



innovation dans le génie civil au service de la construction

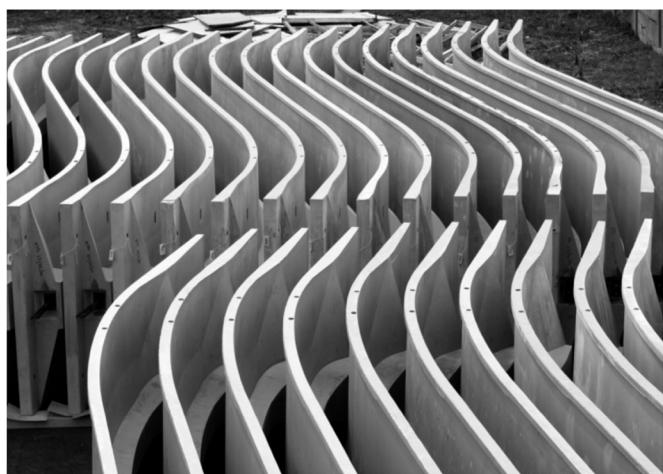
# USINE SEINE AVAL DERU - RÉALISATION DES COQUES EN BSI

**Gilles DELPLACE, Ziad HAJAR, Alain SIMON**

EIFFAGE TP - Direction Technique

## 1. INTRODUCTION

Le projet de mise aux normes de la station d'épuration Seine Aval DERU, réalisé dans le cadre d'un marché de conception-réalisation, et confié par le SIAAP au groupement (EIFFAGE TP – OTV – LWA – BG Ingénieurs Conseil), s'appuie principalement sur la technologie de biofiltration BIOSTYR® et sur le traitement BIOSEP®.



*Figure 1 : Stockage des coques*

La capacité de traitement de l'usine Seine Aval sera ainsi portée à 1700000 m<sup>3</sup> d'eau par jour.

La couverture des bassins, d'une surface totale de 3500m<sup>2</sup>, est réalisée par la mise en place de 180 coques préfabriquées précontraintes par post-tension en BSI®, le béton fibré à ultra hautes performances (BFUP) développé par EIFFAGE TP.

Le choix de ce matériau ultra performant a été retenu par l'architecte Luc WEITZMANN pour sa plastique minérale et son extrême résistance, qualités permettant de dégager



*Figure 2 : Vue d'ensemble*



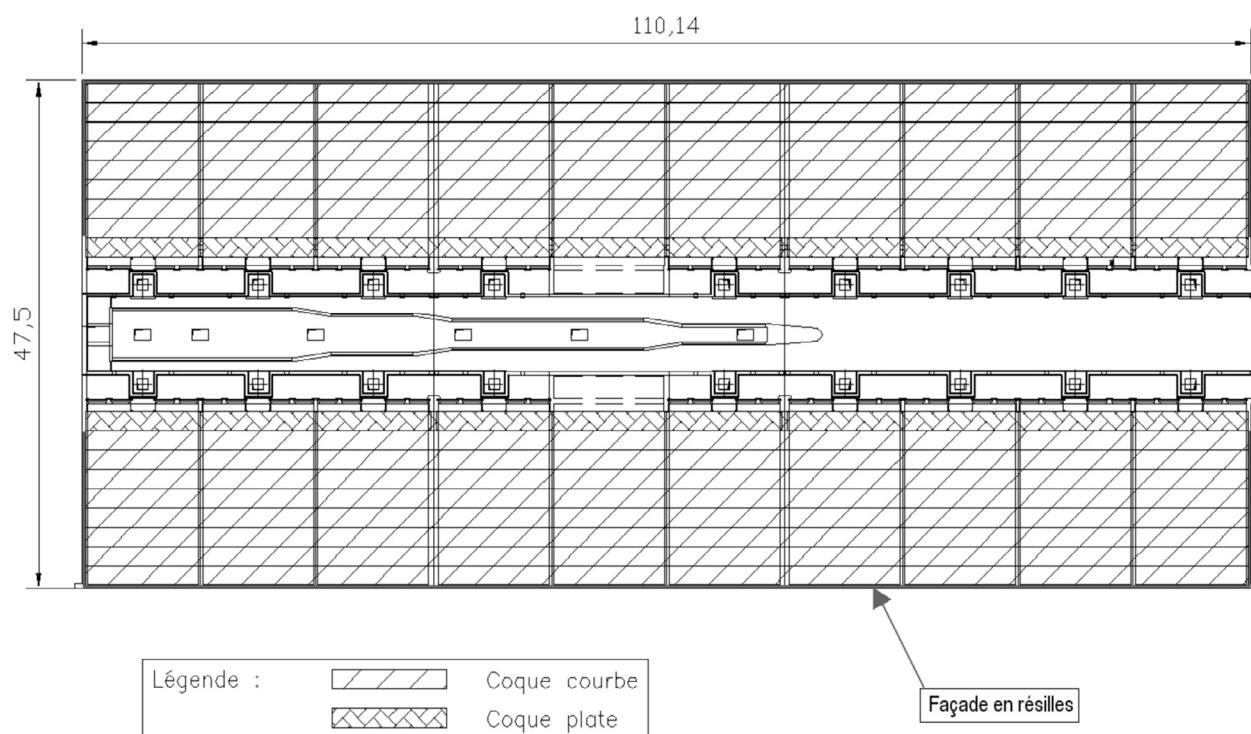


une structure d'une grande finesse et à forte valeur esthétique, tout en offrant une très bonne résistance en milieu agressif, qualité notable puisque le ciel gazeux des BIOS-TYR® est chargé en H<sub>2</sub>S.

