

MAITRE D'OUVRAGE  PRÉFET DE LA RÉGION NOUVELLE-AQUITAINE Liberté Égalité Fraternité Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement Nouvelle-Aquitaine <i>Cité administrative – Rue Jules Ferry</i> 33090 BORDEAUX CEDEX		ASSISTANCE A MAITRE D'OUVRAGE  INGEROP <i>5, Impasse des Mûrier</i> CS 80012 – 33692 MERIGNAC CEDEX
ARCHITECTE  architectes MOG ARCHITECTES <i>8, rue Esprit des Lois</i> 33000 BORDEAUX	MAITRE D'OEUVRE  setec SETEC <i>42, rue du Général de Laminat</i> 33000 BORDEAUX	ENTREPRISE  EIFFAGE GÉNIE CIVIL EIFFAGE GENIE CIVIL <i>3-7, Place de l'Europe</i> CS 50570 – 78140 VELIZY-VILLACOUBLAY

Conception et Réalisation d'une passerelle modes actifs accrochée au Pont François Mitterrand

Mémoire technique phase PRO

58038_ALS_PRO_GEN_GEN_NOT_00201 - MT PRO

A	20/04/2025	AVE/RBE	SRI	ADE	Première diffusion
IND	Date	Etabli par	Vérifié par	Approuvé par	Observations / Modifications

Émetteurs :



Diffusion :

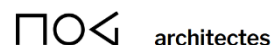


Table des matières

1	Objet du document	4
1.1	Documents de référence	4
2	Géométrie de la passerelle et liaison à l'ouvrage existant.....	6
2.1	Rappel de la géométrie du viaduc amont du pont François Mitterrand	6
2.2	Principe de conception de la passerelle	7
2.3	Géométrie et espacement des consoles.....	8
2.4	Liaison aux voussoirs.....	10
3	Hypothèses liées aux actions – phase PRO anticipée	12
3.1	Charges permanentes	12
3.1.1	Poids propre du platelage	12
3.1.2	Poids propre du revêtement de la passerelle	13
3.1.3	Poids propre de la charpente métallique.....	13
3.1.4	Poids propre des bossages en béton.....	13
3.1.5	Garde-corps.....	13
3.2	Charges variables	13
3.2.1	Charges d'exploitation ouvrage existant.....	13
3.2.2	Autres charges variables sur ouvrage existant.....	13
3.2.3	Charges d'exploitation passerelle	14
3.2.4	Actions sismiques	14
4	Précontrainte	15
4.1	Précontrainte existante	15
4.2	Précontrainte extérieure additionnelle	20
4.2.1	Dispositions préalables sur l'ouvrage existant	20
4.2.2	Procédé et caractéristiques mécaniques de la précontrainte additionnelle extérieure	24
4.2.3	Conclusions sur la précontrainte additionnelle.....	24
5	Renforcement en tissu de carbone (PRFC).....	27
5.1	Choix du procédé	27
5.2	Conclusions sur le renforcement en tissu de carbone.....	27

5.3	Mise en œuvre	29
5.4	Adhérence du support béton.....	30
6	Approche et méthodologie de justification de l'ouvrage existant et de dimensionnement des renforcements	32

1 Objet du document

Le présent document est le mémoire technique de phase PRO anticipée pour le projet de la passerelle modes actifs accrochée au pont François Mitterrand.

Son objectif est uniquement de présenter la solution technique retenue pour le renforcement de l'ouvrage existant sous l'action de la passerelle en projet, par la mise en œuvre d'une précontrainte extérieure additionnelle et d'un renforcement en tissu de carbone (PRFC).

Le mémoire technique qui sera inclut dans le dossier PRO définitif reprendra le contenu du présent document et le complétera sur tous les sujets techniques couvrant le projet (données d'entrée, contraintes du projet, description détaillée de la solution technique de la passerelle et des aménagements associés).

1.1 Documents de référence

- Programme, cahier de charge et données d'entrée

- [1] Programme de l'opération – version V10 – 02 avril 2024
- [2] Annexe 3_Pont François Mitterrand_STM-V5 : Spécifications techniques marché
- [3] Dossier de récolement du pont F. Mitterrand (plans et notes de calcul)
 - Dossier des inspections périodiques de l'ouvrage :
- [4] IDP 2014 (Cerema),
- [5] IQOA 2018 (DIRA),
- [6] IDP 2021 (Getec)
 - Dossier des investigations de l'ouvrage :
- [7] Analyse de la précontrainte extérieure 2021 (Cerema),
- [8] Diagnostic bétons, précontrainte et chaussée 2022 (Sixense)

- Cadre réglementaire

- Pour l'ouvrage existant :
- [9] CCTG – Fascicule 61 – Titre II : « Conception, calcul et épreuves des ouvrages d'art – Programmes de charges et épreuves des ponts-routes »
- [10] CCTG – Fascicule 62 – Titre I – Section II : « Règles B.P.E.L. 83 : Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton précontraint suivant la méthode des états limites »

[11] CCTG – Fascicule 62 – Titre I – Section I : « Règles B.A.E.L. 83 : Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites »

- Pour l'ouvrage neuf :

[12] Fascicules du CCTG

[13] Corpus des Eurocodes

[14] NF P 18-710 « Complément national à l'Eurocode 2 – Calcul des structures en Béton : règles spécifiques pour les BFUP »

[15] NF P 18-470 « Bétons fibrés à Ultra Hautes Performances – Spécification, performance, production et conformité »

[16] NF P18-451 « Bétons - Exécution des structures en béton - Règles spécifiques pour les BFUP »

[17] NF P 95-104 « Ouvrages d'art — Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie – Spécifications relatives à la technique de précontrainte additionnelle »

[18] Décret n°2010-1254 du 22/10/2010 relatif à la prévention du risque sismique ;

[19] Décrets n°2010-1255 du 22/10/2010 et n°2015-5 du 06/01/2015 portant sur la délimitation des zones de sismicité du territoire français ;

[20] Arrêté du 26/10/2011 relatif à la classification et aux règles de construction parasismiques applicables aux ponts de la classe dite à « risque normal ».

- **Dossier d'études PRO anticipé**

[21] 58038_ALS_PRO_GEN_GEN_NOT_00201 - Mémoire technique PRO

[22] 58038_ALS_PRO_GEN_GEN_NHY_00202 - Note d'hypothèses générales

[23] 58038_ALS_PRO_GEN_GEN_NTT_00203 - Note calage modèle calcul global

[24] 58038_ALS_PRO_GEN_GEN_NDC_00206 - Note de justification précontrainte additionnelle

[25] 58038_ALS_PRO_GEN_GEN_NDC_00207 - Note de justification renforcement composite

[26] 58038_ALS_PRO_GEN_GEN_PLA_00211 - Cahier de plans techniques PRO (précontrainte et renforcement carbone)

2 Géométrie de la passerelle et liaison à l'ouvrage existant

2.1 Rappel de la géométrie du viaduc amont du pont François Mitterrand

La passerelle en projet est accrochée au viaduc amont du pont François Mitterrand.

Les images suivantes illustrent l'élévation des voussoirs qui composent cet ouvrage :

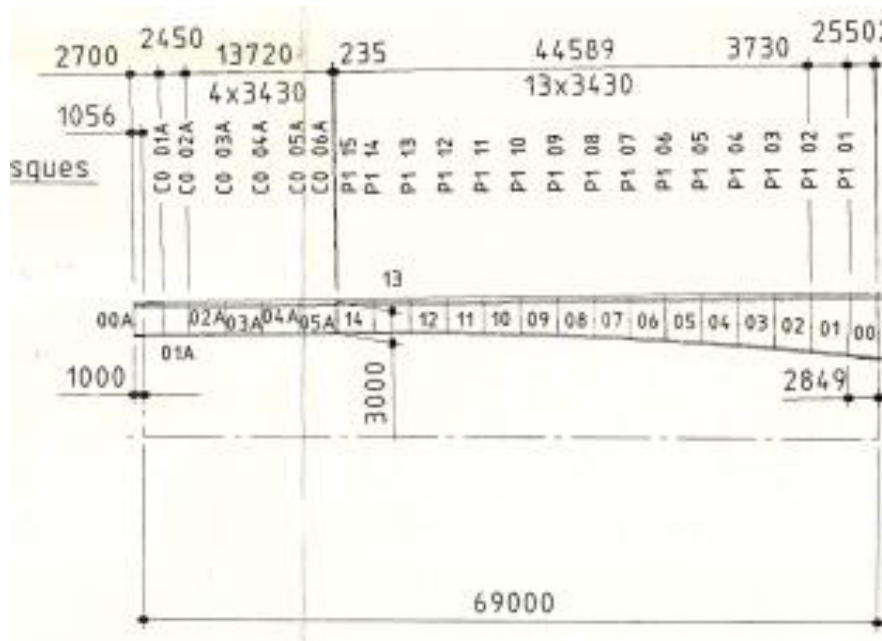


Figure 1 : Vue longitudinale de la travée de rive T1

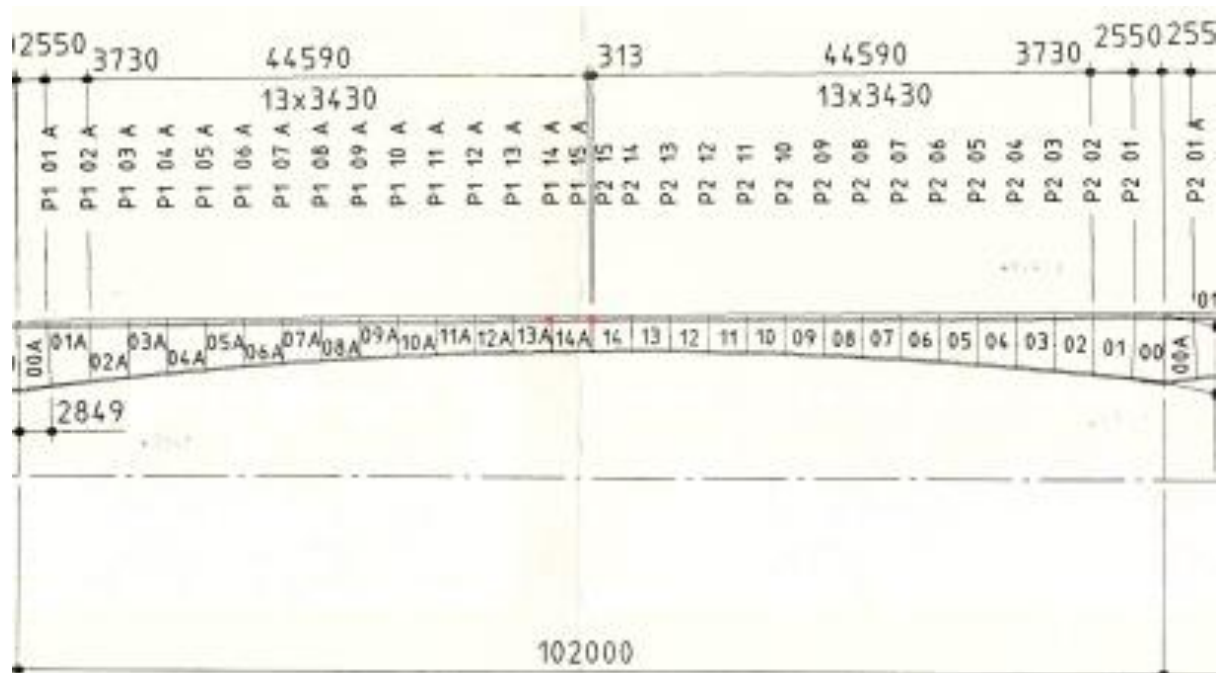


Figure 2 : Vue longitudinale d'une travée courante (T2 à T6)

