

LE MÉMORIAL INTERNATIONAL DE NOTRE-DAME DE LORETTE

Jérémie BURLOT, Richard PETIT

Eiffage TP



Photo 1 : Le Mémorial Notre Dame de Lorette – Karine WARNY

Introduction

Le Mémorial International de la Première Guerre Mondiale, baptisé « L'anneau de la mémoire » et construit près d'Arras sur le plateau de Notre-Dame-de-Lorette, abrite la plus grande Nécropole Nationale. Ce monument rend hommage à la fois aux vaincus et aux vainqueurs. C'est l'un des plus grands mémoriaux au monde, puisqu'il réunit 579 606 noms de soldats tombés sur le sol du Nord et du Pas de Calais, présentés par ordre alphabétique, sans distinction de nationalités, amis et ennemis d'hier mélangés.

La Région Nord – Pas de Calais a confié à Philippe PROST, Architecte, la conception du Mémorial International. La structure en forme d'ellipse est composée d'un anneau d'un périmètre de 328 m et se soulève en porte-à-faux sur près de 60m [Photo 2]. Suite à un appel d'offres en 2013, le lot 1 gros-œuvre étendu a été confié aux équipes d'Eiffage TP et d'Eiffage Energie.

Il a été inauguré par François Hollande, Président de la République le 11 Novembre 2014.



Photo 1 : Vue aérienne avec la nécropole Notre Dame de Lorette – Karine WARNY



Photo 2 : Détail de la typographie « Lorette », conçue par P. di Scullio © P. Vuillemin



Photo 3 : 11 Novembre 2014
le Président de la république dévoile la plaque commémorative, au centre de l'ouvrage (en arrière-plan, une partie de la zone précontrainte). © Présidence de la République.

Présentation de l'ouvrage

L'anneau d'une emprise de 129 m x 75 m est composé de 2 structures, une zone reposant sur le sol et une zone en poutre réalisée à l'aide de voussoirs préfabriqués en BSI® (BFUP d'Eiffage) assemblés par précontrainte par post-tension. L'ouvrage précontraint constitue une poutre courbe à 3 travées de 125 m de longueur totale dont la courbure minimale est de l'ordre de 27,00 m..

En plus de son aspect mémoriel, cet ouvrage est aussi une prouesse technique : c'est l'un des tous premiers ouvrages justifié suivant les Recommandations BFUP AFGC révisées en Juin 2013 ; sa partie précontrainte est réalisée en voussoirs préfabriqués à joints conjugués ; sa géométrie très particulière, avec des rayons en plan de 101 m et de 27.5 mètres seulement pour des portées de 28, 56 et 37 mètres, conduit à des fortes sollicitations de flexion – torsion peu intuitives. L'entrée du mémorial a également amené à des recherches sur l'emploi de bétons colorés. Le matériau principal, qui permet au constructeur d'atteindre l'élégance souhaitée par l'Architecte, est un Béton Fibré à Ultra-haute Performance : le BSI®.

L'ouvrage a été distingué par le Jury de l'Equerre d'Argent le 17 Novembre 2014, dans la catégorie « Culture, jeunesse et sports ».

La coupe transversale de l'ouvrage ci-jointe, dans la partie renforcée, permet d'identifier les différentes pièces constituant le Mémorial [Figure 1].

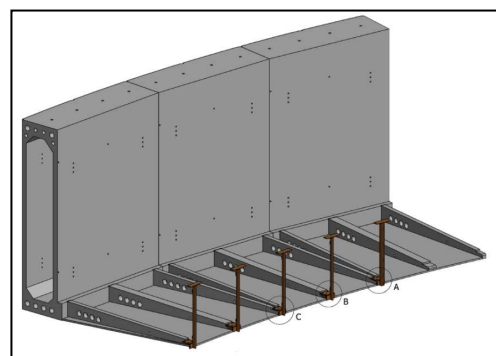
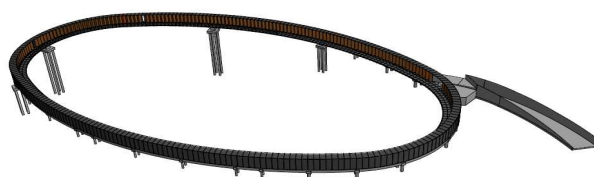
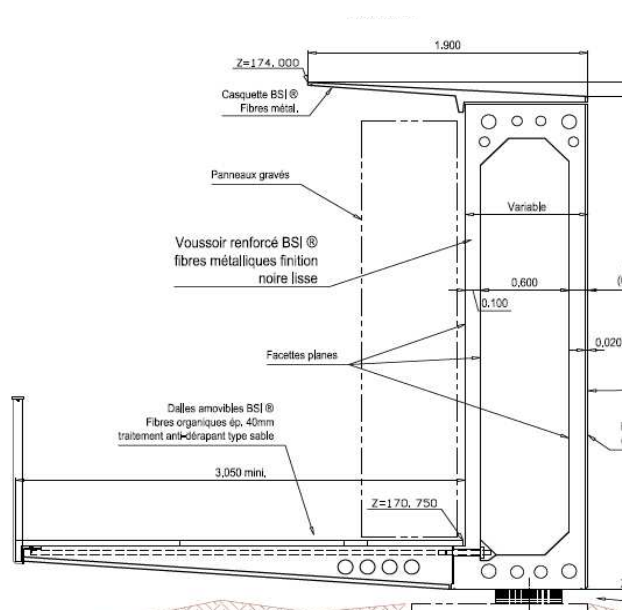


