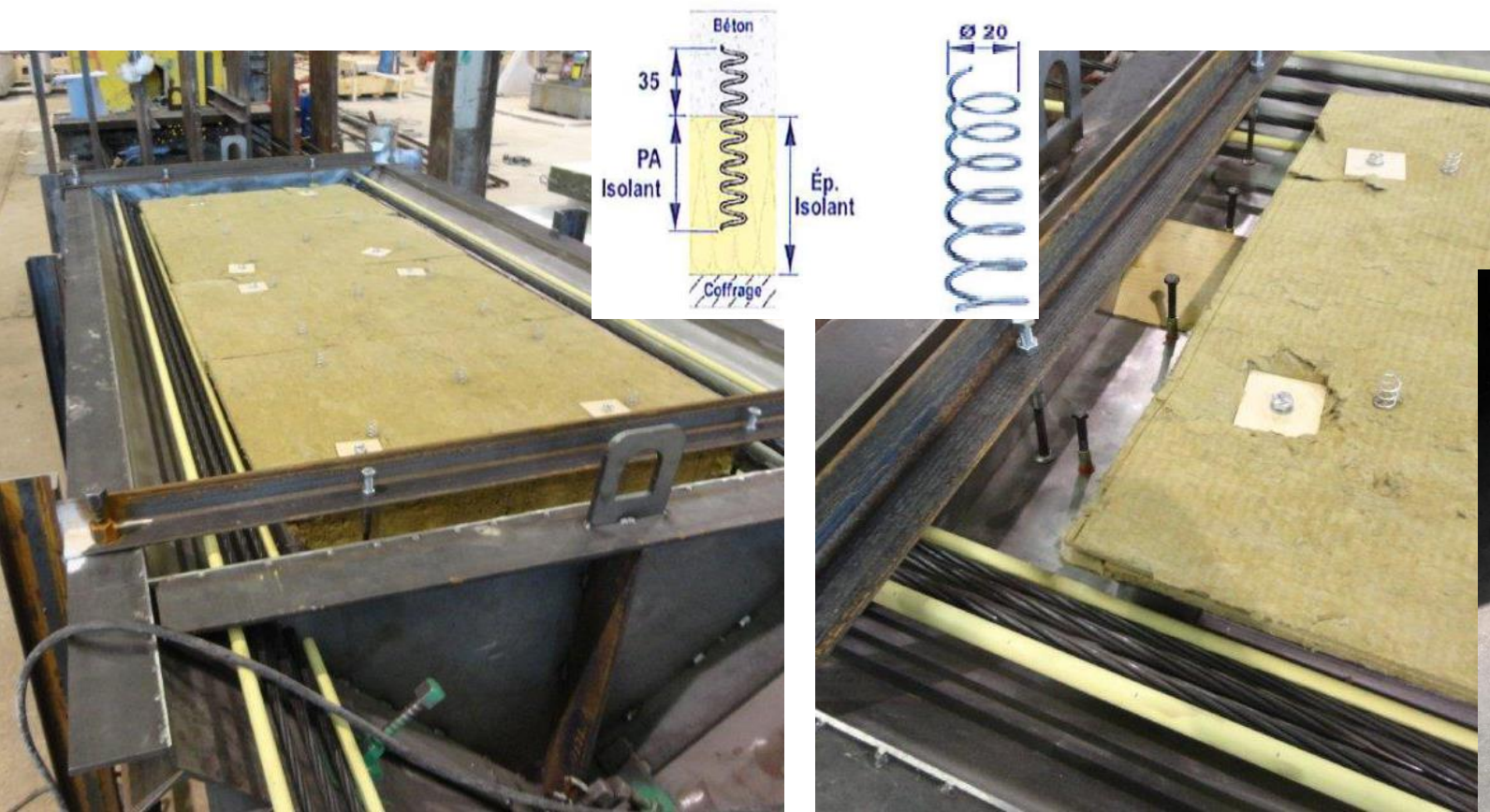
4 - Les Epreuves de Convenance

Définition d'un prototype, conformément aux recommandations AFGC de 2013 sur les BFUP, pour la détermination des coefficients K relatifs à l'orientation et à la répartition des fibres dans la structure.



Repérage de 3 séries d'éprouvettes 150x50x600 qui devront être sciées dans le prototype. S'agissant d'éléments minces, ces éprouvettes doivent être testées sans entaille, en flexion 4 points.