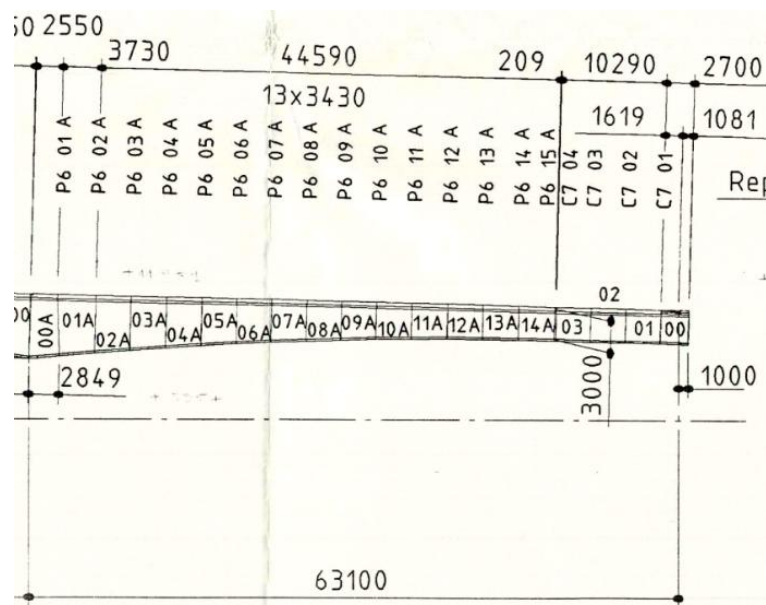


Figure 3 : Vue longitudinale de la travée de rive T7

2.2 Principe de conception de la passerelle

La conception proposée pour la passerelle est celle d'un platelage isostatique en BFUP précontraint portant longitudinalement sur des consoles métalliques en « L » fixées aux âmes des voussoirs au droit de l'axe des nervures de brèlage.

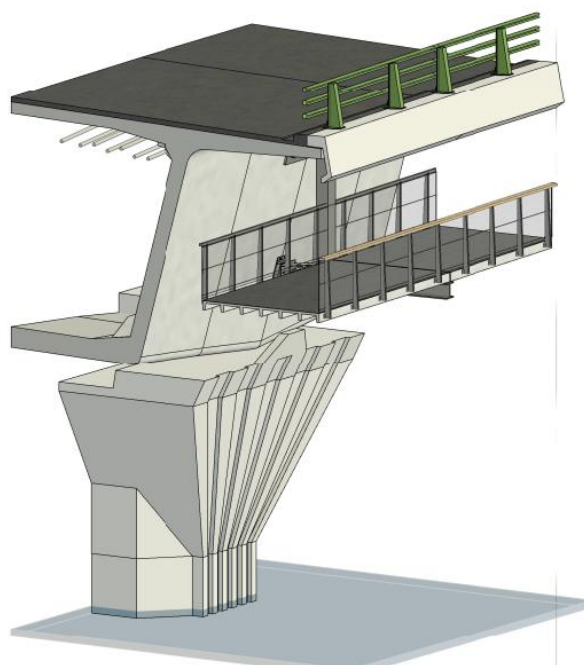


Figure 4 : Extrait cahier de plan – Vue d'une console courante avec platelage

2.3 Géométrie et espacement des consoles

Sur les travées courantes, les consoles sont situées sur les voussoirs suivant : VSP - V2 - V4 - V6 - V8 - V10 - V12 - V14 (dénomination pour une demi-travée courante). Sur les travées de rive les fixations suivent ce qui est présenté sur les images suivantes.

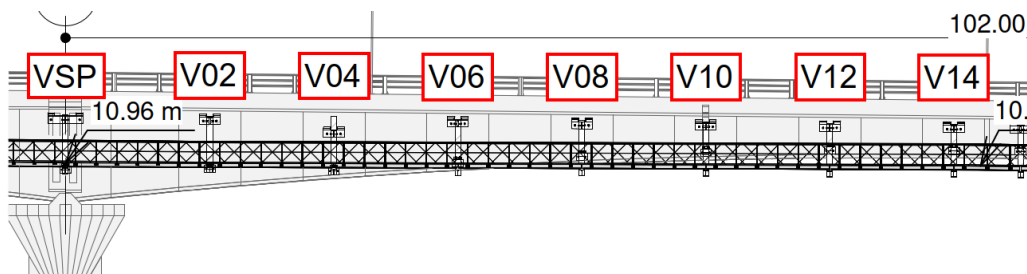


Figure 5: Positionnement des consoles sur une mi-travée courante

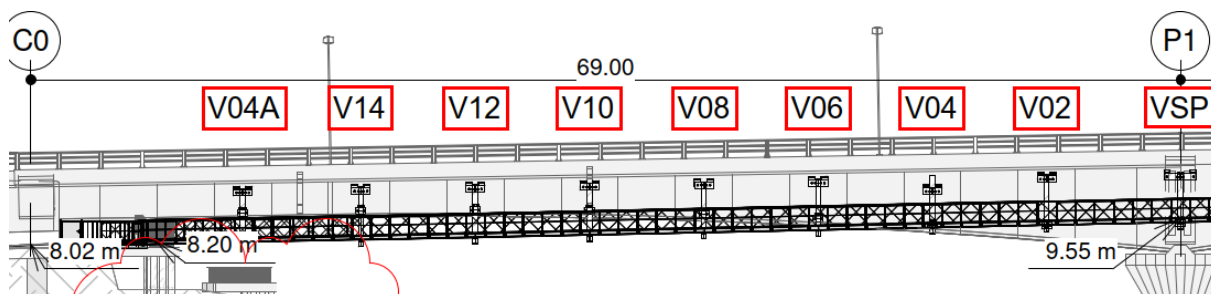


Figure 6: Positionnement des consoles sur travée de rive gauche

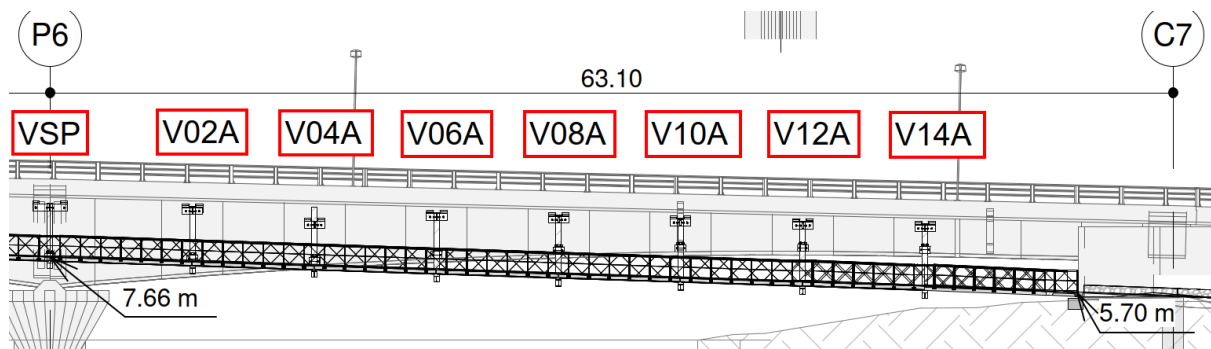


Figure 7: Positionnement des consoles sur travée de rive droite

L'espacement en mètres entre consoles est présenté sur les images suivantes :

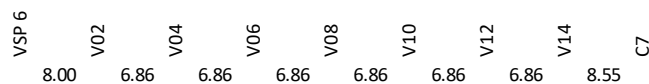
Travées courantes :

VSP n	V02	V04	V06	V08	V10	V12	V14	V14A	V12A	V10A	V08A	V06A	V04A	V02A	VSP n+1
8.00	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	3.68	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	8.00

Travée rive gauche :

C0	V04	V14	V12	V10	V08	V06	V04	V02	VSP1
8.53	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	8.00	

Travée rive droite



La géométrie des consoles et la descente de charge relative est variable, sur la base de 11 types :

Type	N console	Type	N console
1 nom type courant portée amont 6.86m portée aval 6.86m	59	6 nom type à la clé courante portée amont 6.86 portée aval 3.63	6
2 nom type sur VSP portée amont 8 portée aval 8	4	7 nom type à la clé passe navigable portée amont 6.86 portée aval 3.63	4
3 nom type sur VSP + belvédère portée amont 8 portée aval 8	2	8 type C0 nom coté culée	1
4 type juste nom avant VSP portée amont 6.86 portée aval 8	8	9 type C0 nom coté ouvrage	1
5 type juste nom avant VSP + belvédère portée amont 6.86 portée aval 8	4	10 type C7 nom coté ouvrage	1
		11 type C7 nom coté culée	1
		total	91

Le positionnement de ces types de consoles est donné ci-dessous (les types de consoles sont identifiés par leur couleur) :

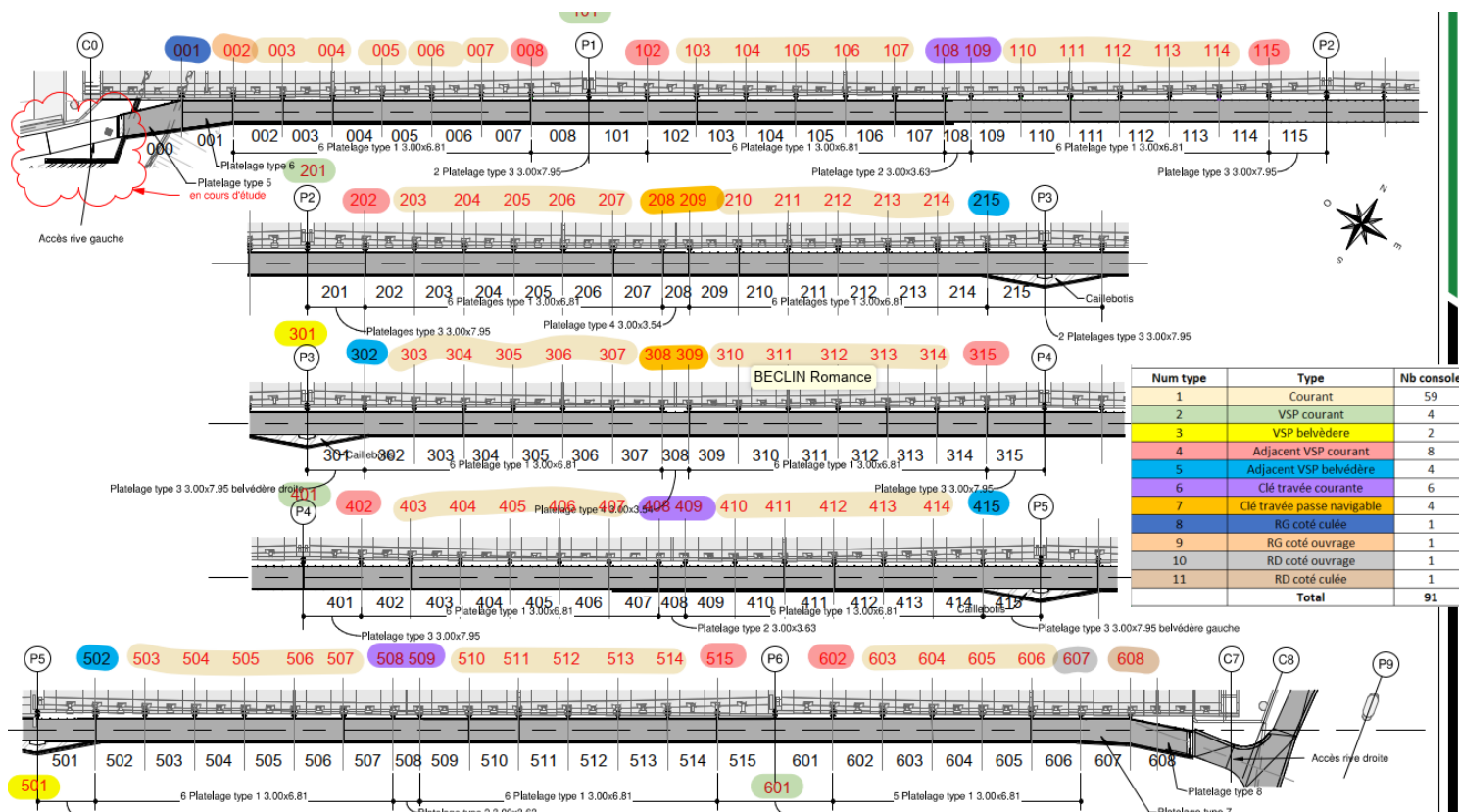


Figure 8 : Numérotation des consoles et attribution d'un type

2.4 Liaison aux voussoirs

Les appuis de la passerelle sont :