Figure 1 : Vue en coupe des voussoirs renforcés en zone précontrainte

Figure 2 : Présentation de la structure

1. Un matériau à l'épreuve du temps : le BSI®

Le Béton Fibré à Ultra-hautes Performances utilisé pour la réalisation des voussoirs préfabriqués de l'ouvrage, des dalles de sol et des éléments de couverture est le **BSI®** (Béton Spécial Industriel).

Le BSI® est régi par un brevet Eiffage déposé en 1998. Il est formulé à partir d'un mélange préparé dit « Prémix », d'eau, de superplastifiant et de fibres métalliques ou synthétiques suivant les utilisations.

Eiffage TP assure l'intégralité du suivi de la chaîne de production du BSI®.

1.1. CARTE D'IDENTITE DU BSI®

Tout BFUP présente une carte d'identité, répertoriant ses caractéristiques à prendre en compte pour les calculs justificatifs des structures, qui sont à valider par les épreuves de convenance et de contrôle.

La carte d'identité du BSI® a été établie selon les préconisations du document « Bétons fibrés à ultra-hautes performances – Recommandations » (SETRA-AFGC, révision juin 2013).

Caractéristiques à l'état frais		
Durée pratique d'utilisation	DPU	Jusqu'à 90 min
Etalement au cône DIN (sans secousse)	e (cm)	$58 \leq e \leq 68$
Teneur en air occlus	AO	$\leq 3.5\%$
Caractéristiques à l'état durci		
Densité	ρ	2.75 t/m^3
Résistance caractéristique en compression à 28 j	f_{c28}	165 MPa
Résistance caractéristique en traction à 28 j de la matrice	f_{t28}	- 8.0 MPa
Résistance caractéristique en traction à 28 j du matériau fibré	σ_{bt-28}	- 6.3 MPa
Valeur caractéristique du module d'Young à 28 j	E_{i28}	58 GPa
Coefficient de Poisson	ν	0.2
Valeur caractéristique du module de cisaillement	G_{i28}	25 GPa
Coefficient de dilatation thermique	α	$13 \mu\text{m/m}$
Retrait endogène à l'infini	$\epsilon_{re-\infty}$	$600 \mu\text{m/m}$
Retrait de dessiccation à l'infini	$\epsilon_{rd-\infty}$	$240 \mu\text{m/m}$
Fluage propre et de dessiccation (chargement à $t_1 = 7j$)	K_{fl}	1



Indicateurs de durabilité		
Porosité accessible à l'eau	< 5%	
Perméabilité à l'oxygène	< 10 ⁻²⁰ m²	
Coefficient de diffusion des ions chlorure	0.23 %	
Absorption capillaire	0.22 g/cm²	
Exemple de composition		
Prémix	2 296 kg	± 2 %
Superplastifiant	35 kg/m³	± 5 %
Eau de gâchage	195 kg/m³	± 2 %
Fibres métalliques	195 kg/m³	± 2 %

Tableau 1 : Carte identité BSI®

L'adjonction de fibres, métalliques ou polypropylène suivant le cas, confère au BSI® une résistance en traction. Cette propriété permet d'éviter le plus souvent la présence d'armatures passives, et donc d'optimiser fortement les épaisseurs de matériaux : les épaisseurs des pièces du Mémorial International sont de 2 cm seulement pour les dalles de sol, de 4 cm pour les voussoirs simples.

1.2. LA PRODUCTION DU PRÉMIX

Le Prémix est le mélange des matériaux granulaires secs du BSI® - tels que ciment, fumée de silice et granulats - avec une tolérance de 1 à 2 % sur chaque constituant. Ce critère, dicté dans le document « Bétons fibrés à ultra-hautes performances – Recommandations » (SETRA-AFGC, Révision Juin 2013), permet de s'assurer de la conformité du béton correspondant obtenu. Le concept de prémix permet aussi de s'affranchir des variations de teneurs en eau des granulats et de maîtriser la composition.

1.3. PLANNING DE FABRICATION

La fabrication du BSI® se fait en centrale à béton classique ; elle est automatisée.

Le malaxage des prémix, eau, superplastifiant et fibres dure environ 15 à 20 minutes.

Un des avantages du BSI® est sa capacité à monter très rapidement en résistance et **sans traitement thermique**. La valeur moyenne de résistance à la compression étant comprise entre 60 et 80 MPa après 18 heures, à une température entre 60 et 70°C. Il est donc possible de décoffrer tout type de pièces, même les plus fines, dès le lendemain d'un coulage.