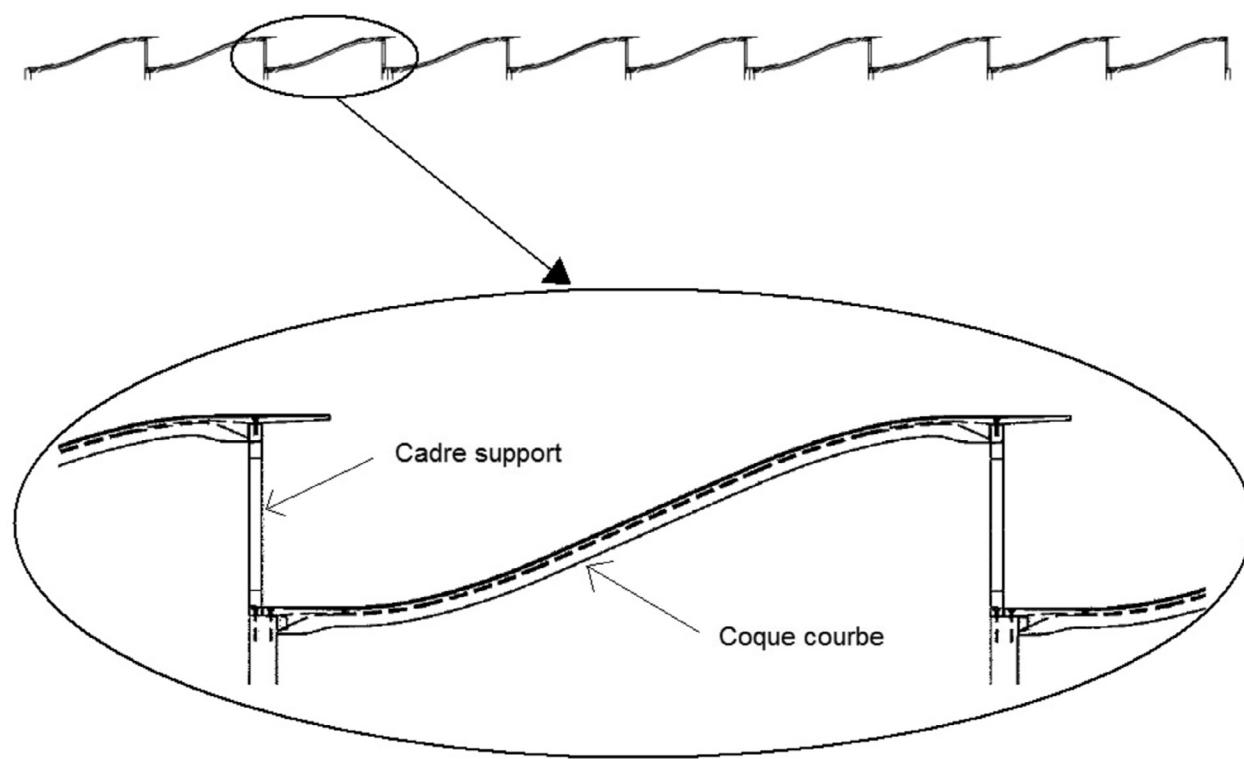
Le présent article décrit la conception détaillée de cette structure aérienne en BFUP constituée de 160 coques courbes en forme de vagues, de 20 coques plates, de 80 cadres supports ainsi que des résilles habillant la façade.

## 2. PRÉSENTATION GÉNÉRALE

La couverture des bessins est constituée de 260 éléments préfabriqués, dont 160 coques courbes, 20 coques plates et 80 cadres supports pour les coques courbes. Ces éléments sont préfabriqués et précontraints par post-tension (à l'exception des cadres) en atelier, avant d'être envoyés puis posés sur le site de Seine Aval.