Mise au point du moule: sens de bétonnage compte-tenu des triangles d'abouts, gestion du retrait gêné, maintien des panneaux de laine de roche (poussée d'Archimède), forme et tenue mécanique de la tôle perforée en inox 316, fixation des panneaux au BFUP durci par ressorts métalliques en attente...





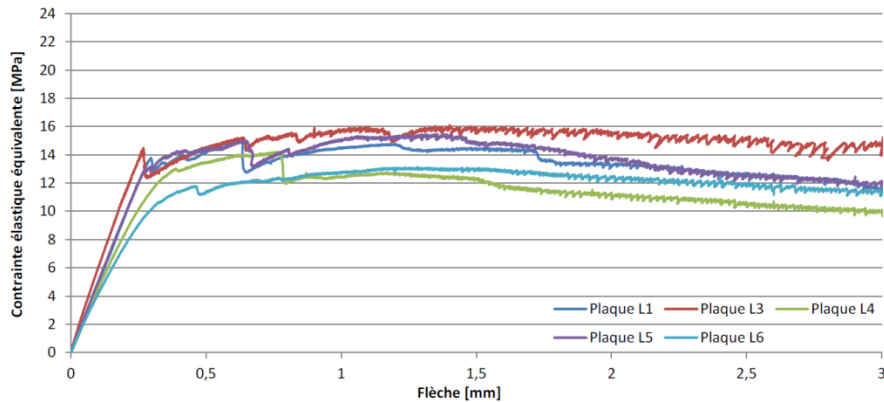
Confection d'une gâchée de 700litres fin 2013, pour le bétonnage du prototype au moyen d'une benne à béton suspendue à un pont roulant.



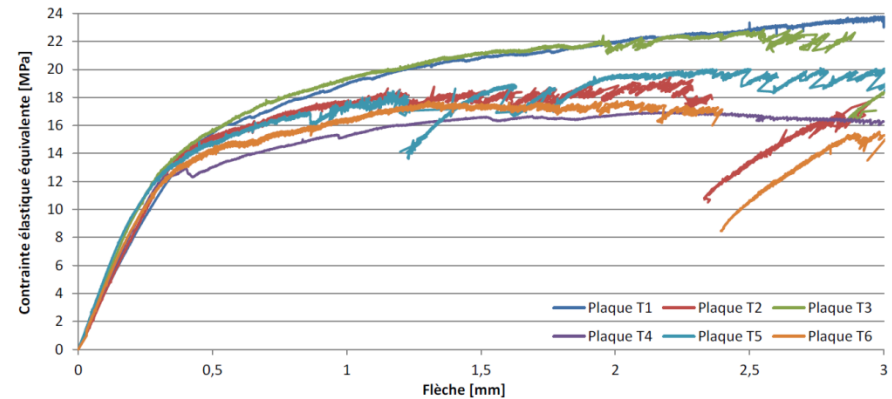
La mise en précontrainte du prototype (2x3 torons T15S) s'effectue lorsque le BSI atteint une résistance en compression de 100MPa (résistance obtenue à moins de 48heures). A 28 jours, cette résistance est de 170MPa.

Essais de flexion / Détermination des coefficients K

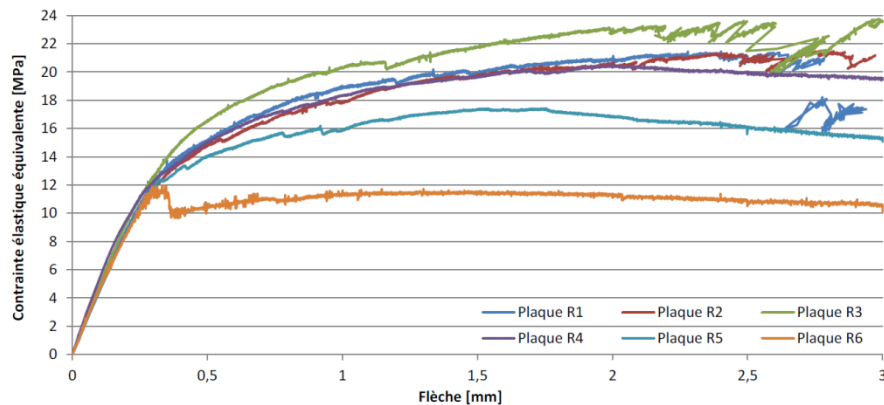
Flexion 4pts - Plaques minces de portée 540mm - Série L



Flexion 4pts - Plaques minces de portée 540mm - Série T



Flexion 4pts - Plaques minces de portée 540mm - Série R



Les coefficients K sont déterminés en comparant les résultats obtenus sur éprouvettes sciées à ceux obtenus sur éprouvettes de référence, bétonnées le même jour que le prototype.