Chaque voussoir [Photos 6&7] aura nécessité en moyenne 2.8m³ ; suivant la présence des différents bossages, leurs poids varient de 7 à 10 tonnes.

Les fabrications sont donc organisées sur le principe d'une pièce par moule et par jour. L'usine est équipée de sorte que la production soit possible tous les jours, à toute époque de l'année, sans contraintes d'intempéries. De plus, l'aire de stockage des éléments fabriqués est suffisamment grande pour produire à l'avance et gérer un stock en vue de livraisons « à la demande » du chantier selon son rythme de pose.

Chaque élément est répertorié et marqué avec un numéro propre et issu du calepinage méthode. Cela engage la livraison, la mise en place sur le chantier et la traçabilité des pièces pour le suivi qualité.

Les moules sont tous spécifiques, et de haute technicité, en métal, polyuréthane, et/ou bois. Leur réalisation est confiée à des professionnels spécialistes, et sensibilisés à la destination de leur confection. La durée moyenne de réalisation des coffrages est d'environ **6 à 8 semaines** à partir des plans définitifs des coffrages des pièces.

Dans le cadre du Mémorial International, la production journalière comprenait :

- 1 voussoir simple de rayon 27.54 m,
- 1 voussoir simple de rayon 101.08 m,
- 1 voussoir renforcé de rayon 27.54 m,
- 1 voussoir renforcé de rayon 101.08 m,
- 3 casquettes
- 9 dalles de sol
- 1 support de galerie renforcé

La production des éléments les plus nombreux, mais plus simples à réaliser, a duré environ 4 mois. Les voussoirs renforcés ont été fabriqués en 7 semaines.



Photo 4 : Noyau décintrable avec abouts polystyrène et acier © H. Abbadie



Photo 5 : Voussoir renforcé en position de conjugaison © H. Abbadie

Particularité architecturale : les voussoirs fenêtre. 2 voussoirs renforcés sont entièrement percés en leur centre pour permettre aux visiteurs de voir la plaine d'Artois depuis l'anneau.

Un coffrage central a donc été rajouté dans le moule, mais surtout un très fort ferrailage passif (photo 7) reprendra tous les efforts qui ne pouvaient être justifié par le seul BSI® : il a été mis en place 250 kg/m³ d'aciers passifs.

Il a fallu déployer d'intenses efforts lors de la mise en œuvre afin de s'assurer que le béton remplisse bien le moule au milieu des gaines et des aciers HA, mais aussi pour garantir un parement de la fenêtre impeccable.



Photo 6 : Voussoir fenêtre avec armatures de renfort et noyaux spécifiques © Eiffage TP

2. Les études d'exécution

2.1. Positionnement vis-à-vis des règlements de calcul

Le Dossier de Consultation des Entreprises étant antérieur à Juin 2013, il faisait référence aux documents disponibles, notamment les règles provisoires AFGC BFUP 2002, et aux textes BAEL – BPEL (91 révisé 99). La réglementation pour la justification des ouvrages en béton fibré à ultra hautes performances (BFUP) ayant été modifiée suite à la parution des recommandations AFGC BFUP de juin 2013, après avis du CEREMA et en accord avec la Maîtrise d'Ouvrage et la Maîtrise d'Œuvre, il a été décidé de disposer d'un cadre réglementaire parfaitement homogène et cohérent basé sur l'utilisation des Eurocodes, pour cet ouvrage exceptionnel [Fig 3].

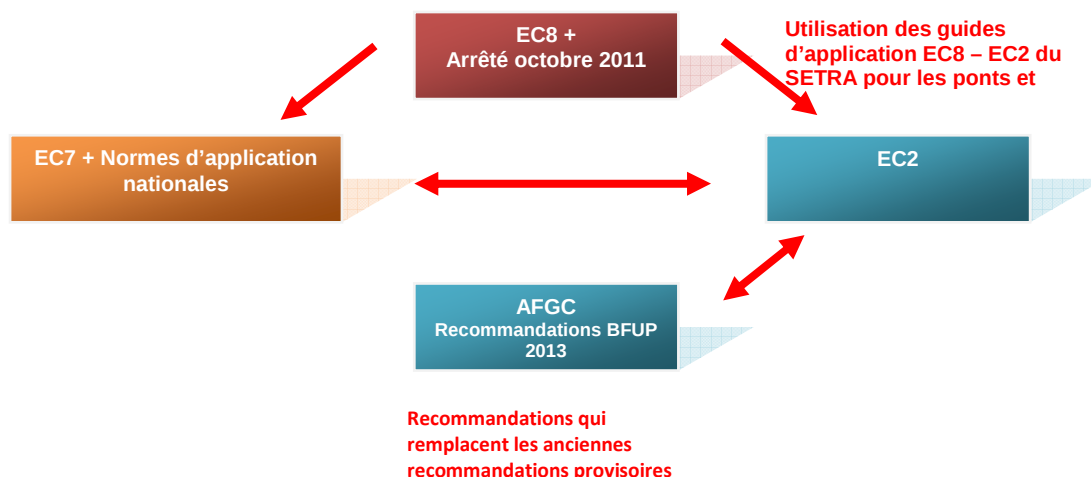


Figure 3 : Principe d'organisation du cadre normatif basé sur l'utilisation des Eurocodes