- Un appui supérieur constitué d'un profilé horizontal ancré par une file de barres de précontrainte -total de 2 barres) dans l'âme du voussoir et liaisonné au profilé vertical de la console en « L » par un axe permettant de libérer la rotation de la console. Pour permettre une diffusion correcte des efforts, deux bossages en béton seront coulés en place à l'intérieur du caisson, de part et d'autre de la nervure de brèlage.

Les études de la charpente métallique de la console et de la liaison articulée sont en cours, ainsi nous prenons comme hypothèse que la rotule se situe à l'axe du profilé vertical de la console. Nous évaluerons la possibilité de localiser la rotule à l'extérieur du profilé afin de réduire le moment d'encastrement au niveau de l'ancrage.

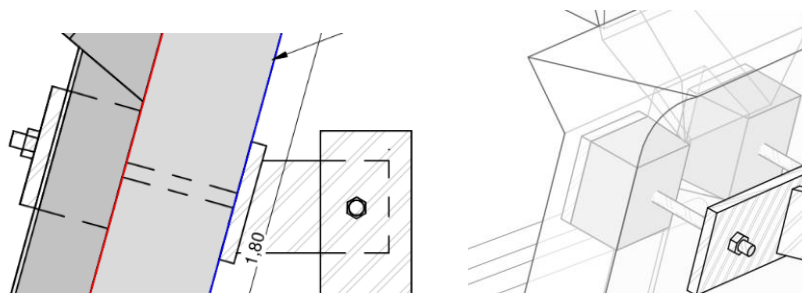


Figure 9 : Extrait cahier de plans – représentation de l'appui supérieur rotulé et des bossages d'appuis à l'intérieur du caisson

La dimension d'un bossage est de 0.4m x 0.4 m x 0.3m.

La dimension des platines d'ancrages extérieures est 1.2m x 0.4m x 0.04m (b x h x ep.).

La dimension des platines d'ancrages intérieures est 0.2m x 0.2m x 0.06m (b x h x ep.).

Les épaisseurs des platines seront confirmées par les études de dimensionnement PRO en cours.

- Un appui inférieur simplement appuyé sur l'âme du caisson :

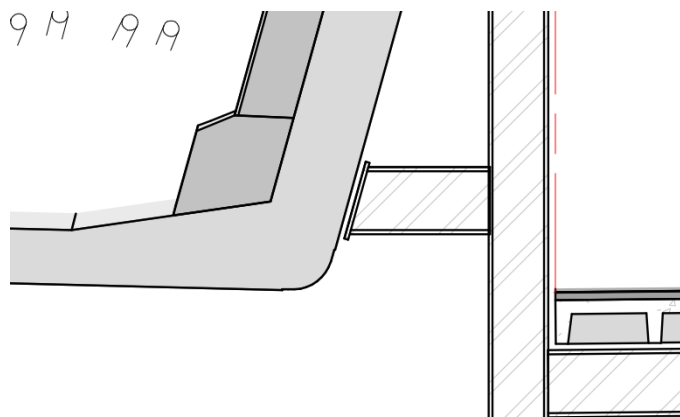


Figure 10 : Extrait cahier de plans : Représentation de principe de l'appui inférieur (taquets antisoulèvement non représentés)

3 Hypothèses liées aux actions – phase PRO anticipée

La note d'hypothèses générales fournit une description détaillée de l'ensemble des charges et combinaisons retenues pour l'étude de la passerelle et du pont François Mitterrand (cf. [22]).

Cette première phase de l'étude PRO a comme objectif de fournir, de manière anticipée, un dimensionnement de la précontrainte additionnelle extérieure et du renforcement en tissu de carbone. Dans ce but nous avons pris un certain nombre d'hypothèses conservatives pour évaluer les charges transmises de la passerelle à l'ouvrage existant, afin de couvrir :

- les évolutions à venir sur l'équarrissage des éléments qui restent à dimensionner au stade de l'étude PRO ;
- les possibles évolutions dans les choix des matériaux et constituant la passerelle : revêtement, équipements, système d'ancrage.

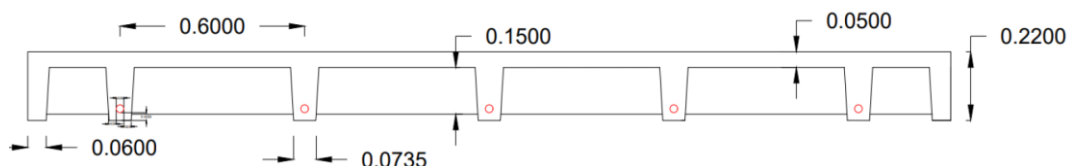
Nous considérons en revanche que les variables suivantes (la liste ne se veut pas exhaustive, mais ne couvre que les sujets ayant un impact sur le dimensionnement structurale de la passerelle et la justification de l'ouvrage existant) sont désormais arrêtées et ne feront plus l'objet d'évolution :

- Position longitudinale des consoles et par conséquent longueur des platelages sur l'ouvrage (la longueur des platelages d'extrémité au droit des rives peut varier, les études étant en cours sur les extrémités)
- Dimensions fonctionnelles : largeur utile sur la passerelle : 3.00m ; gabarit de 3.00m
- Nature du platelage courant (hors extrémités) : platelage en BFUP précontraint
- Nature des consoles : métalliques, rotulées en partie supérieure et simplement appuyée en base

3.1 Charges permanentes

3.1.1 Poids propre du platelage

L'ensemble du platelage est considéré en BFUP précontraint, avec une hauteur totale 220mm, épaisseur hourdis 5cm, 5 nervures principales précontraintes + 2 nervures de rive non précontraintes (cf. section type ci-après).



Une QAV de 10% est prise sur le poids propre du platelage.

3.1.2 Poids propre du revêtement de la passerelle

De manière conservatrice il a été considéré pour le calcul de la descente de charge de la passerelle sur l'ouvrage existant, un revêtement du platelage en enrobé bitumineux d'épaisseur 4cm et poids volumique 24kN/m³. Pour le bilan de charge nous prenons en compte la pondération suivant NF EN1991-2 $\chi_{sup} = 1.4$ sur cette charge.

3.1.3 Poids propre de la charpente métallique

Le poids propre de la charpente métallique est établi suivant le dimensionnement de phase AVPD avec prise en compte d'une QAV +10% sur le poids des sections résistantes.

- Console courante (entraxe courant 6.86m) et d'extrémités : profilé horizontal : HEB340
- Console sur pile courante : profilé horizontal : HEB450
- Console sur pile avec belvédère profilé horizontal : HEB500
- Console à la clé sur passe navigable : profilé horizontal : PRS 75*50/250*25/450*50
- Profilé vertical pour toutes les consoles : PRS en « U » membrures : 300*26 ; âme : 300*22

3.1.4 Poids propre des bossages en béton

Pour le bilan de charge transmise à l'ouvrage existant, nous retenons à ce stade deux bossages pour ancrage haut de console avec les dimensions suivantes : 0.40x0.60x0.30, supérieures à celles finalement retenue (0.40x0.40x0.30). De plus une QAV de +20% est retenue.

3.1.5 Garde-corps

Pour chaque rive de la passerelle nous considérons appliquée une charge de garde-corps de 0.50kN/m avec une pondération suivant la norme NF EN1991-2, égale à $\chi_{sup} = 1.2$.

3.2 Charges variables

3.2.1 Charges d'exploitation ouvrage existant

Les charges routières directement appliquées à l'ouvrage existant sont celles du Fascicule 61 – Titre II. En particulier, pour la flexion longitudinale du pont François Mitterrand nous avons introduit dans le modèle de calcul aux éléments finis pour la flexion longitudinale que nous avons réalisé le système de charge A(l), Bc et Mc120.

3.2.2 Autres charges variables sur ouvrage existant

L'action thermique retenue pour le calcul est le gradient thermique avec un écart de température de 12°C.

(5) gradient thermique de 12°C sur le tablier. (TR3)

3.2.3 Charges d'exploitation passerelle

Nous considérons deux charges d'exploitation pour la passerelle.

1) Charge de piétons

Il s'agit de la charge uniformément répartie q_{fk} selon NF EN 1991-2, 5.3.2.1(2) :

$$q_{fk} = \min \left(5 ; \max \left(2.5 ; \left(2 + \frac{120}{L + 30} \right) \right) \right) \text{ kN/m}^2 ; L \text{ étant la longueur chargée.}$$

- Cas de chargement sur une travée entière (L=102m) : $q_{fk} = 2.91 \text{ kN/m}^2$
- Cas de chargement sur deux travées entières (L=204m) : $q_{fk} = 2.51 \text{ kN/m}^2$
- Cas de chargement sur une demi-travée (L=51m) : $q_{fk} = 3.48 \text{ kN/m}^2$
- Cas de chargement sur deux platelages adjacents à une console sur pile (L=2*8= 16m) : $q_{fk} = 4.6 \text{ kN/m}^2$ arrondi à 5.0 kN/m^2
- Cas de chargement sur deux platelages courants (L=2*6.86= 16m) : $q_{fk} = 4.7 \text{ kN/m}^2$ arrondi à 5.0 kN/m^2

2) Véhicule de service

Il présente un poids en charge de 45 kN, une charge sur l'essieu arrière de 35 kN et avant 10kN, une largeur de 1.23m et empattement 2.13m. La charge de ce véhicule est non concomitante avec les charges de piétons.

Cette charge est dimensionnante pour les vérifications locales de platelage et de console, et ne sera pas appliquée à l'ouvrage existant.

3.2.4 Actions sismiques

La vérification de l'ouvrage existant n'est pas réalisée sous actions sismiques. Seul le dimensionnement de l'ouvrage neuf devra inclure une justification sous action sismique.

4 Précontrainte

4.1 Précontrainte existante

La précontrainte longitudinale de l'ouvrage existante est constituée de câbles formés de torons T15S de section $A_p = 150 \text{ mm}^2$ (classe 1770 TBR), par le procédé de précontrainte Freyssinet, système K.

