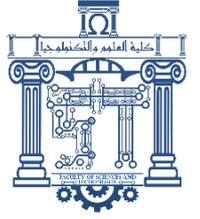




الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
Republique Algerienne Democratique Et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي التبسي - تبسة

Université Larbi Tébessi- Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil

## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique

En : Travaux Publics

Spécialité : Voies et Ouvrages d'arts

Par : DJABRI Amine  
BOUALI Arezki

Sujet

**Etude du tablier d'un pont caisson à voussoirs  
préfabriqués en béton précontraint suivant les  
Eurocodes**

Présenté le 23/06/2021, devant le jury composé de :

Mr Atmania Brahim  
Mr Soltani Med Redha  
Mr Labed Abderrahim

MCB  
MCB  
MCB

Président  
Rapporteur  
Examineur 1

Promotion : 2020/2021

# *Dédicaces*

*Tout d'abord, nous tenons à remercier Allah,  
le clément et le miséricordieux de nous avoir donné la santé et le courage  
pour bien mener ce modeste travail.*

*Je dédie ce travail accompagné de profond d'amour*

*A la mémoire de mon père, mon exemple éternel, mon soutien moral et  
source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me  
voir réussir, qu'Allah le garde dans son vaste paradis. A ma très chère  
mère, qui ma encouragé à aller de l'avant et qui me donne toujours  
l'espoir de vivre et qui n'a jamais cessé de prier pour moi, qu'Allah la  
garde.*

*A ma petite sœur **Indji rachel***

*A toute ma famille, mes amis et mes collègues de ma promo VOA.*

*A mon encadreur **Dr.SOLTANI Mohamed Redha** qui m'a donné tant  
de temps, d'efforts et expérience, je le remercie infiniment.*

# ***Dédicaces***

*Tout d'abord, nous tenons à remercier Allah,  
le clément et le miséricordieux de nous avoir donné la santé et le courage  
pour bien mener ce modeste travail.*

*Je dédie ce travail accompagné de profond d'amour :*

*A la mémoire de mon père, mon exemple éternel, mon soutien  
moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié  
pour me voir réussir, qu'Allah le garde dans son vaste paradis. A ma très  
chère mère, qui ma encouragé à aller de l'avant et qui me donne  
toujours l'espoir de vivre et qui n'a jamais cessé de prier pour moi,  
qu'Allah la garde.*

*A tous mes frères, pour leur grand amour et leur soutien, et surtout  
mon petit frère **Mohamed***

*A toute ma famille et les amis et mes collègues de ma promo VOA.*

*A mon encadreur **Dr SOLTANI Mohamed Redha**, qui m'a  
donné tant de temps, d'efforts et expérience, je le remercie infiniment.*

*Et n'oublie pas mon binôme **BOUALI Arezki***

*Merci d'être toujours là pour moi ...*

## **Remerciements**

Le plus grand remerciement à ALLAH, créateur de l'univers de nous avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le bonheur.

Je tiens d'abord à exprimer toute ma gratitude à mon encadreur le professeur Dr. SOLTANI Med Redha, pour avoir proposé ce sujet et suivi fidèlement notre parcours, pour ses remarques judicieuses et constructives qui ont contribué à l'amélioration de ce mémoire, ainsi que pour ses qualités pédagogiques et l'enthousiasme communicatif dont il a su faire preuve. C'est à la fois un privilège et une expérience exceptionnelle d'avoir pu bénéficier de ses conseils qui nous ont guidé et nous guideront encore les années à venir, que dieu le protège.

Nos remerciements s'adressent également aux membres du jury Dr. Athmania Brahim et Dr. Labed Abderrahim pour l'intérêt, les conseils et les remarques qu'ils ont porté notre travail.

Nous remercions tous nos enseignants qui nous ont accompagné durant toute notre formation ainsi que le personnel administratif de l'université de Tébessa.