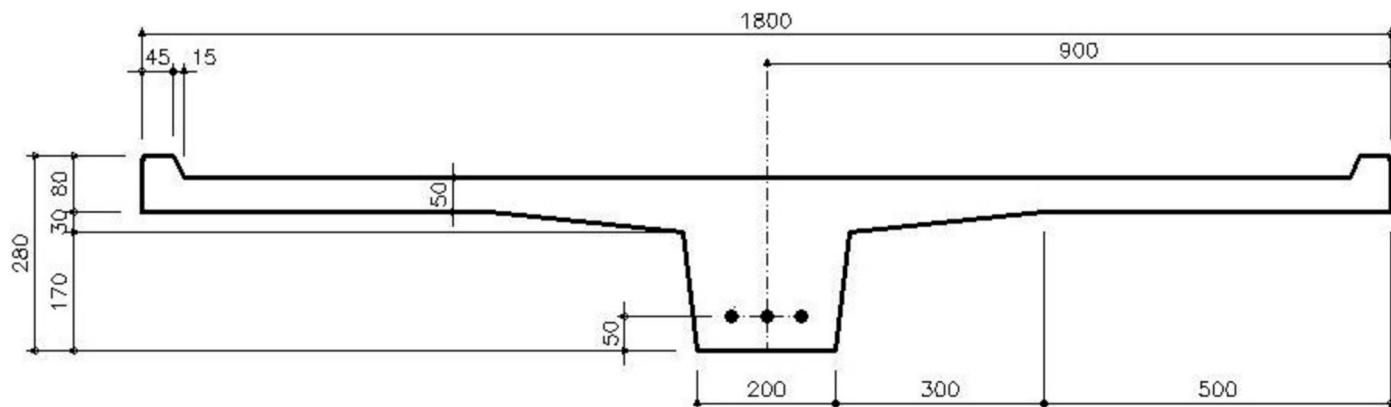


*Figure 3 : Vue en plan de la couverture du bâtiment BYOSTYR®*



*Figure 4 : Vue en élévation du bâtiment BYOSTYR*





**Figure 5 : Section transversale de la coque courbe**

## 2.1. Les coques courbes

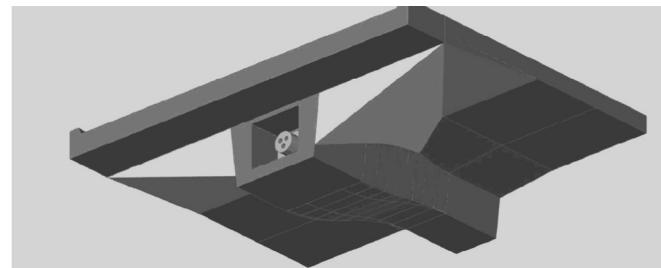
Les coques courbes présentent une dimension en plan de  $11,83 \times 1,8 \text{ m}^2$  et leur profil longitudinal prend une forme de vague de 2,81m d'amplitude. Leur schéma statique est celui d'une poutre isostatique de 10,63 m de portée.

La section courante est constituée d'une dalle nervurée, avec un hourdis mince de 5 cm d'épaisseur, et une nervure centrale de 25 cm de hauteur totale, soit un élancement de 1/42, et une épaisseur équivalente de 81 mm soit  $L/\text{ep} = 131$ .

La grande finesse de la section est rendue possible grâce aux performances mécaniques du BFUP et notamment sa ductilité en traction qui permet de s'affranchir d'armatures passives.

La précontrainte est constituée d'un câble 3T15S en monotorons gainés graissés, dont le tracé suit la forme courbe de la coque. La mise en tension s'effectue à l'extrémité inférieure de la coque, l'ancre supérieur étant de type passif noyé dans le BSI®. La précontrainte est mise en œuvre en usine par le département de précontrainte d'EIFFAGE TP – DS1.

La morphologie complexe des zones d'about des coques courbes, intégrant les consoles d'appui, la zone d'introduction de la précontrainte, est le fruit d'une étude réalisée conjointement par EIFFAGE TP - STOA et l'architecte LWA. Le traitement particulier de cette zone vise à assurer un raccord esthétique entre le bloc d'ancre de la précontrainte et la section courante de la coque, tout en garantissant la diffusion des efforts concentrés et une transmission correcte des réactions d'appui.