Pour appréhender le plus finement possible le fonctionnement structurel de la passerelle, le Bureau d'Etudes s'est appuyé sur 3 types de modélisations :

- Le comportement général de la structure a été étudié à l'aide d'un modèle filaire réalisé avec le logiciel ST1. Compte tenu de la très forte complexité des calculs l'entreprise Eiffage TP a décidé de confier au CEREMA, au titre du contrôle externe, un modèle de contre-calcul réalisé à l'aide du logiciel PCP. La maîtrise d'œuvre ayant utilisé le logiciel Sofistik, l'étude du Mémorial a bénéficié de la convergence de trois modèles de calculs distincts.
- Des modélisations aux éléments finis pour des vérifications de phénomènes locaux (diffusion des contraintes de compression et tractions locales au droit des fenêtres de vue, diffusion des efforts concentrés au droit des voussoirs d'appuis). Pour étudier ces phénomènes locaux, des modèles aux éléments finis 3D ont été réalisés à l'aide du logiciel ROBOT Structural Analysis.
- Enfin, pour étudier qualitativement le comportement attendu, et contrôler les résultats des modèles numériques, il a été fait utilisation de modèles simplifiés calculés manuellement sur Excel.

Le modèle ST1 permet de prendre en compte non seulement le phasage général de la structure afin de déterminer au mieux la précontrainte mais aussi l'évolution des caractéristiques des matériaux et notamment le fluage des BFUP. Les pertes de précontraintes sont calculées automatiquement par le logiciel. Dans ce modèle, chaque voussoir est modélisé par 4 barres soit un total de 196 barres. Les charges appliquées à la structure sont ramenées au centre de gravité de la section (ce qui correspond à la position des barres modélisant les voussoirs).

2.2. Démarrage des études

Le dimensionnement de la structure a subi plusieurs changements au cours de l'étude, pour respecter les normes et faciliter la mise en œuvre sur chantier.

Les principaux chargements de la structure sont :

- Le poids propre des différents éléments
- Les circulations piétonnes statiques et dynamiques
- Les chargements climatiques (vent, température, neige)
- Les charges d'entretien pour des vérifications locales
- L'action du séisme selon l'Eurocode 8 et l'arrêté pont d'octobre 2011.

2.2.1. Libération horizontale de l'appui B

Après plusieurs calculs sommaires, une modification a été apportée au projet en libérant l'appui B afin de limiter les contraintes sous charges thermiques et charge de vent. Cela a permis une diminution notable des réactions d'appuis, du dimensionnement des pieux, des efforts de flexion transversale. En effet dans cette zone, la structure pouvant bénéficier de la rigidité naturelle due à la courbure, l'appui horizontal aurait créé une inflexion au niveau des déformées horizontales. En contrepartie, ce changement de type d'appui a déplacé les fréquences propres horizontales de l'ouvrage vers un domaine où des études de confort sous chargement piétonnier sont rendus nécessaires.

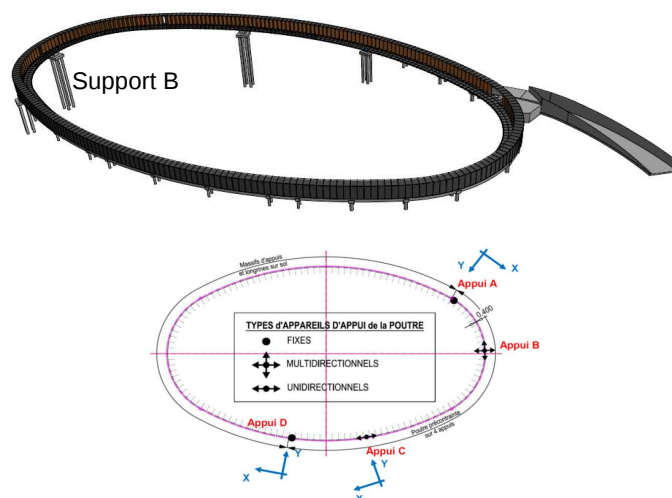


Figure 4 : Présentation de la structure

2.2.2. Phénomènes de torsion et cisaillement

Les vérifications des contraintes normales respectent bien les limites réglementaires [cf. Figure 5] :

- Compression limitée à : en service à $0,6 \times f_{ck} = 99 \text{ MPa}$
- Traction limitée à :
 - o Zone BSI® à f_{tj} soit : $-4,25 \text{ MPa}$
 - o Zone de joints : 0 MPa

En revanche, il est apparu un problème majeur pour la justification de la structure sous sollicitations tangentes (efforts tranchant et moment de torsion). En effet, la torsion générée par la poutre courbe sous chargement vertical seul est supérieure à la capacité résistante de la section. La part principale de ce moment de torsion est due aux charges permanentes largement prépondérantes sur cette structure.