Le câblage de précontrainte longitudinal se compose en trois typologies (quantités données pour un voussoir complet) :

- Câblage de fléau : 36 câbles d'unité 12T15S pour chaque pile ;
- Câblage d'éclisse :
 - o 2x1 câbles 12T15S sur la travée 1 et 7
 - o 2x6 câbles 12T15S sur les travées 2 à 6
- Précontrainte extérieure : 12 câbles 19T15S en travée courante ;

L'ouvrage dispose également d'une précontrainte transversale dans l'hourdis supérieur (torons T15 $A_p = 139 \text{ mm}^2$) au droit des VSP : 10 monotorons T15 + 2 câbles 4T15.

Les caractéristiques mécaniques de la précontrainte sont reprises de la note d'hypothèses de conception (N100).

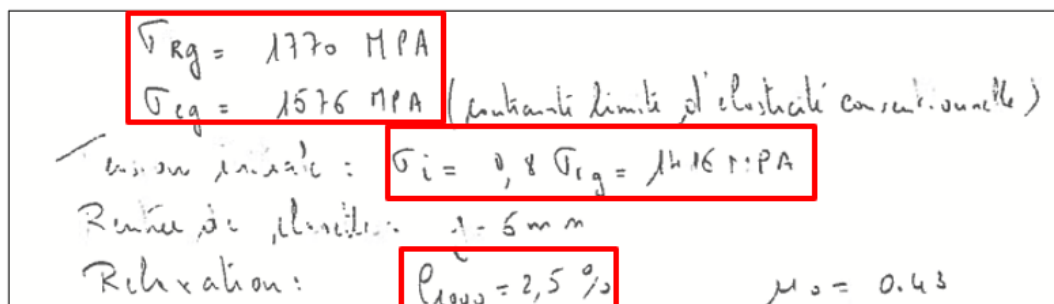


Figure 11 : Paramètres des câbles existants – N100 p.2

Le coefficient de frottement pour les câbles intérieurs sont repris de la note N100 :

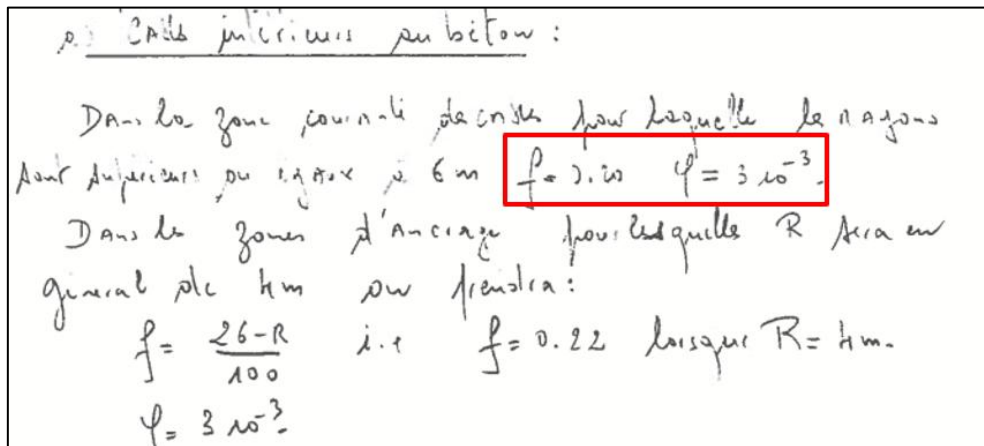


Figure 12 : Coefficients de frottement en angulaire et en ligne pour les câbles intérieurs

Pour les câbles intérieurs nous proposons de retenir un coefficient de frottement en ligne $\varphi = 0.0014 \text{ m}^{-1}$ au lieu de 0.003 m^{-1} , conformément à la nature du procédé.

— $\mu = \frac{\sigma_{pmi}(x)}{f_{prg}}$ où $\sigma_{pmi}(x)$ est égale à $\sigma_{pi}(x)$, tension initiale de l'armature, dans le cas de la post-tension, et à la tension à l'origine diminuée des pertes à la mise en tension (article 3.4.11 du Règlement) dans le cas de la pré-tension

$$\begin{aligned} k_1 &= 6 \times 10^{-3} \text{ si } \rho_{1000} \leq 2,5 \\ &= 8 \times 10^{-3} \text{ si } \rho_{1000} > 2,5 \end{aligned}$$

Figure 13 : Coefficient k associé au coefficient de frottement en ligne - extrait du BPEL annexe 2

Pour les câbles extérieurs, le coefficient de frottement en courbe est de 0.20 rad^{-1} dans la N100.

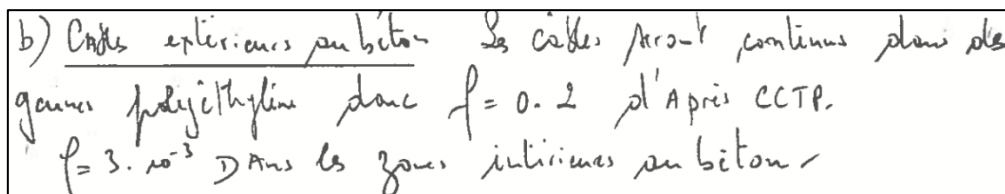


Figure 14 : Coefficients de frottement en angulaire et en ligne pour les câbles extérieurs

D'après l'agrément technique ATE 06-0226 de 2018 de Freyssinet, le coefficient de frottement en courbe se situe plutôt entre $f=0.10 \text{ rad}^{-1}$ et 0.12 rad^{-1} . Nous retenons un coefficient de frottement en courbe $f=0.11 \text{ rad}^{-1}$ au lieu de 0.20 rad^{-1} , conformément à l'ATE n°06/0226. Cette valeur traduit une réalité physique : un toron clair dans une gaine PEHD frotte beaucoup moins qu'un toron clair dans une gaine feuillard en acier.

Use	Duct Type	Friction Coefficient μ (rad ⁻¹)		Wobble factor k (rad/m)
		Lubricated Strand	Unlubricated Strand	
Internal Prestressing	Corrugated steel sheath	0,17	0,19 ¹	0,007 ¹
	LFC ³ Corrugated steel sheath	0,10	0,12	0,007 ¹
	Corrugated plastic sheath	0,10	0,12	0,007 ¹
External Prestressing	Steel pipe	0,16	0,24	0,007 ¹
	HDPE pipe	0,10	0,12	0
	Steel pipe	0,16	0,24	0

Figure 15 : Coefficient de frottement des câbles existants revu (extrait ATE Freyssinet)

Ces valeurs sont d'ailleurs reprises par la norme NF EN1992-1-1 :

Tableau 5.1 : Coefficients de frottement μ pour les armatures de précontrainte par post-tension — Armatures intérieures et armatures extérieures non-adhérentes

	Armatures intérieures ¹⁾	Armatures extérieures (non-adhérentes)			
		Gaine en acier / non graissé	Gaine en PEHD / non graissé	Gaine en acier / graissé	Gaine en PEHD / graissé
Fil tréfilé à froid	0,17	0,25	0,14	0,18	0,12
Toron	0,19	0,24	0,12	0,16	0,10
Barre non lisse	0,65	—	—	—	—
Barre lisse	0,33	—	—	—	—

1) Dans le cas d'armatures remplissant environ la moitié de la gaine.

NOTE PEHD — polyéthylène haute densité.

Figure 16 : Coefficient de frottement pour précontrainte par post-tension (NF EN1992-1-1)

Ci-dessous un récapitulatif de l'ensemble des câbles de précontrainte longitudinale :

Câbles de fléau - 36 câbles par fléau (18 de chaque côté) :

N°	Voussoir d'ancrage 1	Voussoir d'ancrage 2	L (m)
1-P	1	01A	9,3
2-P	2	02A	16,2
3-P	3	03A	23,0
4-P	4	04A	29,9
5-P	5	05A	36,8
6-P	6	06A	43,6
7-P	7	07A	50,5
8-P	8	08A	57,4
9-P	9	09A	64,3
10-P	10	10A	71,2
11-P	11	11A	78,1
12-P	12	12A	85,0
13-P	13	13A	91,9
23-P	3	03A	26,3
25-P	5	05A	40,1
27-P	7	07A	53,8
28-P	8	08A	60,7
29-P	9	09A	67,5
130-P	13	13A	88,1

Figure 17 : Récapitulatif des câbles de fléau

Remarque : Les câbles additionnels de fléau 130-P n'ont pas été mis en œuvre à la construction de l'ouvrage.

Câbles d'éclisse - 12 câbles par travée courante (6 de chaque côté) et 2 par travée de rive (1 de chaque côté) :

N°	Voussoir d'ancrage 1	Voussoir d'ancrage 2	L (m)
7-T	7	07A	51,9
8-T	8	08A	45,0
9-T	9	9A	38,2
10-T	10	10A	31,3
11-T	11	11A	24,4
12-T	12	12A	17,5
1-T1	0A - T1	9 - T1	33,6
102-T1	2A - T1	11 - T1	20,8
1-T7	9A - T7	0 - T7	38,1
102-T7	11A - T7	1 - T7	14,0

Figure 18 : Récapitulatif des câbles d'éclisse

Remarque : les câbles additionnels 102 en travée 1 et 7 n'ont pas été mis en œuvre à la construction de l'ouvrage.

La mise en tension des câbles intérieurs se fait d'un seul côté (voir la sortie du calcul électronique de la N420 dans « données ») :

52 TENSION DATE=75 TENG=2544 TEND=0 RENG=0.006 REND=0

Câbles extérieurs – 12 câbles par travée courante (6 de chaque côté) :

N°	Voussoir d'ancrage 1	Voussoir d'ancrage 2	L (m)
E-12A	0A - C0	0A - P2	169,7
E-12B	0A - C0	0A - P2	169,6
E-12C	0A - C0	0A - P2	169,7
E-1A	0A - C0	0A - P1	70,6
E-1B	0A - C0	0A - P1	70,4
E-1C	0A - C0	0A - P1	70,4
E-23A	0A - P1	0A - P3	205,4
E-23B	0A - P1	0A - P3	205,3
E-23C	0A - P1	0A - P3	206,4
E-34A	0A - P2	0A - P4	206,4
E-34B	0A - P2	0A - P4	206,4
E-34C	0A - P2	0A - P4	206,4
E-45A	0A - P3	0A - P5	206,4
E-45B	0A - P3	0A - P5	206,4
E-45C	0A - P3	0A - P5	206,4
E-56A	0A - P4	0A - P6	206,4
E-56B	0A - P4	0A - P6	206,4
E-56C	0A - P4	0A - P6	206,4
E-67A	0A - P5	0 - C7	166,2
E-67B	0A - P5	0 - C7	166,0
E-67C	0A - P5	0 - C7	166,0
E-7B	0A - P6	0 - C7	63,7
E-7C	0A - P6	0 - C7	64,3

Figure 19 : Récapitulatif des câbles extérieurs

Nous pouvons noter une particularité sur la travée 7, qui compte 5 câbles extérieurs de chaque côté de l'axe de l'ouvrage au lieu de 6 :