**Figure 6 : Vue 3D de la zone d'about**

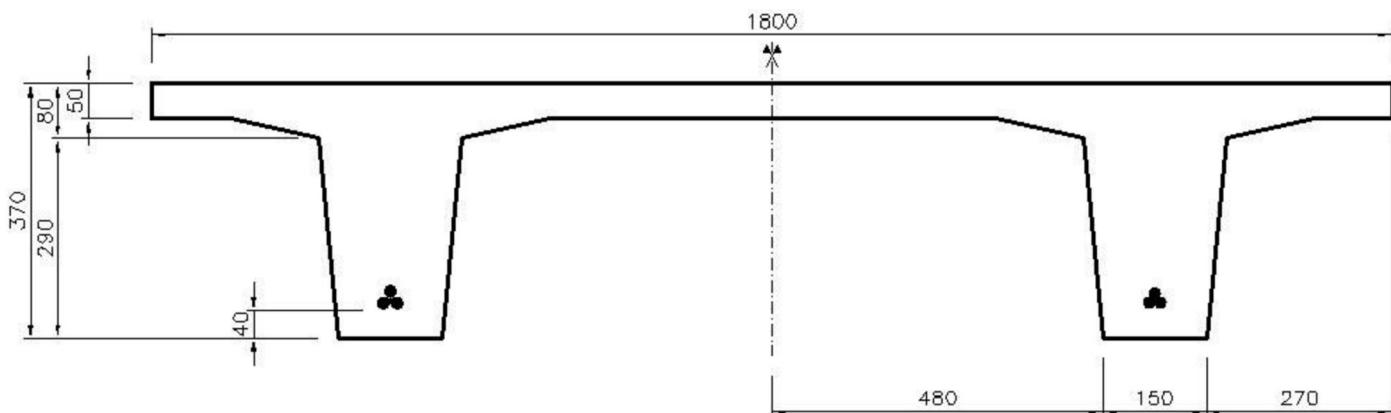
## 2.2. Les coques plates

Les coques plates présentent les mêmes dimensions en plan que les coques courbes, avec un schéma statique de poutre bi-appuyée de 10,64 m de portée.

Les coques plates doivent supporter des charges d'exploitation (circulation et engins d'entretien) sensiblement plus élevées que les coques courbes. Leur section transversale est une dalle bi-nervurée de 37 cm de hauteur, tout en conservant un hourdis de 5 cm.

Cette forme de section courante permet de conserver une grande légèreté de la structure, avec une épaisseur équivalente de la section de 11,9 cm.

Chacune des deux nervures est précontrainte à l'aide d'un câble 3T15S en monotorons gainés graissés



**Figure 7 : Section courante**



### 2.3. Les cadres supports

Les coques courbes sont appuyées en leur extrémité supérieure sur des cadres supports en BSI®. Il s'agit ici encore d'éléments préfabriqués, mais dans ce cas sans aucune armature active ni passive. Les montants verticaux de ces cadres présentent une section transversale de 12x18cm<sup>2</sup> pour une hauteur libre de 2,8m.

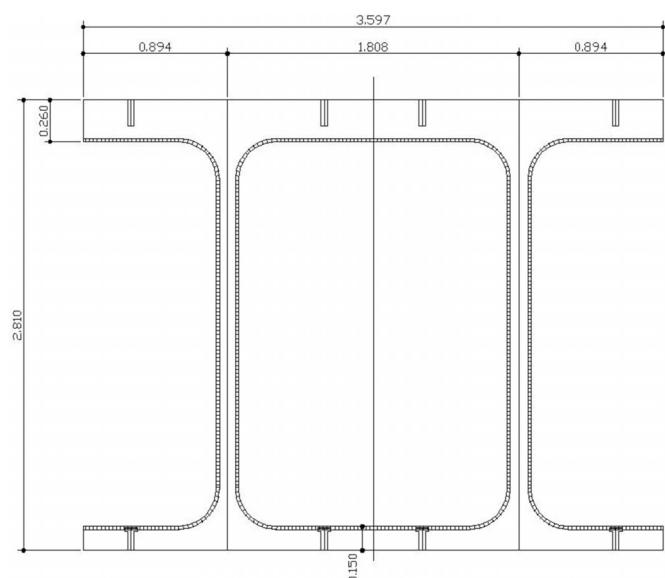


Figure 8 : Elévation des cadres

### 2.4. La façade en résille

La façade du bâtiment des BIOSTYR® est constituée par une résille en BSI® blanc. Les montants verticaux qui forment la résille sont solidarisés à leurs extrémités par deux poutres. La poutre inférieure est appuyée directement sur le voile périphérique des bassins, tandis que la poutre de couronnement est maintenue par les cadres supports des coques courbes, formant ainsi une poutre de 10,63m de portée destinée à reprendre les actions horizontales agissant sur les montants.

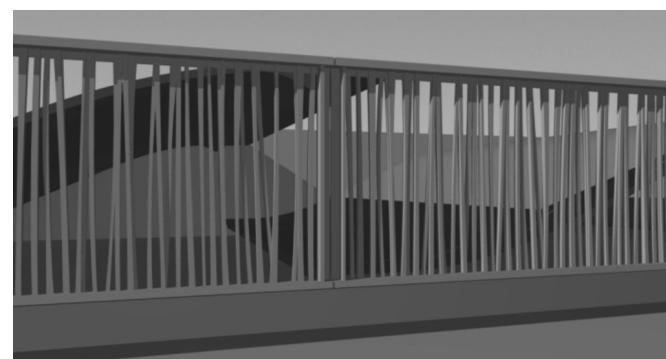


Figure 9 : Vue architecturale des résilles

Pour simplifier leur préfabrication et leur transport, chaque cycle de résilles est fractionné en trois panneaux préfabriqués à partir d'un contre-moule unique. Les panneaux sont solidarisés entre eux au niveau de la poutre de couronnement par des assemblages métalliques destinés à assurer la transmission des moments de flexion induits par les actions horizontales.