Les premiers résultats conduisent à une contrainte de cisaillement maximale dans les âmes de $14,85 \text{ MPa}$ aux ELS et un critère de cumul de torsion et de tranchant selon les règles AFGC BFUP 2013 (basée sur les Eurocodes) de 1,22, largement supérieur à 1.

Basée sur les notions présentées dans l'Eurocode 2, la justification sous sollicitations tangentes de la structure, (guide AFGC BFUP 2013) fait intervenir 3 paramètres :

- Résistance du béton seul, celle-ci étant majorée dans le cas d'un béton comprimé
- Résistance des fibres métalliques
- Résistance éventuelle des armatures passives : dans notre cas en section courante, ces armatures sont inexistantes, cette valeur est donc nulle.

La vérification des plans de contact de voussoirs a été menée en considérant les justifications relatives aux surfaces de reprises de bétonnage de l'Eurocode 2, en bénéficiant de l'effort de compression due à la précontrainte longitudinale. Les paramètres de calcul pris en compte considèrent une surface de reprise la plus lisse possible. Cette méthode de calcul, mise au point avec le CEREMA, est identique à celle appliquée pour la justification du viaduc de Compiègne constitué d'un tablier réalisé à l'aide de voussoirs préfabriqués mis en place à l'avancement.

Les « clés de cisaillement » ne sont plus alors que des éléments de centrage des voussoirs lors de leur mise en place. En effet les voussoirs étant posés sur cintre, il n'y a pas d'effort sur les clés en phase provisoire.

Il a donc fallu modifier le tracé de la précontrainte afin de maximiser la compression au droit des zones de torsion maximales et de rééquilibrer au maximum les 2 pics de torsion positifs et négatifs [Figure 5]. Les câbles courts ont pour effet de rééquilibrer les pics de torsion et de garantir une compression maximale au droit de ces mêmes pics.

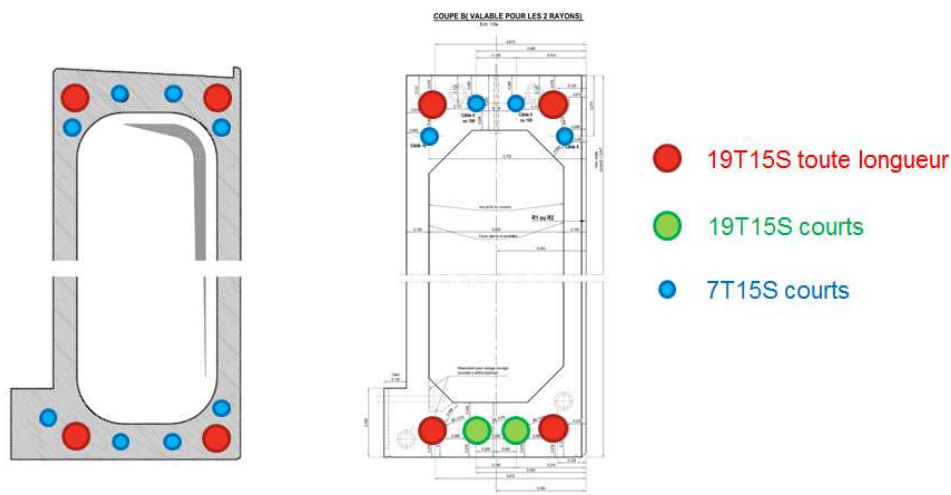


Figure 5 : Evolution de la précontrainte en phase conception et exécution

2.2.3. Réduction de la portée et ancrage des câbles

Toutefois, cet ajustement de la précontrainte entre les deux phases de conception et d'exécution était encore insuffisant pour justifier réglementairement l'ouvrage. Il s'est avéré nécessaire de redistribuer les portées des trois travées, en accord avec l'Architecte, en réduisant la longueur de la travée centrale à $56,1\text{m}$ [Photo 8]. L'équilibrage des 3 travées est alors mieux assuré ($28,3\text{m} - 56,1\text{m} - 37,9\text{m}$) et l'effet est extrêmement favorable car la torsion naturelle générée par la poutre courbe est diminuée de 50%.



Photo 7 : Travée centrale de la poutre – Karine WARNY

Les ancrages actifs sont mis en place à proximité des zones de torsion maximale ce qui permet de limiter l'influence des pertes de précontrainte par frottement. Cela rend également plus facile l'accessibilité à la structure, les ancrages actifs étant plus proches des extrémités. Le contre-calcul du CEREMA a mis en évidence des comportements locaux de torsion complémentaires à proximité des ancrages initialement disposés sur la face intérieure de l'anneau : les ancrages ont donc été rentrés dans l'espace disponible des caissons.