	K_{global}	K_{local}
Série L	1.30	1.47
Série T	1.00	1.14
Série R	1.00	1.62
Projet	1.35	1.75



5 - La Préfabrication

- ◆ La préfabrication des 90 éléments en BSI ainsi que de la poutre-caisson en C40/50, a été réalisée par Hürks Beton dans son usine de Veldhoven (Pays-Bas).
- ◆ Cycle de préfabrication :
 - 1 poutre tous les 2 jours / moule
 - 2 moules soit au final 1 poutre / jour
- ◆ Résistance en compression du BSI à la mise en précontrainte: 100MPa.
- ◆ 9 familles de paralumes de formes différentes, et de longueur variant de 2.20m à 14.60m.
- ◆ 5 types de précontrainte: de 2 x 1T15S à 2 x 5T15S
- ◆ Tous les éléments ont été acheminés par camions depuis l'usine de préfabrication jusque sur le site de stockage de FOS à proximité du chantier à Marseille.



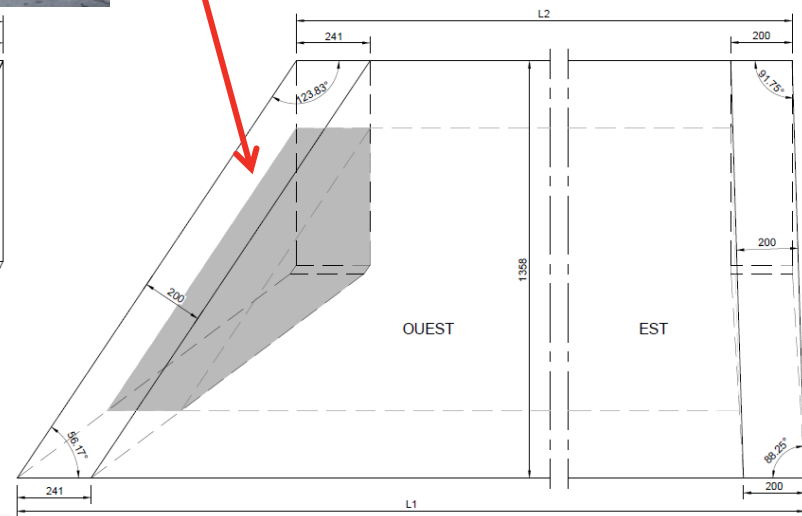
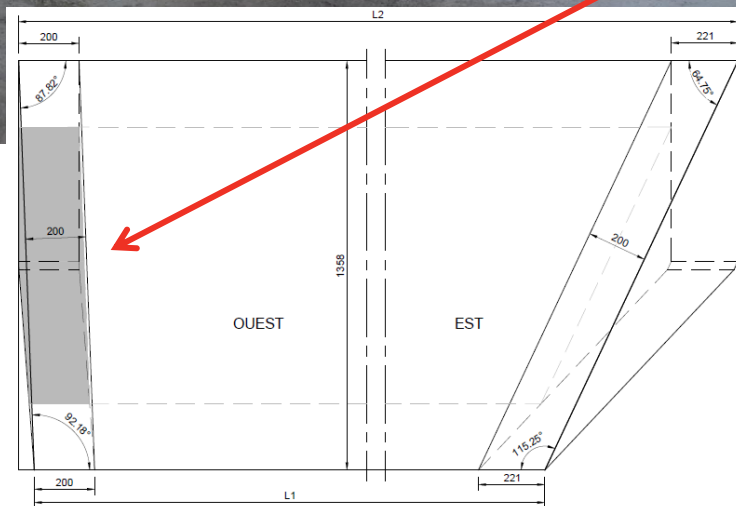
Préfabrication des paralumes





A la fin du bétonnage, chaque paralume est curé et taloché.