### 3. LE MATERIAU BSI

Le BSI®, béton fibré à ultra hautes performances (BFUP), est un matériau développé et breveté par le groupe EIF-FAGE. Parmi les références d'ouvrages réalisés avec ce matériau, on notera les deux ponts innovants de Bourg-lès-Valence, l'auvent de la barrière de péage du viaduc de Millau, et les ponts routiers de Pinel et de Sarcelles.

Les caractéristiques de la formule du BSI® retenue pour la réalisation de la couverture BIOTYRS® sont décrites dans le tableau en page suivante.

Le diagramme ci-contre illustre la loi de comportement du matériau BSI, qui permet la prise en compte d'une certaine résistance en traction. On notera que le comportement post-fissuration en traction dépend non plus des déformations mais de l'ouverture des fissures.

C'est pour ses caractéristiques mécaniques et physiques exceptionnelles que le BSI® a été choisi pour réaliser les

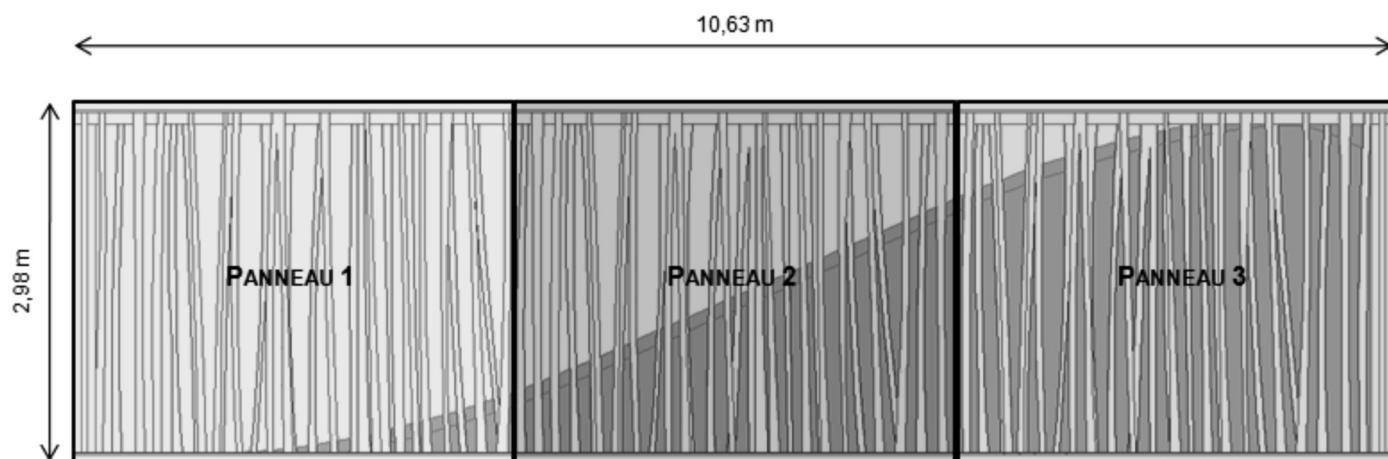
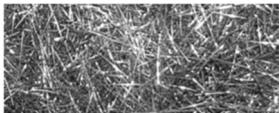


Figure 10 : Principe de décomposition de la résille en panneaux

### Constituants du BSI® pour 1m<sup>3</sup>

Prémix (*) :	2296 kg
Super-plastifiant	39,6 kg
Eau	185 kg
Fibres métalliques (L <sub>f</sub> =20mm ; φ = 0,3mm)	195 kg

Les fibres métalliques sont droites et constituées d'acier à très haute limite d'élasticité



\* Le prémix est un pré-mélange de tous les constituants secs (ciment, fumée de silice, sables et granulats).

### Caractéristiques mécaniques du BSI®

Densité	ρ	2,75 t/m <sup>3</sup>
Résistance caractéristique en compression à 28j	f <sub>c28</sub>	165 MPa
Résistance caractéristique en traction à 28j de la matrice	f <sub>t28</sub>	8,8 MPa
Résistance caractéristique en traction à 28j du matériau fibré	σ <sub>bt-28</sub>	8,04 MPa
Valeur moyennée du module d'Young à 28j	E <sub>i28</sub>	57 GPa
Retrait endogène à l'infini	ε <sub>re</sub> ;	550 μm/m
Retrait de dessiccation à l'infini	ε <sub>rd</sub> ;	150 μm/m
Fluage propre et de dessiccation (chargement à t1=48h)	K <sub>fl</sub>	1,00

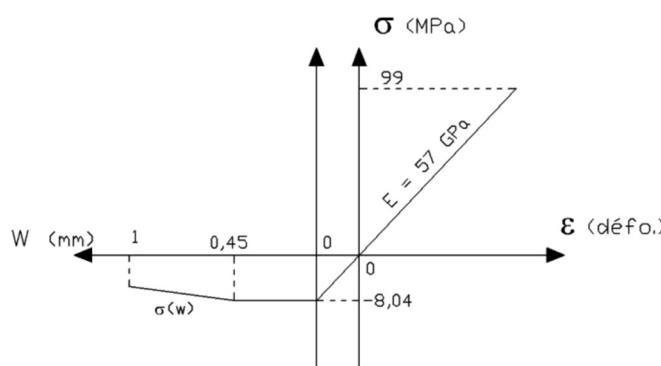


Figure 11 : Loi de comportement du BSI®

éléments préfabriqués, couverture et habillages décoratifs périphériques, des bassins BIOSTYR® :