2.3. Modélisation définitive

Le câblage finalement retenu pour la structure se décompose de la façon suivante [Figure 6] :

- Une précontrainte filante importante de 4 x 19T15S (2 en fibre supérieure, 2 en fibre inférieure) – Câbles 1 à 4
- Des câbles longs 2 x 19 T 15 S (Câbles 7 & 8) en partie inférieure de la travée centrale
- Des câbles courts (Câbles 5 / 6 et 105 / 106) et longs (Câbles 9 & 10) de plus petites unités 7 T 15 S en fibre supérieure

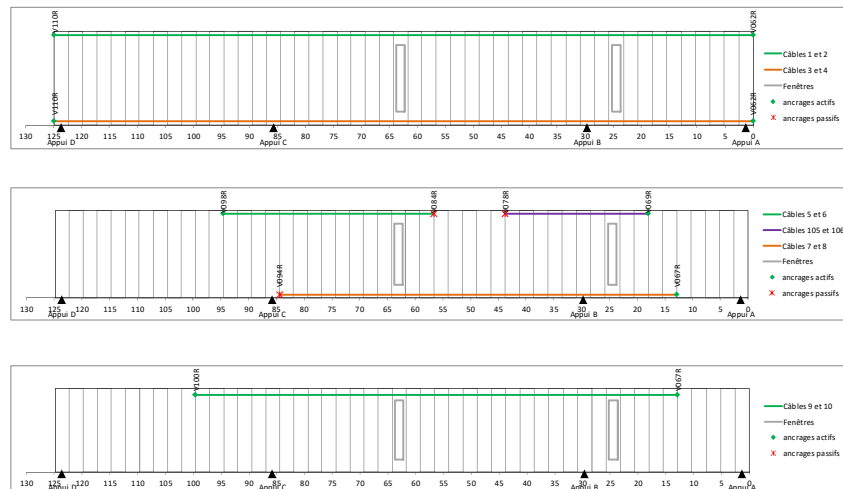


Figure 6 : Précontrainte finale

Le phasage du modèle de calcul reprend évidemment les différentes étapes de mises en place de la structure :

- Mise en place des voussoirs, des supports et des casquettes
- Mise en tension symétrique des câbles 1 à 4
- Clavage des appuis définitifs intermédiaires et décintrage des travées de rive
- Mise en tension des câbles inférieurs (7 et 8) de la travée centrale
- Décintrage de la travée centrale
- Mise en tension des câbles longs supérieurs (9 et 10)

- Mise en tension des câbles courts sur appuis (5, 6 et 105, 106)
- Pose des dalles de passerelles et des garde corps

Les contraintes normales dans la poutre sont représentées ci-dessous, avec une marge évidente par rapport à la haute résistance en compression du BSI®.

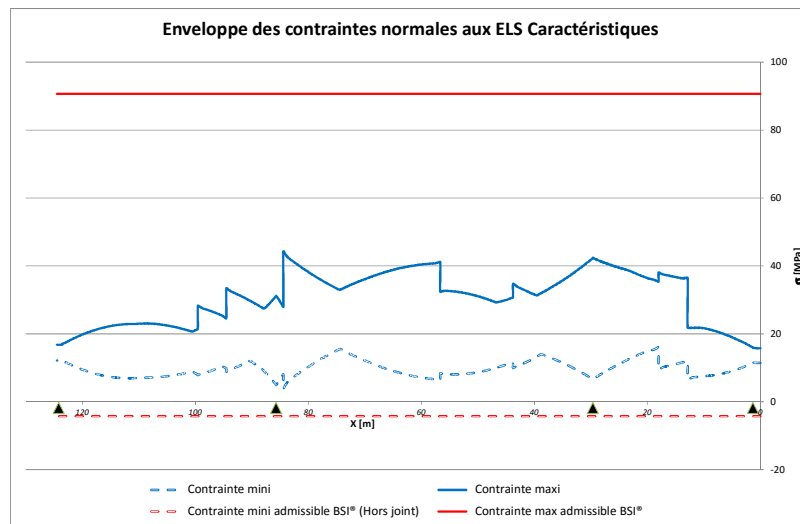


Figure 7 : Contraintes normales enveloppes en phase définitive

Le cisaillement dans la poutre est représenté ci-dessous. Le décalage des appuis et la précontrainte optimisée a permis de réduire les efforts de flexion et de torsion dans la poutre de façon à respecter les valeurs admissibles.