Après mise en précontrainte, chaque paralume est déplacé vers une zone de stockage de l'usine, pour la réalisation du 2e triangle d'appui, également en BSI.



Préfabrication de la poutre-caisson





6 - Le Chantier

Travaux préparatoires

Réalisation de l'ouverture dans le parapet et reconstitution du sommier d'appui de la poutre caisson



Réalisation des bossages d'appuis des paralumes sur les corniches existantes :

10 bossages / nuit

Réception des poutres et mise en peinture

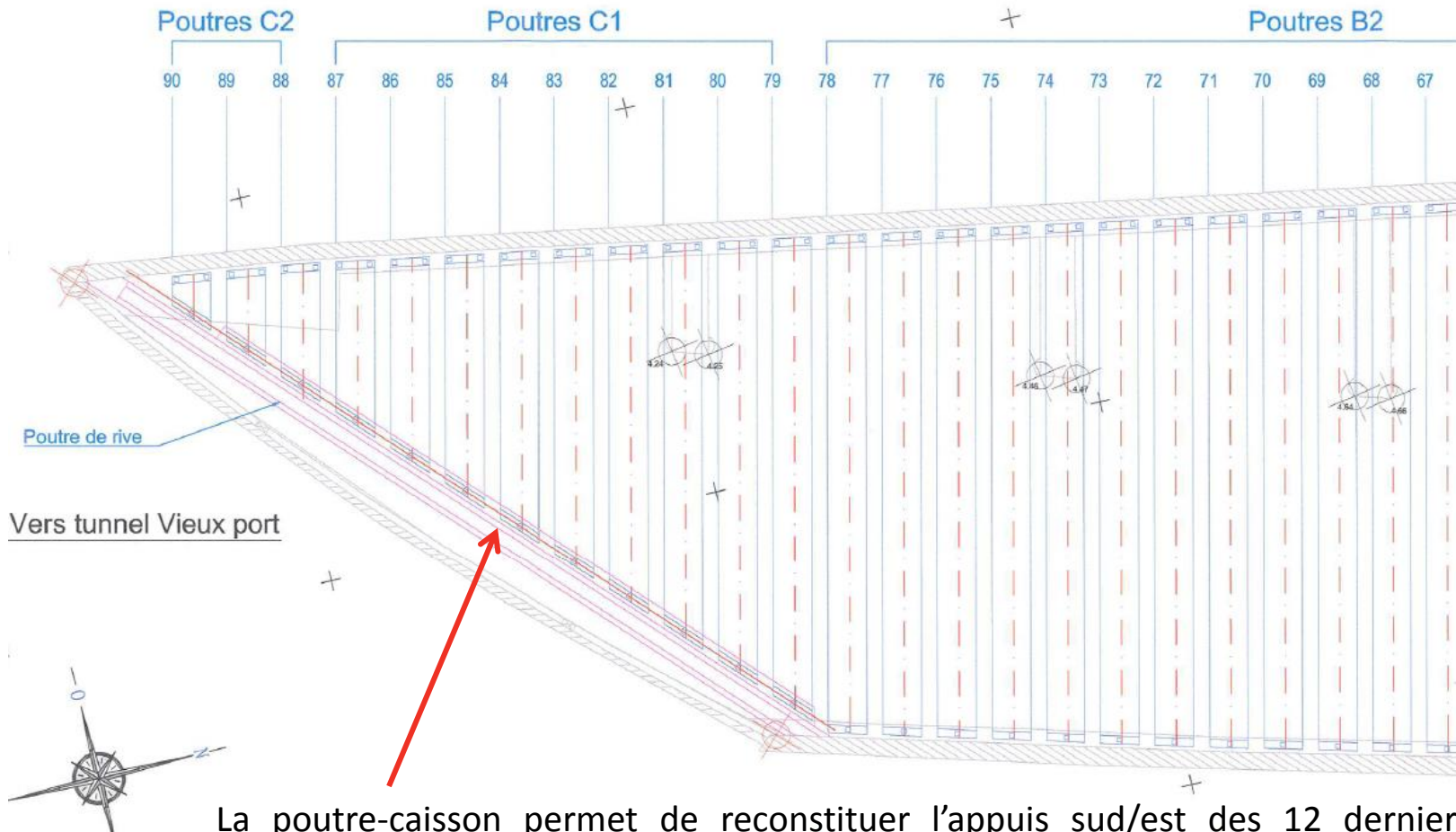
Les 90 paralumes ont été stockés sur le site Eiffage CM de Fos/Mer, afin de recevoir le traitement de finition correspondant au choix architectural.