- Sa résistance mécanique permet d'obtenir un élancement très important pour la structure de la couverture.
- La présence de fibres métalliques permet de s'affranchir de tout acier passif, tout en conservant une importante

ductilité. Il devient ainsi possible de réaliser des parois à rôle structurel extrêmement minces (5cm).

- Sa structure à pores fermés et sa résistance aux agents agressifs offre à ce matériau une grande pérennité, même dans des milieux agressifs et acides.
- La forte proportion de fines (fumée de silice notamment) offre une très bonne qualité de parement.

## 4. LES ÉPREUVES DE CONVENANCE

L'application des recommandations provisoires AFGC-SETRA relatives aux BFUP, engendre un certain nombre d'essais préliminaires visant à vérifier que les matériaux et matériaux utilisés sont conformes aux hypothèses de l'étude. Dans ce cadre, un élément témoin représentatif de l'ouvrage réel a été réalisé dans le but de valider les moyens et méthodes de bétonnage, et de mesurer le coefficient K relatif, à la dispersion sur l'orientation de fibres.



Figure 12 : Prototype après prélèvement des prismes

Dans le cas des coques courbes, les prismes prélevés dans l'élément témoin, ont permis de vérifier le comportement du matériau dans deux zones caractéristiques de la structure, dont on présente ci-dessous le principe de prélèvement des prismes.

Les valeurs obtenues pour le coefficient K à l'issue des essais de traction par flexion sont données ci-dessous :

	Section courante	Consoles d'appui
Effets globaux	K = 1,20	K = 1,35
Effets locaux	K = 1,65	K = 1,55



### Section courante

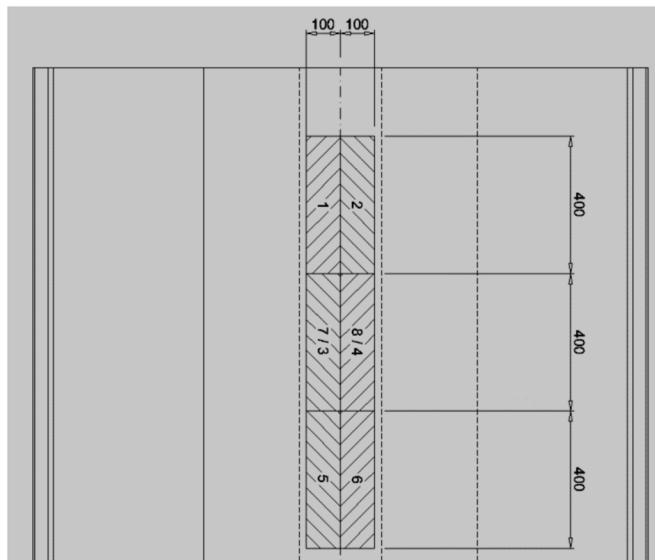
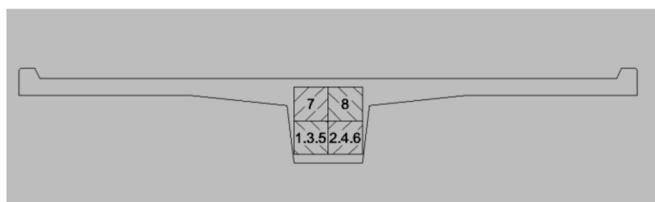


Figure 13 : Prismes d'épreuve en zone courante

### Consoles d'appuis

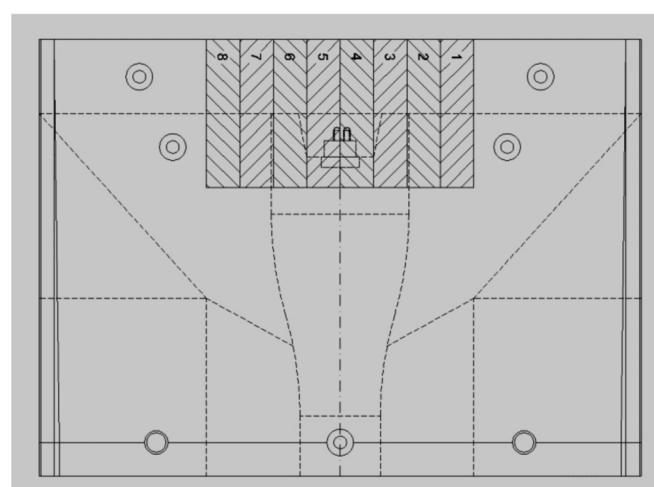
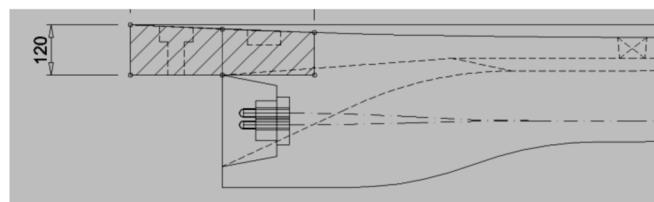


Figure 14 : Prismes d'épreuve sur la console d'appui

## 5. LES ÉTUDES D'EXÉCUTION

Les justifications des éléments en BSI® sont basées sur les recommandations provisoires AFGC-SETRA relatives aux BFUP.