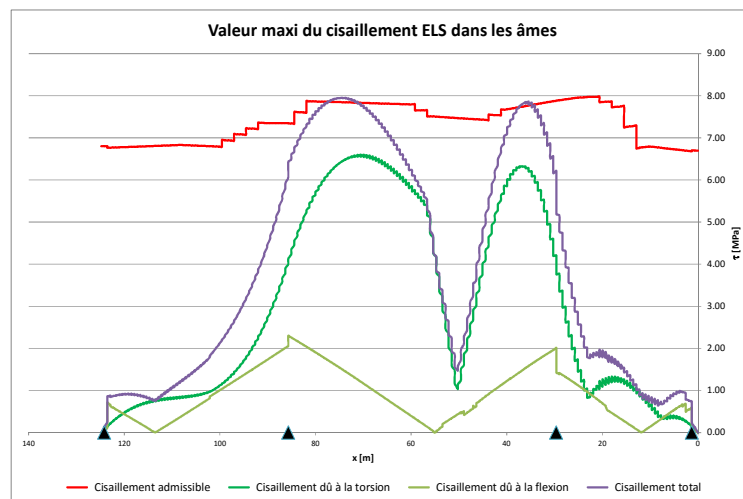


Figure 8 : Respect du critère de cisaillement aux ELS caractéristiques à la fin des études d'exécution

2.4. Etude dynamique

L'étude dynamique de l'ouvrage comporte deux volets distincts :

- D'une part, la justification de la structure sous sollicitations sismiques
- D'autre part, la vérification des critères de confort dynamique sous chargement piétonnier.

2.4.1. Modèle éléments finis pour l'analyse dynamique

La poutre courbe a été modélisée sur ROBOT Structural Analysis, sous la forme d'un modèle filaire avec des masses excentrées au niveau des casquettes et de la plateforme. La raideur du sol sous appuis a été négligée, ce qui est une hypothèse défavorable pour l'étude sismique puisque cela tend à surestimer la raideur des appuis.

Ce modèle a permis de déterminer les modes propres de la poutre, à partir desquels a été menée aussi bien l'étude sismique que l'étude de confort piétonnier.



Cette étude a mis en évidence des modes de vibrations complexes, mêlant déplacements horizontaux, verticaux et de torsion. Les 11 premiers modes sollicitent 80% de la masse modale horizontale, et les 20 premiers 95%.

Par ailleurs, il a été constaté que le premier mode (horizontal) et le troisième mode (vertical) se situent dans la plage de risque de mise en résonance par les piétons, conduisant à vérifier les critères de confort sous sollicitation dynamique.

2.4.2. Etude sismique

Pour étudier le comportement de la passerelle au séisme, les hypothèses suivantes ont été prises :

- Catégorie d'importance de l'ouvrage : II
- Zonage sismique : 2 (faible)
- Classe de sol : C
- Méthode d'analyse spectrale

Cette étude a montré que les sollicitations sismiques ne sont dimensionnantes ni pour la passerelle, ni pour les fondations de l'ouvrage. Ce résultat s'explique notamment par le zonage sismique faible et la classe de sol.

2.4.3. Etude de confort sous chargement dynamique de foule

Parmi les adaptations apportées en phase d'exécution, la libération des déplacements horizontaux au niveau de l'appui B a nettement réduit les contraintes internes et les réactions aux appuis. Mais ce fût au prix d'une diminution des fréquences propres, plaçant l'ouvrage dans la plage à risques de mise en résonance sous chargement de foule.

Les hypothèses suivantes ont été considérées :

- Ouvrage de classe III, correspondant à une passerelle normalement utilisée, pouvant parfois être utilisée par des groupes importants mais sans jamais être chargée sur toute sa surface
- Pression dynamique de base de 0.6kPa par piéton
- Raideur du sol négligée
- Coefficient d'amortissement critique $\xi = 0.6\%$. Cette valeur résulte des retours d'expériences sur d'autres passerelles en BFUP précontraint. Cette hypothèse est plus contraignante que celle proposée par le guide CEREMA qui suggère $\xi = 1.0\%$ pour un ouvrage en béton précontraint.

Sur la base de ces hypothèses, les sollicitations dynamiques horizontales engendrent des accélérations de l'ordre de 0.08 m/s^2 , valeurs inférieures au seuil de synchronisation forcée (0.10 m/s^2) au-delà duquel, dans un phénomène auto-amplificateur, les vibrations de la structure poussent les piétons à caler leur cadence sur ces dernières. Verticalement, le 3^{ème} mode est susceptible d'engendrer des accélérations d'environ 0.80 m/s^2 , ce qui place la structure dans la plage de confort moyen.

De son côté, le contre-calcul du CEREMA a déterminé des accélérations moins importantes encore, confirmant qu'il n'était pas nécessaire de mettre en place des amortisseurs dynamiques comme c'est souvent le cas pour des passerelles piétonnes. Cet écart s'explique notamment par la prise en compte de la raideur du sol dans leur modèle.

2.5. La 3D au cœur des études d'exécution

Dans le domaine du génie civil, les plans sont à la base du processus de transmission de l'information des études vers le chantier. Des années de pratique, et l'expansion de logiciels de DAO 2D ont contribué à standardiser les processus de réalisation des plans.

Ce mémorial à la géométrie complexe fut l'occasion de franchir un pas de plus dans la troisième dimension. Les modèles 3D de la structure ont été effectués sous INVENTOR version 2014 d'AUTODESK.

La maîtrise du logiciel liée à une utilisation régulière a permis de valider un certain nombre de points singuliers du projet.