Un léger ponçage de la surface libre de bétonnage est effectué avant l'application de la peinture anti-graffiti.

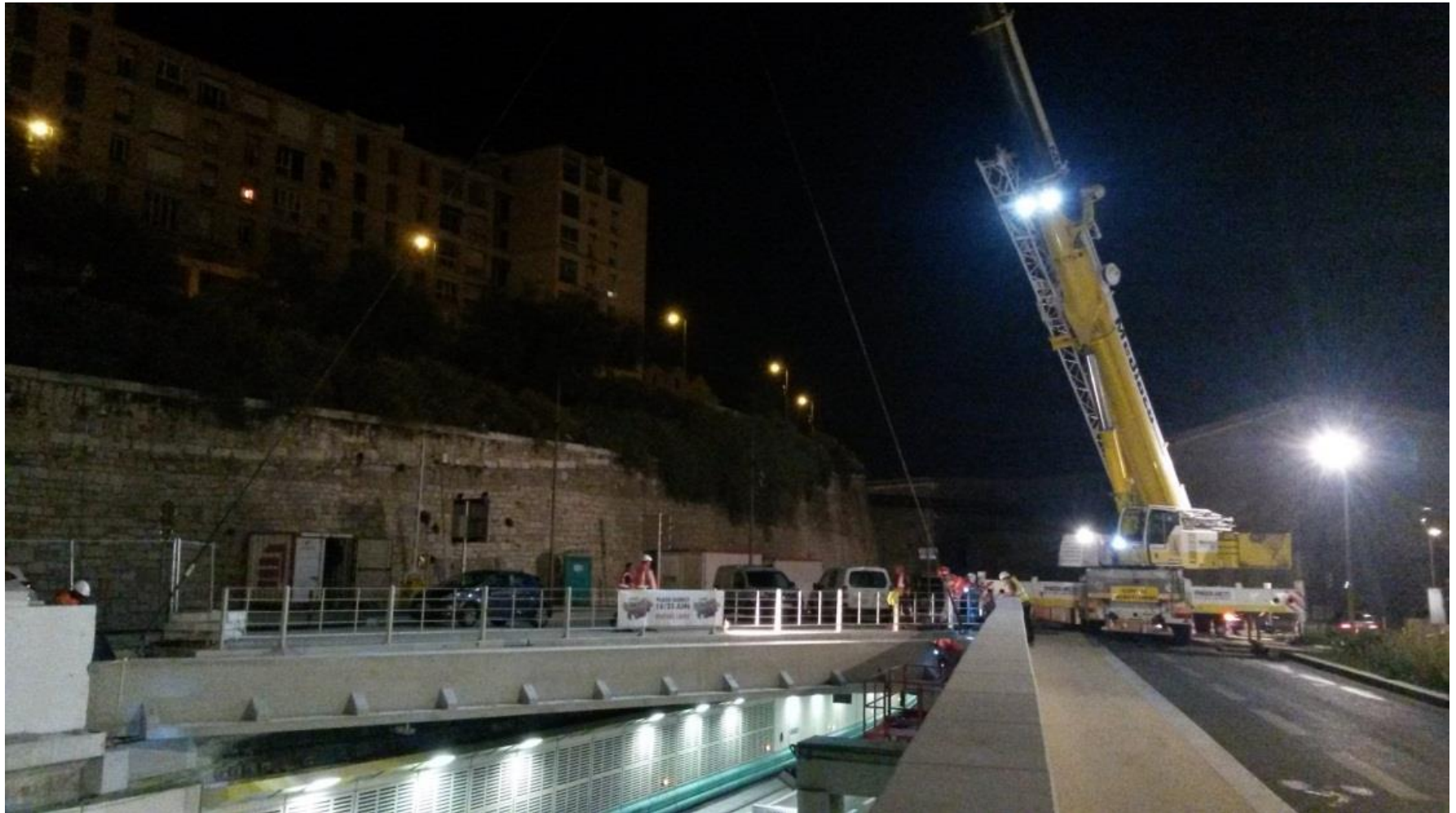
Pose après peinture des tôles inox perforées au-dessus de l'isolant acoustique.