Dans le cas des coques, la structure étant précontrainte exclusivement dans le sens longitudinal, les principes de justification diffèrent selon que l'on s'intéresse au fonctionnement transversal ou bien longitudinal de la structure. Dans le sens longitudinal, les justifications sont menées en référence à la classe II du BPEL. Les contraintes normales à l'ELS sont limitées à la résistance en traction de la matrice (Tableau 1).

Les sollicitations résistantes ultimes sont calculées en considérant la loi caractéristique de comportement du matériau fissuré affectée du coefficient partiel de sécurité  $\gamma_{bf} = 1,3$ .

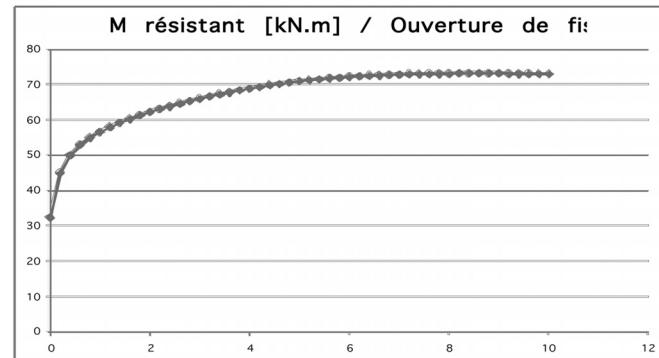


Figure 15 : Moment résistant de la section courante

Dans le sens transversal, les efforts étant repris entièrement par le béton fibré, il est fait référence à la classe IV des recommandations BFUP, qui permet la prise en compte du

<b>Phases provisoires</b>	_ Compression	$\sigma_{\max}$ [Mpa] =	32,17	< 81
	_ Traction	$\sigma_{\min}$ [Mpa] =	-4,98	> -7 Face supérieure
<b>ELS Rare</b>	_ Compression	$\sigma_{\max}$ [Mpa] =	25,61	< 99
	_ Traction	$\sigma_{\min}$ [Mpa] =	-6,19	> -8,8 Face inférieure

Tableau 1 : Coques courbes - contraintes normales aux ELS





comportement en traction du matériau, même en l'absence d'armatures passives ou actives.

Dans les zones d'about, les coques courbes ont la particularité de ne pas être directement appuyées sur leur nervure. Elles se terminent en chacune de leurs extrémités par une console non précontrainte, correspondant à un simple épaissement du hourdis de 50 à 94 mm.

Cette disposition, particulière de par l'absence totale de tout ferraillage dans une zone critique, s'est révélée nécessaire en raison de la faible émergence des bassins et de la difficulté de réaliser un crénelage des voiles supports en béton armé. Elle est rendue possible par la prise en compte de la contribution mécanique des fibres métalliques du BSI®. La justification de la console intègre une modélisation aux éléments finis de la zone d'about. Cette disposition a en outre été validée à l'aide des essais en laboratoire sur des échantillons prélevés dans un prototype de la coque, dans le cadre des épreuves de convenance.

L'absence de fretage dans les zones d'introduction de la précontrainte réalisé a été validée expérimentalement par un essai sur bloc d'ancrage en BSI® réalisé en laboratoire. Cet essai a montré un coefficient de sécurité de l'ordre de 3 sur la rupture du bloc d'ancrage.

## 6. PRÉFABRICATION DES ÉLÉMENTS EN BSI®

### 6.1. Les coques courbes

Le comportement auto-plaçant du BSI®, associé à la forme de la coque ainsi qu'au souhait de l'architecte d'obtenir une finition de qualité sur les deux faces du hourdis, excluaient la solution du coulage à plat. C'est pour cette raison que l'élément est bétonné verticalement, sur tranche.

Vu le nombre important de réemplois du moule et la précision de géométrie requise, un moule métallique a été réalisé (Figure 16).

Le bétonnage est réalisé sans vibration ni étuvage. Le démoulage s'effectue dès que la résistance sur cylindre atteint 35 MPa. Cette résistance est obtenue après 22h pour un bétonnage par temps froid. Par température supérieure ou égale à 20°C la résistance atteint 60 MPa dès 20h, ce qui permet un cycle de bétonnage quotidien.