Comme indiqué plus haut, les études menées conjointement avec le CEREMA ont révélé la nécessité de mettre en place la précontrainte à l'intérieur du caisson. Les 24 ancrages de précontraintes [cf. Figure 7] ont donc tous été modélisés en 3D ainsi que les vérins de mise en précontrainte afin de valider la solution. La marge de manœuvre pour les vérins de 19 T15 S était inférieure à 2 cm, la 3D a permis une modélisation précise qui a été validée à l'usine dans les voussoirs par une maquette simplifiée du vérin.

Par ailleurs, ces modélisations se sont révélées des plus précieuses dans l'échange avec les fabricants de coffrage, permettant de concevoir les abouts de coffrage spéciaux par un dispositif de tôle pliée. Les abouts de positionnement d'ancrage ont pu être fabriqués directement par une machine à commandes en exploitant le modèle des voussoirs. Les échanges de fichier ont été réalisés avec le format « .step ».

La 3D s'est révélée également très performante dans la synthèse des inserts à prévoir en interface avec le lot n°2 [cf. Figure 10] (Eléments métalliques : Tôles et gardes corps de rive réalisés par CITYNOX) et ceux nécessaires à la mise en place des dispositifs provisoires (brélage des voussoirs après encollage de la face).

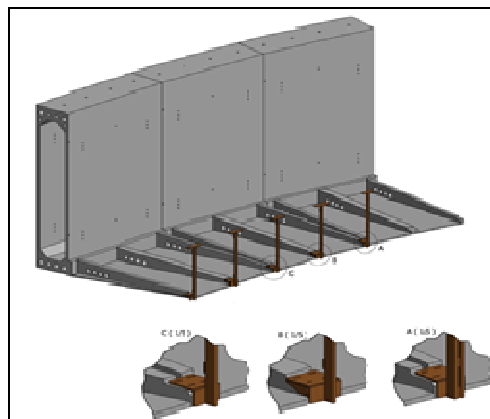
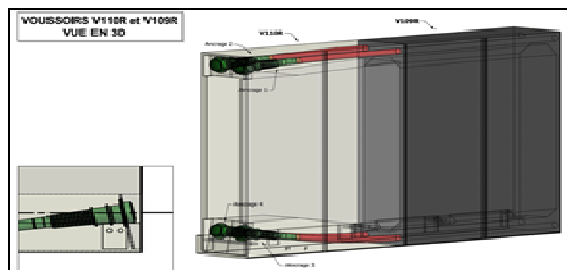


Figure 9 : Modélisation 3D des ancrages de précontrainte

Figure 10 : Synthèse sur maquette 3D

3. Conclusion

Le matériau BSI® a permis de réaliser des éléments préfabriqués très fins, mais aussi des éléments de grande résistance tant en compression qu'en cisaillement, afin de répondre aux sollicitations particulières de cet ouvrage. La très grande durabilité de ce matériau lui permettra d'être présent pour le prochain siècle dans ce lieu de mémoire de la colline de Notre Dame de Lorette.

Grâce à un dialogue constant et constructif avec tous les intervenants du projet, les études ont pu être menées à bien et le chantier finalisé dans le délai très court annoncé. Les études d'exécution de ce projet ont permis au bureau d'études de franchir une nouvelle étape dans l'évolution numérique du déroulement de l'ingénierie pour des projets à forte complexité.

Principaux intervenants :

Maître d'Ouvrage :	Région Nord – Pas de Calais, Lille
Architecte :	Agence d'Architecture Philippe Prost, Paris
Maître d'œuvre structure :	C & E Ingénierie, Paris
Maître d'œuvre fluides :	Bureau Louis Choulet, Clermont – Ferrand
Bureau de Contrôle :	BTP Consultants, Marcq en Baroeul
Entreprise Lot 1 Gros œuvre étendu :	Groupe EIFFAGE TP Nord (mandataire) – Eiffage TP Viapontis – Eiffage Energie Tertiaire Lens.
Bureau d'étude d'exécution :	Eiffage TP BIEP
Contrôle externe des études d'exécution :	CEREMA Sourdun.

Principales quantités :

Béton :	690 m ³ dont 85 m ³ de béton coloré
Aciers HA :	90 t
Précontrainte :	16.5 t torons T15S, 12 ancrages 19 T 15, 12 ancrages 7 T 15
Pieux tarière creuse :	58 unités
Éléments BSI® :	▪ 73 voussoirs simples ▪ 49 voussoirs renforcés ▪ 49 supports de galerie ▪ 256 consoles ▪ 256 dalles de sols en 3 éléments

Conclusions

Cet article a ainsi montré la nécessité au bureau d'étude de travailler en étroite collaboration avec les équipes de production. En adaptant les données réelles et les méthodes utilisées sur le site, les résultats d'analyses sont en effet plus pertinents et plus justes. Cette symbiose entre le chantier et le BE est donc une condition sine qua non pour arriver à la réussite d'un projet aussi complexe.