Pose de la poutre-caisson



La poutre-caisson permet de reconstituer l'appui sud/est des 12 derniers paralumes en bout de trémie

Mise en place de la poutre caisson (longueur 22m) au moyen d'une seule grue automotrice de 200T, placée sur la chaussée supérieure. L'opération s'est déroulée de nuit, sous coupure de la circulation.

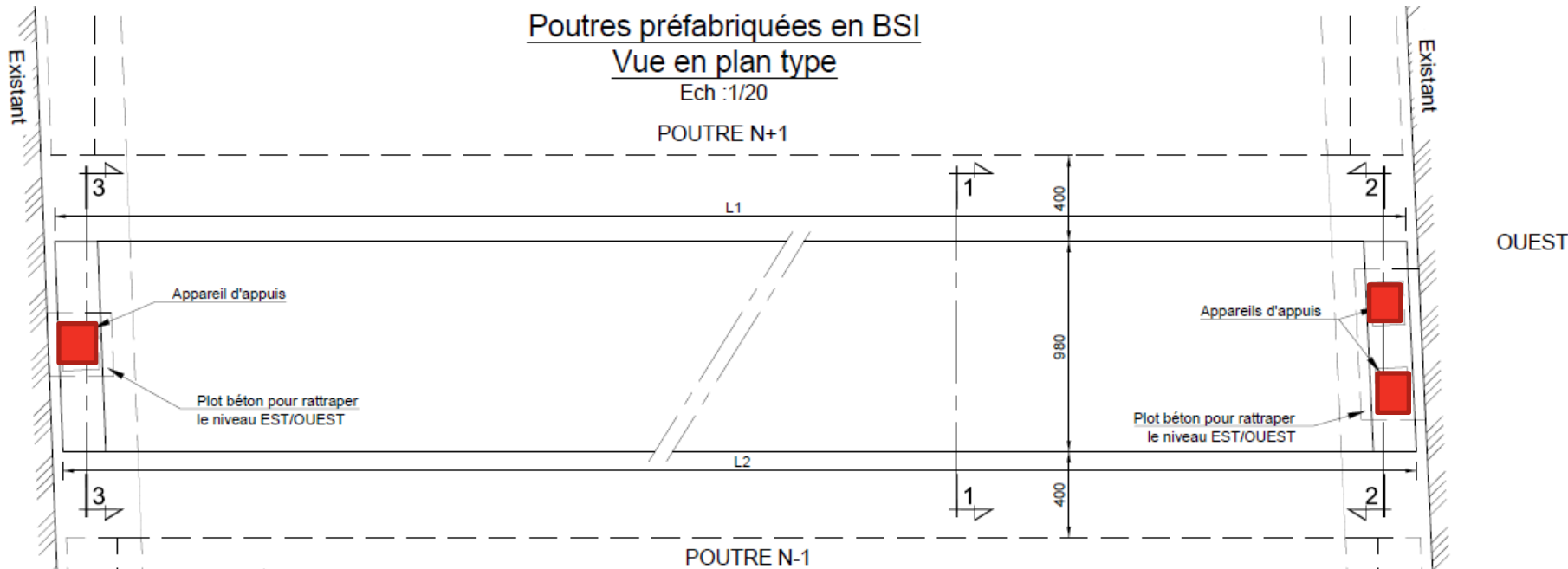


Pose des paralumes – Principe d'appuis

Chaque poutre repose sur 3 appuis néoprènes et est maintenue avec des cornières inox scellées dans la corniche existante (dispositif anti soulèvement)