Figure 16 : Coffrage métallique des coques courbes

La résistance du BSI® au démoulage est suffisante pour assurer la manutention de la coque jusqu'à son lieu de stockage. La précontrainte est appliquée sur le site de production, dans la configuration verticale de la coque. La résistance en compression requise pour la mise en tension est de 130 MPa.



Figure 17 : Manutention après décoffrage

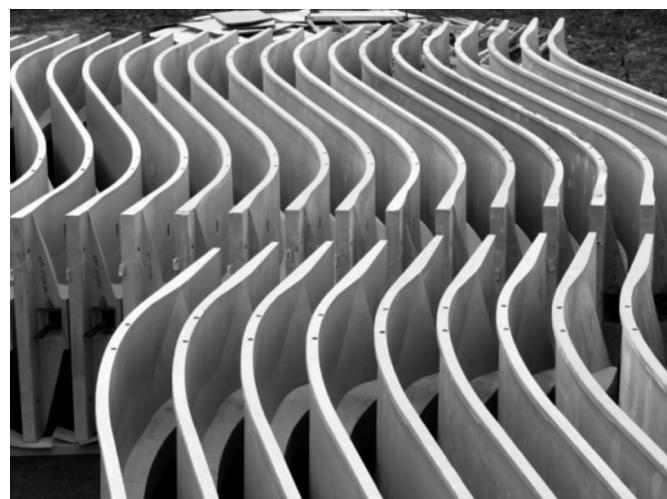


Figure 18 : Stockage avant mise en tension

### 6.2. Les coques plates

Les coques plates sont coulées à plat, mais à l'envers, compte tenu de la face circulée qui est matricée, puis retournées au moyen d'un basculeur. Le décoffrage et le retournement sont effectués dès lors que la résistance en compression atteint la valeur de 50 MPa.

En phase de stockage, les appuis sont disposés à L/6 des extrémités de la coque. Avant la mise en tension, deux appuis complémentaires sont calés sous les extrémités de la coque. Sous la déformée due à l'application de la précontrainte, les appuis provisoires de stockage sont déchargés au profit des appuis d'extrémités. La mise en tension peut être réalisée dès que la résistance en compression atteint la valeur de 135 MPa.



**Figure 19 : Coque plate**

### 6.3. Les résilles

Les différents panneaux de résille constituant la façade du bâtiment BIOSTYR® sont réalisés à partir d'un contre moule unique, sur lequel deux moules en polyuréthane ont été modelés. La réalisation des différents panneaux de résilles est rendue possible en positionnant des arrêts de bétonnage à des cotes prédéterminées dans les moules en polyuréthane.



**Figure 20 : Décoffrage d'une résille**

Le décoffrage peut être réalisé dès que la résistance en compression du BSI® atteint la valeur de 75 MPa.

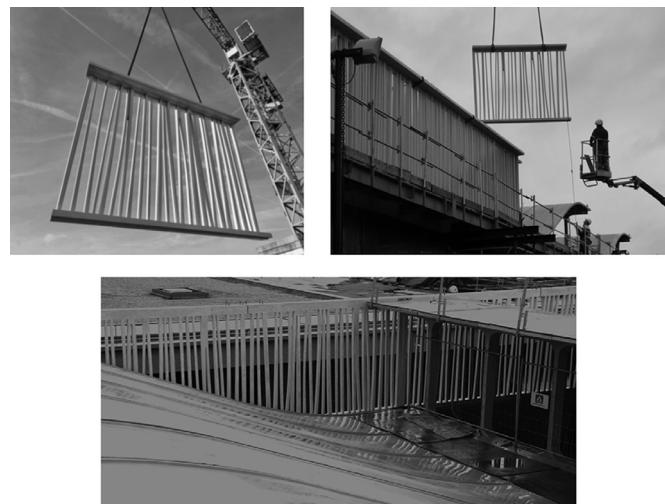
## 7. POSE DES ÉLÉMENTS PRÉFABRIQUÉS

Les coques courbes sont transférées sur chantier par camion, où elles sont retournées en position horizontale grâce à un basculeur, avant d'être posées à la grue, équipée d'un palonnier.



**Figure 21 : Phases provisoires des coques courbes sur chantier**

Les coques plates sont transportées à plat dans le sens de pose. Les cadres supports et les résilles sont transportés à plat puis redressés sur chantier au moyen d'une sangle de levage fixée autour de leur poutre supérieure.



**Figure 22 : Phases provisoires des résilles sur chantier**

## 8. CONCLUSION

Après plusieurs réalisations marquantes, les BFUP conquièrent peu à peu de nouveaux territoires en permettant aux architectes d'imaginer de nouvelles formes de structures.

La réalisation de la couverture des bassins BIOSTYR®, à l'aide de coques en BSI constitue une référence intéressante, démontrant que le BFUP offre des nouvelles solutions, alliant légèreté, esthétique et durabilité.



**Figure 23 : Couverture des cuves BIOSTYRS® en coques BSI®**