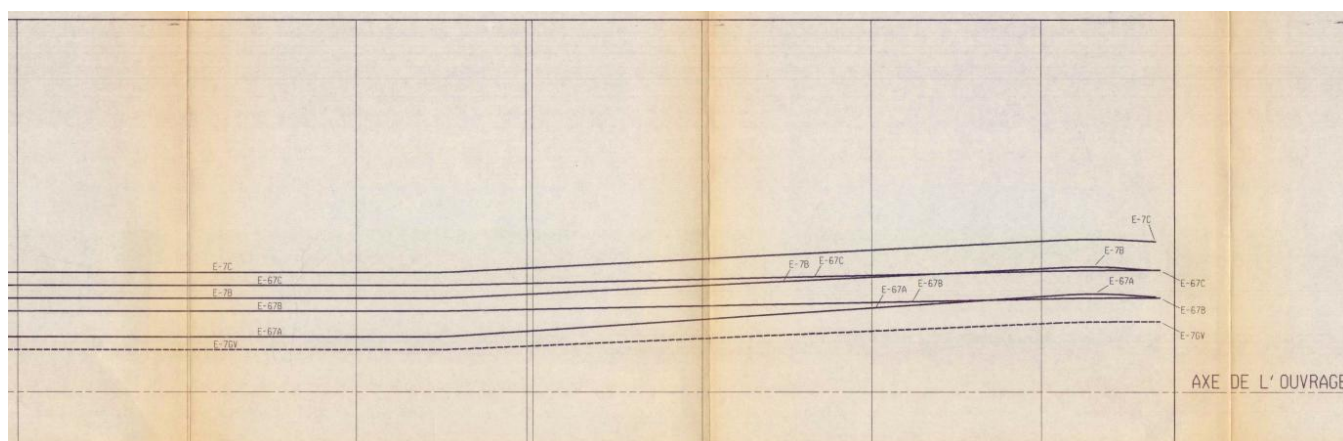


Figure 20 : Extrait de la vue en plan des câbles extérieurs sur la travée 7 - P457

La mise en tension des câbles extérieurs se fait des deux côtés (voir la sortie du calcul électronique de la N420 dans « données ») :

TENSION NOMBRE=12 DATE=75 TENG=4028 TEND=4028 RENG=0.006 REND=0.006

Plusieurs visites et diagnostics de l'ouvrage ont été réalisés sur l'ouvrage : l'investigation de la précontrainte extérieure réalisée par le Cerema date de 2021 et fait référence à deux visites spécifiques de la DIRA de 2018 et 2019.

Nous avons repris les conclusions de ce rapport d'analyse et ainsi nous retenons les hypothèses de modélisation suivantes pour le PRO :

- Prise en compte de la rupture d'un toron (survenue à la construction) pour le câble E12A de la ligne amont,
- Prise en compte de la rupture de 3 torons (survenue à la construction) pour le câble E23C de la ligne aval,
- Hypothèse supplémentaire prise compte tenue de l'incertitude de rupture des torons sur le câble E34C ou E45C : on considère la rupture de 3 torons sur le câble E34C, ce qui est plus défavorable car pourrait avoir une plus forte incidence sur la flèche à mi-travée de la 3^{ème} travée sur gabarit fluvial.

4.2 Précontrainte extérieure additionnelle

4.2.1 Dispositions préalables sur l'ouvrage existant

Des réservations pour le passage de câbles additionnels de précontrainte extérieure d'unité 19T15 ont été prévues dès la construction de l'ouvrage. Pour le dimensionnement des VSP, VSC et déviateurs, devant résister aux actions concentrées de la précontraintes, l'action des câbles de précontrainte extérieure additionnelle en 19T15 a été prise en compte dès l'origine (cf. NDC DOE).

Les câbles additionnels sont numérotés sur les plans de récolement :

- E-12GV traversant les travées T1 et T2,
- E-34GV traversant les travées T3 et T4,
- E-56GV traversant les travées T5 et T6
- et E-7GV traversant la travée T7.

Dans notre cahier de plan technique nous reprenons la même numérotation.

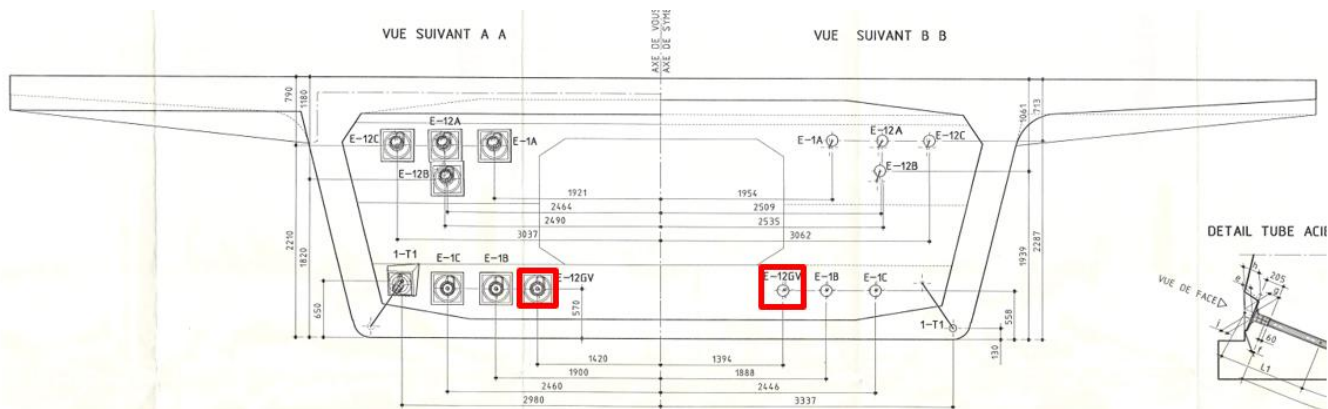


Figure 21 : Emplacement des réservations de câbles (VSC culée C0)

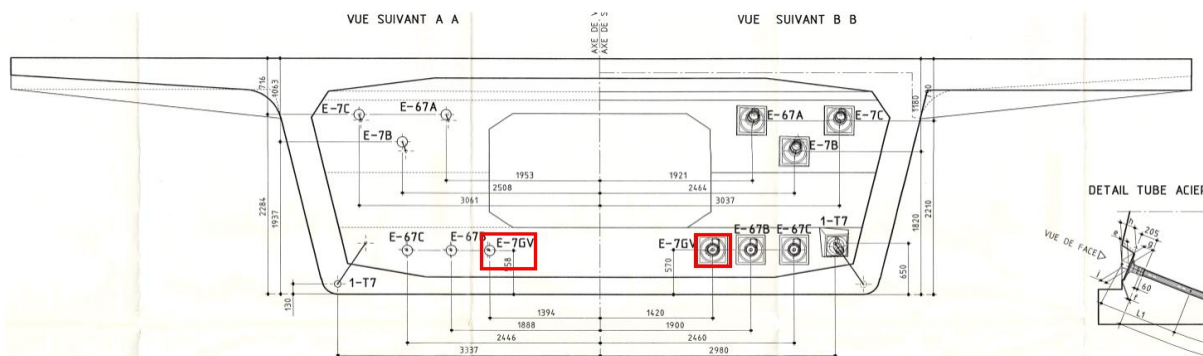


Figure 22 : Emplacement des réservations de câbles (VSC culée C7)

Au droit des VSP les points de passage des câbles de précontrainte extérieure additionnelle sont dénommés « J1 » et « K » pour les ancrages et « J2 » pour les passages filants.

ANCRE	FILANT	VSP1	VSP2	VSP3	VSP4	VSP5	VSP6
A		E-23C	E-34C	E-45C	E-56C	E-67C	E-7C
	B	E-12C	E-23C	E-34C	E-45C	E-56C	E-67C
C		E-1C	E-12C	E-23C	E-34C	E-45C	E-56C
D		E-23B	E-34B	E-45B	E-56B	E-67B	E-7B
	E	E-12B	E-23B	E-34B	E-45B	E-56B	E-67B
F		E-1B	E-12B	E-23B	E-34B	E-45B	E-56B
G		E-23A	E-34A	E-45A	E-56A	E-67A	
	H	E-12A	E-23A	E-34A	E-45A	E-56A	E-67A
I		E-1A	E-12A	E-23A	E-34A	E-45A	E-56A
J1			E-34GV		E-56GV		E-7GV
	J2	E-12GV		E-34GV		E-56GV	
K			E-12GV		E-34GV		E-56GV

Figure 23: Dénomination points de passage pour câbles additionnels (extrait plan P431)

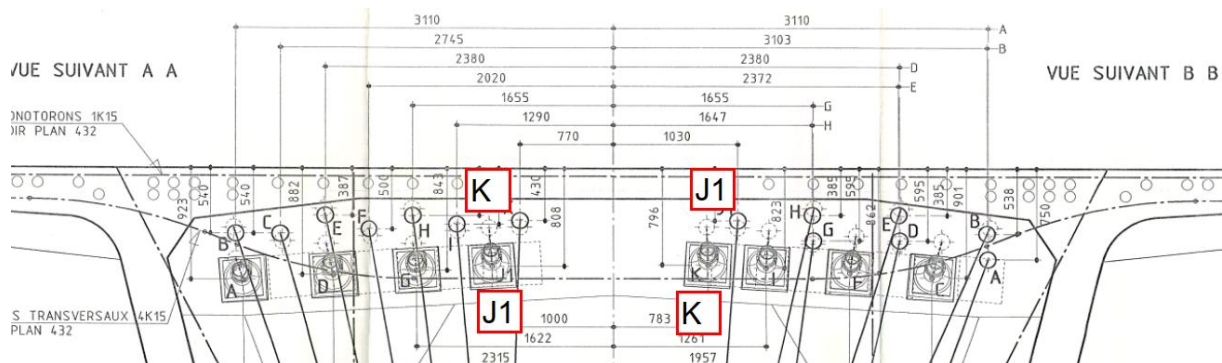


Figure 24: Deux demi-élevations de VSP avec ancrage de précontrainte additionnelle au droit pour VSP2, VSP4, VSP6 (extrait plan P431)