**1 appui en néoprène
coté Est**

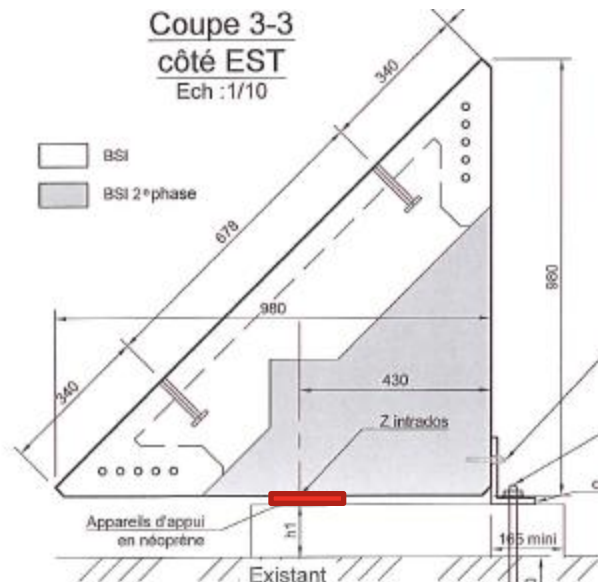
**2 appuis en néoprène
coté Ouest**



Pose des paralumes – Principe d'appuis

Chaque poutre repose sur 3 appuis néoprènes et est maintenue avec des cornières inox scellées dans la corniche existante (dispositif anti soulèvement)

1 appui en néoprène coté Est



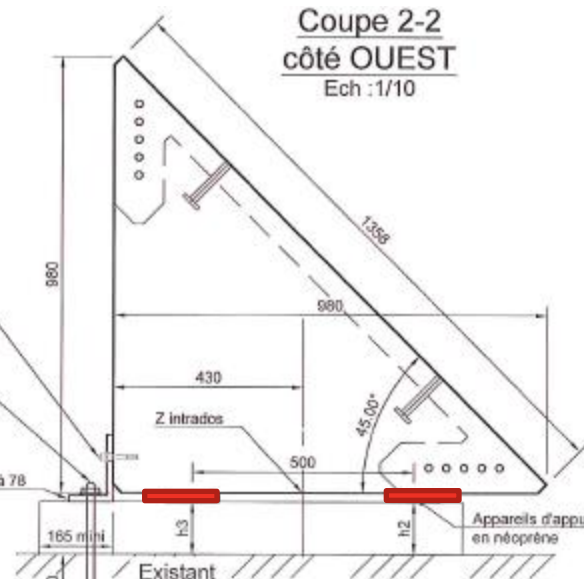
2 appuis en néoprène coté Ouest

1 cheville TRIGA Z-A4 Version Vis / V10-15/25
longueur scellement = 70 mm
profondeur de perçage = 105 mm

2 tiges filetées Maxima M16
inox A4 (ou équivalent)
longueur scellement = 150 mm dans existant
longueur max = 340 mm à couper sur place
Ø perçage = 18 mm

cornière type 1 poutres 01 à 78

cornière type 2 poutres 01 à 78
cornière type 1 poutre 90



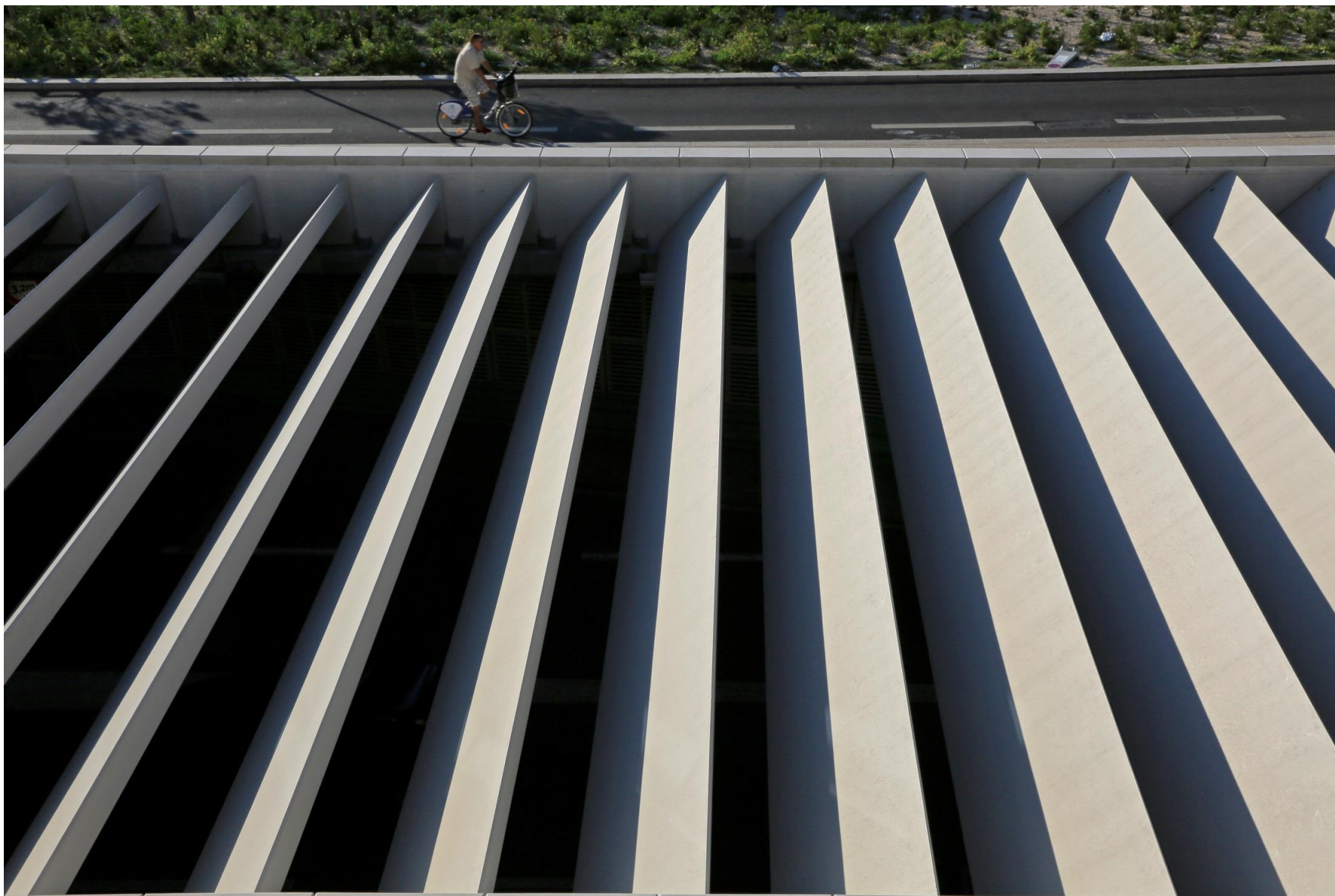
Mise en place des paralumes au moyen d'une grue automotrice 70T, placée sur la chaussée supérieure neutralisée chaque nuit. L'équipe de pose est constituée d'un chef de chantier et 4 opérateurs.



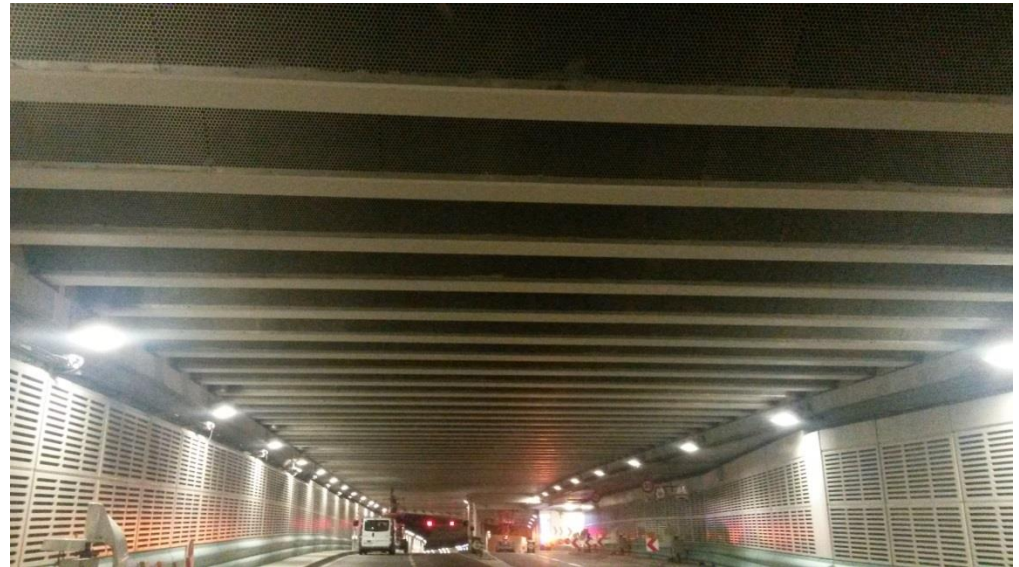
Cadences et moyens matériels :

- 10 poutres / nuit
- 1 grue 70T
- 1 jeu d'élingues spécifiques 15m
- 5 remorques
- 2 camions - tracteurs









Merci de votre attention