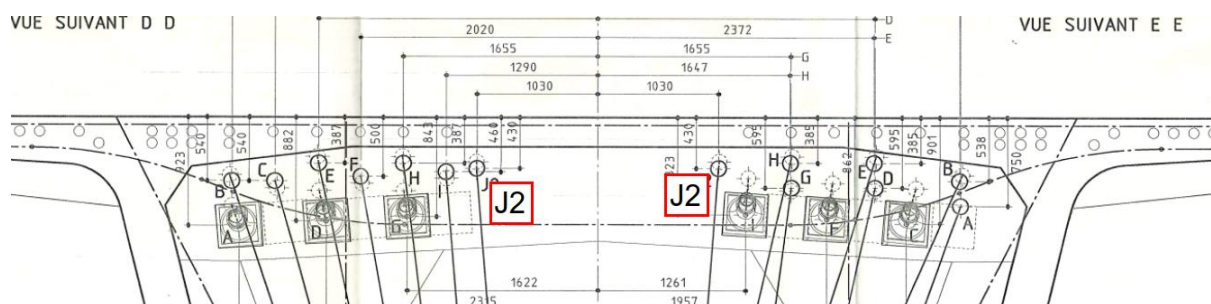
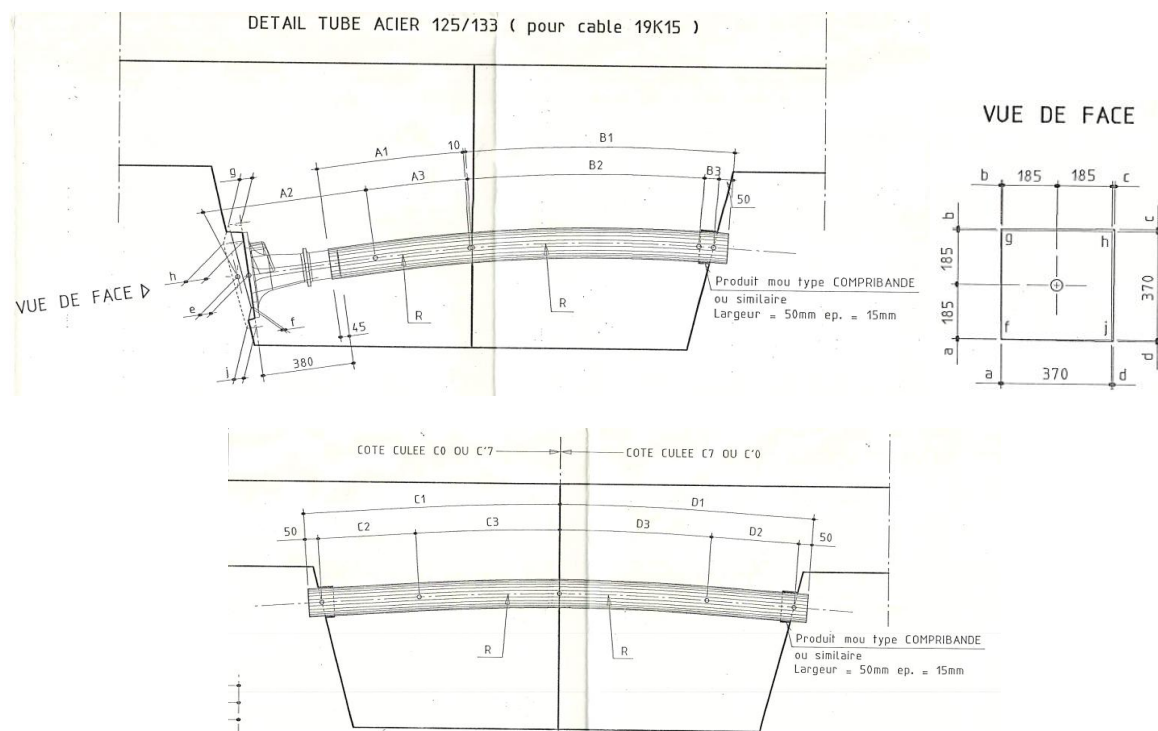


Figure 25: : Deux demi-élevations de VSP avec passage pour la précontrainte additionnelle au droit pour VSP1, VSP3, VSP5 (extrait plan P431)



NOTA : La précontrainte extérieure est du type démontable

		R	A1	A2	A3	B1	B2	B3	a	b	c	d	e	f	g	h	j
Tûbe Ø 125/133 pour câble 19K15	A	5000	649.5	558	474	1114	818	246	2	6.5	11.5	6.5	37.5	10	38	66	37
	C	4000	688	558	510	1175	1054	71	11	7	2	5.5	35	62	40	10	30
	D	4000	692.5	558	504	1157	887	220	3	2	6	7	24.5	16	10	33	39.5
	F	4000	703	558	520	1185	1033	102	9	5	2	5.5	30	51	29	10	31
	G	5000	694.5	558	503	1157	985	122	2	4	6	4	21.5	10	21	34	22
	I	4000	719.5	558	531	1196	1020	126	7	3	2	5.5	24.5	40	18	10	31
	J1	4000	724	558	537	1204	1049	105	6	2	3	7.5	26	34	10	18	43
	K	4000	729	558	539	1204	1021	133	5.5	2	3	6.5	23	31	10	15	37

Figure 26: Détails de la géométrie des ancrages et des gaines de passage pour les VSP (extrait plan P432)

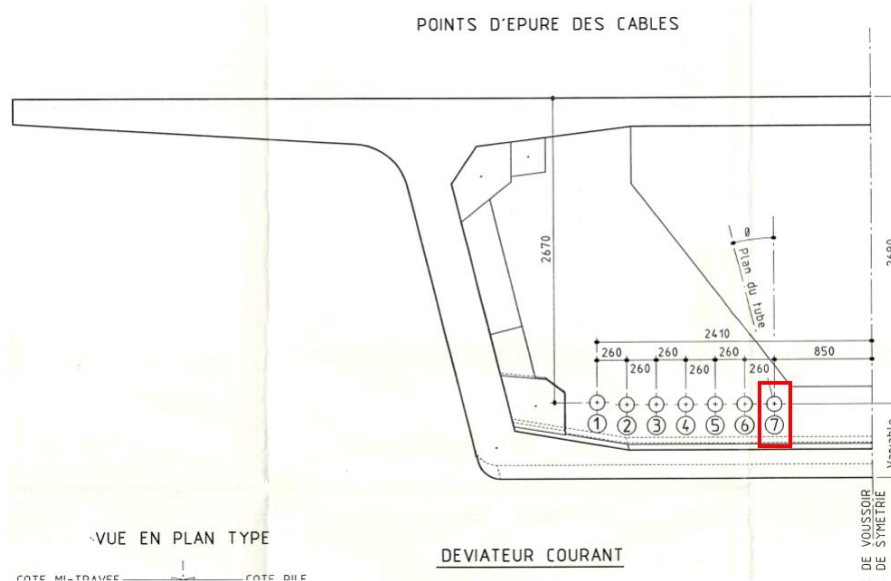


Figure 27: Position de passage du câble de précontrainte extérieure additionnelle au droit d'un voussoir déviateur (extrait plan P435)

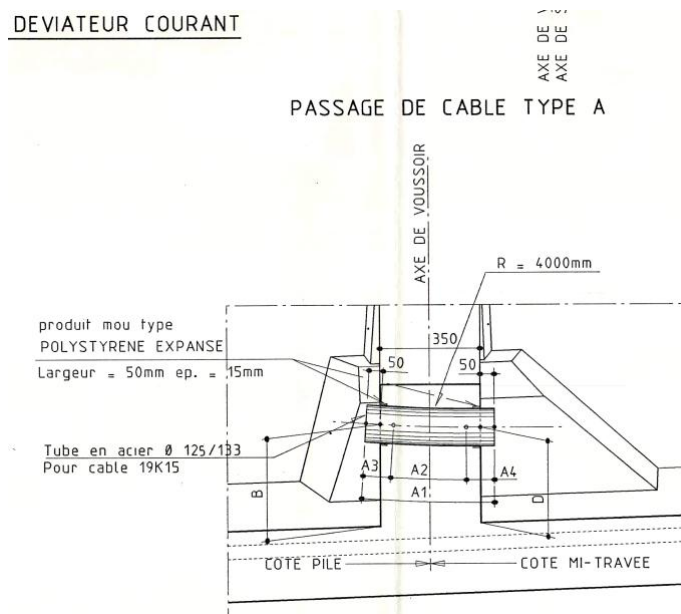


Figure 28: Détail de la géométrie du tube de passage pour câble 19T15 dans un voussoir déviateur (extrait plan P435)

4.2.2 Procédé et caractéristiques mécaniques de la précontrainte additionnelle extérieure

Le procédé retenu par le groupement pour la précontrainte additionnelle extérieure est le « BBR VT CONA CME External Post-tensioning System » couvert par l'European Technical Assessment ETA – 07/0168.

Les câbles sont constitués de 19 torons type T15S ($A_p=150 \text{ mm}^2$ par toron) classe 1860.

Les câbles seront constitués de torons clairs injectés à la cire pétrolière.

Leur enfilage dans les gaines existantes se fera sans impact sur la circulation, la mise en tension sera réalisée sous coupure totale de circulation sur l'ouvrage. Nous avons dimensionné le renforcement en considérant la mise en tension d'un seul côté, face culée C7 pour l'ensemble des câbles additionnels.

Les caractéristiques mécaniques sont les suivantes :

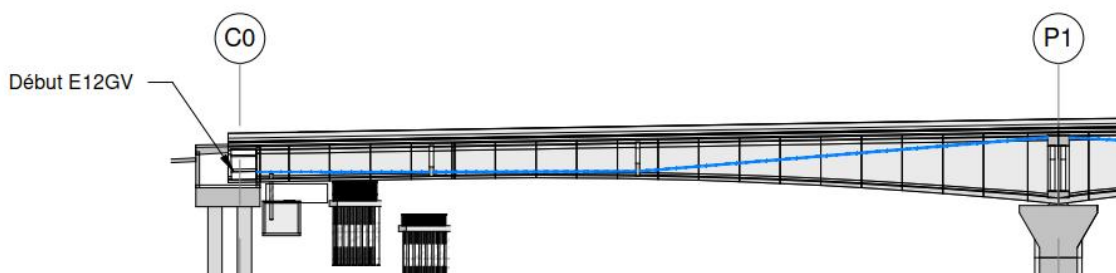
Item	Donnée	Référence	
		Document	Article
Désignation Précontrainte:	Extérieure		
Type de protection :	Cire pétrolière	CCTP	
N° ETE:	07/0168		
Unités de précontrainte	19 T15,7		
section du câble (A_p)	2850 mm²		
Type d'armatures	T15,7-1860MPa-TBR huilé	Pr EN10138-3	
section du toron	150 mm ²		
F_{pk}	279 kN		
$F_{0,1}$	246 kN		
Module Elasticité (E)	195 GPa		
Désignation BBR du câble	CME BT 1906-150 1860		

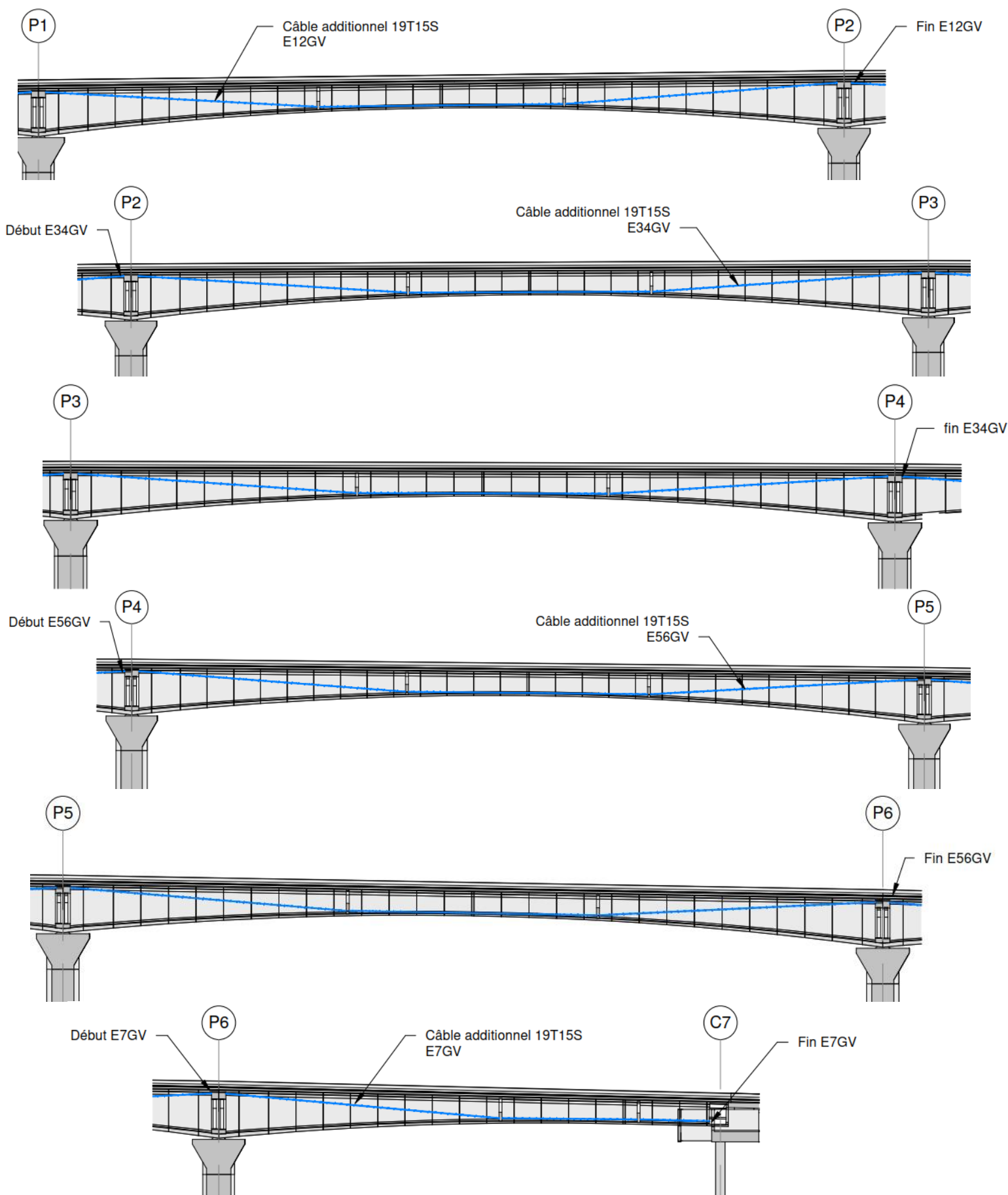
Nous retenons :

- Un coefficient de frottement en courbe $f= 0.11 \text{ rad}^{-1}$
- Un recul d'ancrage de 6 mm
- Une perte par relaxation à 1000h de 2.5%

4.2.3 Conclusions sur la précontrainte additionnelle

Les images suivantes montrent le profil longitudinal de la précontrainte extérieure additionnelle qui sera mise en œuvre pour reprendre les charges de la passerelle





Les longueurs des câbles se résument ainsi :

- 2 câbles E12GV (travée T1 et T2) : 173m
- 2 câbles E34GV (travée T3 et T4) : 206m
- 2 câbles E56GV (travée T5 et T6) : 206m
- 2 câbles E7GV (travée T7) : 65m

5 Renforcement en tissu de carbone (PRFC)

5.1 Choix du procédé

Un renforcement en tissu de carbone type SikaWrap sera employé pour reprendre le déficit de ferrailage passif de cisaillement et de flexion transversale de certains voussoirs au droit des consoles d'ancrage de la passerelle, sur la face extérieure des âmes. Il s'agit d'un procédé de renforcement type Polymères Renforcés de Fibres de Carbone (PRFC).

Ce procédé est couvert par l'avis technique n°33/19-1005_V3. Les propriétés mécaniques du renfort composite (résistance à la traction, module d'élasticité) déterminées conformément à la norme ISO 527-5.

En particulier nous prévoyons la mise en place d'un renforcement type SikaWrap 600C.

Propriétés de calcul / Composites	SikaWrap®-230 C – Sikadur®-330	SikaWrap®-300 C – Sikadur®-330	SikaWrap®-600 C – Sikadur®-300
Module d'élasticité, valeur moyenne, E_f	225 000 MPa	225 000 MPa	235 000 MPa
Résistance moyenne en traction, f_{fu}	3500 MPa	3500 MPa	2950 MPa
Allongement à la rupture valeur moyenne, ε_{fu}	1,7 %	1,7 %	1,4 %
Résistance de calcul ELU, f_{fud}	1625 MPa	1625 MPa	1370 MPa
Allongement de calcul ELU, ε_{fud}	0,72 %	0,72 %	0,6 %
Résistance de calcul ELS, f_{fd}	1138 MPa	1138 MPa	960 MPa
Épaisseur nominale, t_r [mm] tissu sec	0,13	0,167	0,33

Figure 30 : Propriétés de calcul / composites du SikaWrap 600C selon les recommandations de l'AFGC

Caractéristiques des composites SikaWrap®						
Propriétés de calcul / Composites	SikaWrap®-230 C – Sikadur®-330		SikaWrap®-300 C – Sikadur®-330			SikaWrap®-600 C – Sikadur®-300
Largeur (mm)	300	600	100	300	600	300

Figure 31 : Largeurs de bande pour un SikaWrap 600C

5.2 Conclusions sur le renforcement en tissu de carbone

Le renforcement en tissu de carbone sera mis en œuvre sur la face externe de l'âme amont du caisson amont du pont François Mitterrand. Il sera mis en œuvre avant la pose des consoles de la passerelle, à l'axe de la nervure du voussoir, entre les carottages pour les barres de précontrainte sans empiéter sur la position de celles-ci.

Le tableau suivant fournit la liste des voussoirs concernés par le renforcement en tissu de carbone ainsi que la quantité de tissu à mettre en œuvre.

Travée	T1		T2 à T6				T7	
Voussoir	RG type 8 (V04A)	RG type 9 (V14)	V12	V14	V14A	V12A	RD type 10 (V12A)	RD type 11 (V14A)
Produit	SikaWrap 600C (ép. 0.331mm)							
Nombre de bande (u)	2	2	2	2	2	2	2	2
Nombre de couches (u)	4	3	2	1	1	2	2	3
Largeur bande (m)	0.3							
Hauteur bande (m)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
A section (cm ²)	7.94	5.96	3.97	1.99	1.99	3.97	3.97	5.96
A surface (cm ²)	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000

Les images suivantes montrent des extraits du cahier de plan technique PRO au sujet des renforcements en tissu de carbone.

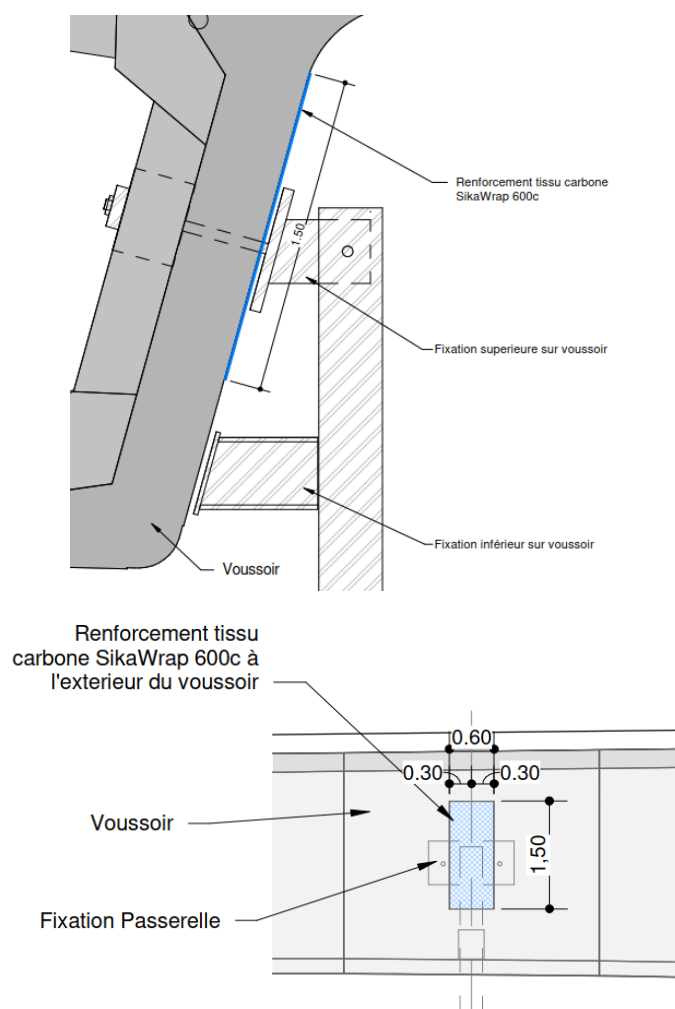


Figure 32: Détail du renforcement en tissu de carbone - extrait du cahier de plan technique PRO

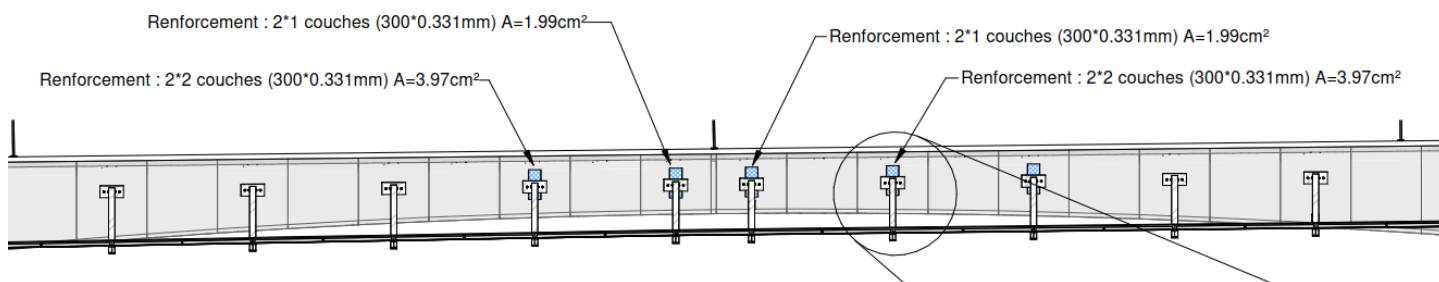


Figure 33: Renforcement en tissu de carbone sur travée courante - extrait du cahier de plan technique PRO

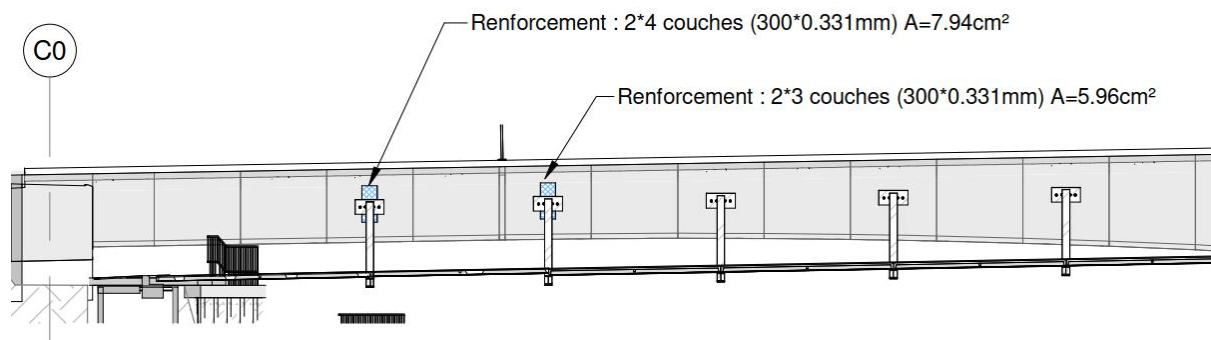


Figure 34 : Renforcement en tissu de carbone sur travée de rive gauche - extrait du cahier de plan technique PRO

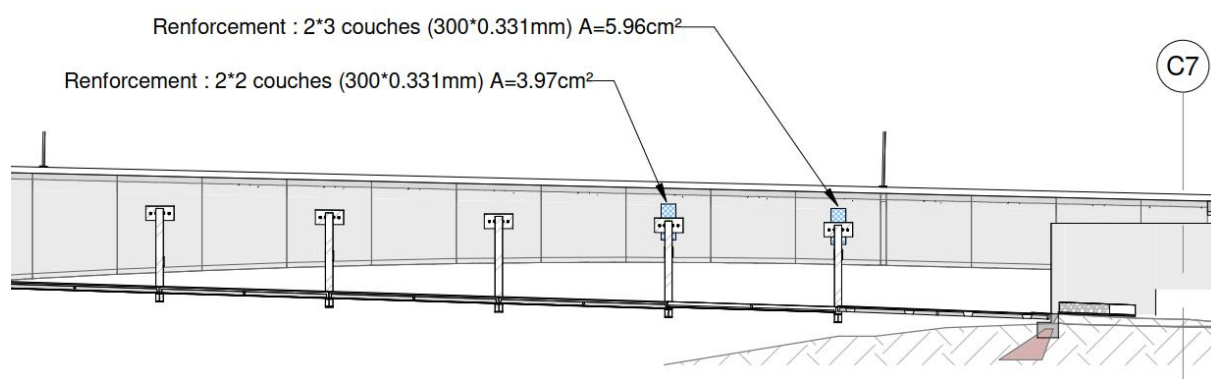


Figure 35: Renforcement en tissu de carbone sur travée de rive droite - extrait du cahier de plan technique PRO

5.3 Mise en œuvre

Les modalités de mise en œuvre et collage du tissu de carbone devront respecter l'ATE, et notamment (liste non exhaustive) :

- Travaux préparatoires :
 - Préparation du support
 - Vérification de la cohésion superficielle du béton support
 - Aspect de surface après décapage
- Conditions climatiques de pose : Le support doit être à l'abri de la pluie et de toute arrivée d'eau. Il ne doit pas être gelé, ni présenter de film d'eau en surface au moment de la mise en œuvre des produits de collage.
- Non condensation du support : les opérations de collage de renforts PRFC ne doivent pas débuter s'il y a un risque de condensation sur le support. Les contrôles périodiques de non-condensation sont à réaliser préalablement au démarrage du malaxage du produit de collage.
- Plage de températures (support et ambiance) recommandée : entre +8°C et +35°C.

- Finition et protection du procédé : une protection anti UV sera réalisée. L'entreprise veillera à limiter le débordement excessif du produit de collage lors du marouflage, afin de garantir un aspect qualitatif de la surface renforcée du voussoir.
- Circulation sur l'ouvrage durant le collage du tissu carbone : le renforcement concerne la face externe des âmes de certains voussoirs pour reprise de la flexion locale induite par la passerelle. Sous l'effet des charges routières du pont F. Mitterrand les âmes des voussoirs ne subissent pas de déformation qui pourrait être nuisible au durcissement et maturation des polymères constituant la colle. Ainsi aucune contrainte d'exploitation de l'ouvrage n'est requise durant la mise en œuvre des renforcements et polymérisation des colles.
- Contrôle des travaux : avant et après mise en œuvre.

5.4 Adhérence du support béton

La résistance moyenne à la traction du support béton f_{tk} doit être systématiquement vérifiée par des essais de pastillage réalisés en se basant sur la norme NF EN 1542, avant la mise en œuvre des renforts. Dans tous les cas, le procédé SikaWrap n'est pas applicable si les essais de pastillage donnent une valeur de $f_{tk} < 1,5$ MPa.

Or, le diagnostic réalisé par Sixense en 2022 montre les résultats pour deux essais.

La cohésion superficielle est caractérisée par un essai d'arrachement en traction directe (ou essais de « pastillage ») effectué sur cinq (5) pastilles.

- > Norme de référence : NF EN 1542
- > Méthodologie suivie : Celle décrite par la fiche B1-7 de L'IFSTTAR
- > Position des surfaces : verticale uniquement
- > Colle utilisée : TOPFIX NA 41
- > Température d'application : entre 20 et 30°C
- > Durée de séchage de la colle : entre 20 et 40h (avec séchage du parement au préalable par décapage thermique – état du support sec)

Dimension	50 mm	MPa = N/mm ²
Surface	1963,50 mm ²	Valeurs s'écartant de + ou - 20% de la valeurs moyenne

Zone	N°	Mesure in-situ (kN)	Profil de rupture	Contrainte (MPa)	Ecart moyenne (%)	Moyenne
Voussoir T1 - 00A	1	6,7	type 1	3,41	+152,83	1,35 MPa
	2	Non déterminée	type 3	0,00	-	
	3	0,5	type 2a	0,25	-81,13	
	4	1	type 4b	0,51	-62,26	
	5	2,4	type 4b	1,22	-9,43	

Zone	N°	Mesure in-situ (kN)	Profil de rupture	Contrainte (MPa)	Ecart moyenne (%)	Moyenne
Voussoir T1 - 01A	1	3,7	type 4b	1,88	-49,32	3,72 MPa
	2	6,2	type 1	3,16	-15,07	
	3	5,9	type 4b	3,00	-19,18	
	4	9,1	type 1	4,63	+24,66	
	5	11,6	type 1	5,91	+58,90	

Commentaires :

Les essais ont été effectués sur 2 zones en extrémité de caisson en travée 1 (voussoirs 00A et 01A). Les parements ne présentaient aucun désordre apparent au moment de l'essai.

Les résultats obtenus sur la zone 2 (voussoir 01A) nous semblent faibles au regard de la qualité générale du béton et sa compacité. Sur cette zone, la contrainte d'adhérence moyenne obtenue est de 3,7 MPa (et 4,2 MPa si on écarte la pastille 1).

Sur la zone 1 (voussoir 00A), les valeurs obtenues nous semblent inexploitable dans la mesure où elles sont très hétérogènes et globalement très faibles.

Et en conclusion :

Les essais de cohésion superficielle du béton ont été effectués sur 2 zones en extrémité de caisson en travée 1 (voussoirs 00A et 01A). Les parements ne présentaient aucun désordre apparent au moment de l'essai.

Les résultats obtenus sur la zone 2 (voussoir 01A) nous semblent faibles au regard de la qualité générale du béton et de sa compacité. Sur cette zone, la contrainte d'adhérence moyenne obtenue est de 3,7 MPa (et 4,2 MPa si l'on écarte la pastille 1).

Sur la zone 1 (voussoir 00A), les valeurs obtenues nous semblent inexploitable dans la mesure où elles sont très hétérogènes et globalement très faibles.

Avant la mise en œuvre du renforcement, un test adhérence sera réalisé pour vérifier que la valeur de la résistance moyenne à la traction du support béton f_{tk} est au moins égale à 1.5MPa.

6 Approche et méthodologie de justification de l'ouvrage existant et de dimensionnement des renforcements

Conformément au programme de la mission, la justification du pont existant François Mitterrand est réalisée sur la base du corpus réglementaire de l'époque de la conception, soit le BPEL 83.

La justification de l'ouvrage est réalisée suivant cette méthodologie :

- Choix d'un schéma statique pour la liaison entre la passerelle et le voussoir : liaison isostatique avec une rotule en partie haute et un simple appui de contact acier/béton en partie inférieure.
- Etablissement d'un dimensionnement initial de la structure de la passerelle : platelage, charpente métallique et ancrages.
- Application de QAV sur le poids des différents constituant la passerelle : poids propre structures, revêtements, équipements.
- L'étude structurale pour l'ouvrage existant se décline ainsi en deux phases :
 - Flexion longitudinale : un modèle de calcul aux éléments finis est réalisé à l'aide du logiciel Pythagore (développé par setec tpi). Ce modèle inclut l'ensemble de la précontrainte existante et additionnelle extérieure, ainsi que le phasage de construction. Les phénomènes de retrait, fluage scientifique, et de perte de précontrainte instantanée et différée sont gérés et calculés par le logiciel.

La validation du modèle est menée par une comparaison de résultats partiels et finaux avec ceux de la conception initiale et formalisée par une note technique spécifique (cf. [23]).

La descente de charge à l'ELS Quasi-Permanent (G), l'ELS Rare (G+Q) et l'ELU Fondamental (1.35G+1.50Q) est appliquée au modèle de flexion longitudinale, avec prise en compte de l'excentricité des charges permanentes et d'exploitation. Pour l'analyse longitudinale la charge de véhicule de service n'est pas considérée car non dimensionnante, en comparaison avec la charge de foule.

La précontrainte probable P_m est retenue pour le calcul de flexion longitudinale, tant pour la précontrainte existante que pour l'additionnelle.

Plusieurs vérifications sont menées sur la base des résultats du modèle de flexion longitudinale :

- Vérification des contraintes normales en tout point des sections transversales à l'ELS rare conformément au BPEL 83 :
 - Contraintes minimales : 0 MPa (non-décompression du béton) ;
 - Contraintes maximales : $0,9 \cdot 0,6 \cdot f_{c28} = 18.9 \text{ MPa}$
- Vérification des contraintes maximales du béton à l'ELS Quasi-Permanent
- Vérification des contraintes de cisaillement à l'ELS Rare : $0,9 \cdot 0,6 \cdot f_{c28} = 15.8 \text{ MPa}$
- Vérification des contraintes de cisaillement à l'ELU Fondamental

La précontrainte additionnelle est ainsi dimensionnée et vérifiée afin de respecter l'ensemble des justification ici mentionnées, sous l'effet des charges de l'ouvrage existant et de la passerelle.

Le ferrailage passif de cisaillement dû aux effets de cisaillement pour effort tranchant et torsion est également calculé sur la base des résultats issus du modèle de flexion longitudinale.

- Flexion locale et évaluation du renforcement par tissu en carbone (PRFC) : un modèle aux éléments finis de type coque est réalisé à l'aide du logiciel Pythagore. Ce modèle paramétrique qui permet de modéliser l'ensemble des géométrie et de descente de charge présentes sur le projet, fournit les résultats locaux en termes de flexion de la nervure et de l'âme du voussoirs au droit des fixations des consoles de la passerelle.

Un calcul de ferrailage local est ainsi mené sur la base d'une combinaison ELS Rare, avec limitation de la contrainte de ferrailage à 240MPa.

Ensuite nous réalisons un bilan du ferrailage passifs dans les voussoirs (âme, hourdis supérieur et inférieur) nécessaire pour la reprise des efforts de l'ouvrage existant afin de déterminer les marges de ferrailage suivant les deux termes prépondérantes (règle de cumul de la conception) :

- Ferrailage n°1 : cisaillement suivant tranchant/torsion + diffusion de la précontrainte + poussée au vide (uniquement le terme de traction pour les âmes)
- Ferrailage n°2 : flexion transversale + poussée au vide (uniquement le terme de flexion pour âmes et hourdis)

Nous comparons la marge disponible de ferrailage passif aux armatures calculées dans les voussoirs sous l'effet de la passerelle :

- Effets de cisaillement sous effort tranchant et torsion obtenus par le calcul de flexion longitudinale → à comparer aux marges obtenues pour le ferrailage n°1
- Effets de flexion locale transversale obtenus par le modèle de calcul de flexion locale → à comparer aux marges obtenues pour le ferrailage n°2

Ainsi nous pouvons identifier les déficits de ferrailage et les voussoirs concernés.

Notre étude montre que 4 voussoirs de chaque travée courante et les voussoirs sous les deux consoles à chaque extrémité nécessitent un renforcement en face externe de l'âme, coté passerelle.

Le calcul du renforcement en tissus en carbone (PRFC) est ainsi réalisé conformément à la méthode décrite dans le guide AFGC.