Merci à tous

# Table des matières

Résumé

Remerciements

Dédicaces

Liste des Figures

Liste des Tableaux

## CHAPITRE 1: Présentation Du Projet

1.1. Situation et description du projet.....	02
1.2. Données géologiques et géotechniques.....	05
1.3. Données relatives à l'environnement .....	05
1.4. Classe d'exposition de l'ouvrage .....	06
1.5. Construction par encorbellement successif .....	07
1.5.1. Technique du Procédé .....	07
1.5.2. Domaine d'emploi.....	07
1.5.3. La construction par voussoirs préfabriquées.....	08
1.5.3.1. L'atelier de préfabrication de voussoirs.....	09
1.5.3.2. Le transport des voussoirs préfabriqués .....	10
1.5.3.3. La pose des voussoirs préfabriqués.....	11
1.5.3.4. Le brèlage provisoire.....	13
1.5.3.5. Les clavages.....	13
1.5.3.6. Les tronçons coulés sur cintre.....	13
1.5.3.7. Le collage des voussoirs.....	13
1.5.3.8. La stabilisation des fléaux.....	15
1.5.3.9. Influence des méthodes de pose sur le dimensionnement des ouvrages.....	15
1.6. Phases de construction du projet.....	16
1.7. Caractéristiques des matériaux.....	20
1.7.1. Béton.....	20
1.7.2. Déformation élastique.....	21
1.7.3. Relations contrainte-déformation pour le calcul des sections.....	22
1.7.4. Armatures passives.....	23

1.7.5. Armatures de précontraintes.....	24
---	----

## **CHAPITRE 2 : Dimensionnement par les Eurocodes**

2.1. Présentation des Eurocodes.....	27
2.2. Actions et combinaisons d'actions.....	28
2.2.1. Actions permanentes.....	28
2.2.1.1. Béton et superstructures.....	28
2.2.1.2. Force de précontrainte.....	30
2.2.1.3. Fluage et retrait.....	31
2.2.1.3.1. Fluage.....	32
2.2.1.3.2. Retrait.....	33
2.2.2. Actions variables.....	34
2.2.2.1. Charges de construction.....	34
2.2.2.2. Actions de trafic routier.....	35
2.2.2.3 Actions de la température.....	38
2.3. Combinaisons d'action.....	40
2.3.1. Combinaisons ELU.....	40
2.3.2. Combinaisons ELS.....	41
2.4. Principes de vérification.....	42
2.4.1. Justifications vis-à-vis des états-limites de service.....	42
2.4.1.1. Maîtrise de la fissuration.....	42
2.4.2. Justification aux états limites ultimes.....	49
2.4.2.1. Flexion simple et composée.....	49
2.4.2.1. 1. Déformations relatives limites.....	49
2.4.2.1.2. Sollicitations de calcul.....	50
2.4.2.1. 3. Principe de justification.....	50
2.4.2.2. Effort tranchant.....	52
2.4.2.3. Effort tranchant et torsion.....	55
2.5. Calcul des pertes de précontrainte.....	56
2.5.1. Pertes dues au frottement.....	57
2.5.2. Pertes à la mise en charge de l'ancrage (rentrée d'ancrage) .....	58
2.5.3. Pertes par déformation instantanée du béton.....	59

2.6. Détermination des enrobages.....	60
2.6.1. Enrobage minimal $c_{min}$ .....	61
2.6.1.1. Enrobage minimal vis-à-vis de l'adhérence.....	61
2.6.1.2. Enrobage minimal vis-à-vis de la durabilité.....	61
2.6.2. Enrobage nominal.....	63

### **CHAPITRE 3 : Etude préliminaire**

3.1. Introduction.....	66
3.2. Pré dimensionnement de la section transversale du caisson.....	66
3.2.1. Notations.....	66
3.2.2. Hauteur du caisson.....	66
3.2.3. Hourdis supérieur.....	67
3.2.4. Épaisseur des âmes.....	67
3.2.5. Epaisseur du hourdis inférieur.....	68
3.2.6. Dimensionnement des goussets supérieurs .....	68
3.2.7. Dimensionnement des goussets inférieurs.....	69
3.3. Détermination des câbles de fléaux et de continuité.....	70
3.3.1. Introduction .....	70
3.4. Calcul de la précontrainte des câbles de fléau .....	71
3.4.1. Caractéristiques mécaniques de la section transversale des voussoirs.....	72
3.4.2. Sollicitations sur pile après le bétonnage du dernier voussoir courant.....	72
3.4.3. Détermination du nombre de câbles et le nombre de voussoirs.....	73
3.5. Calcul de la précontrainte de clavage .....	76
3.5.1. Clavage entre C1 et P1.....	76
3.5.2. Clavage entre P1 et P2.....	77
3.5.2.1. Vérification pendant le bétonnage.....	77
3.5.2.2. Vérification après clavage.....	79
3.5.3. Vérification pendant le bétonnage du clavage P2-C2.....	83

### **CHAPITRE 4 : Modélisation et vérification de la sécurité structurale du pont**

4.1. Introduction.....	85
4.2. Présentation du logiciel de calcul MIDAS.....	85
4.3. Introduction des données.....	86

4.4. Comparaison entre les résultats de l'étude de l'étude préliminaire et ceux de MIDAS civil .....	98
4.5. Diagramme des sollicitations a la fin de la construction du fléau P1.....	98
4.5.1. Diagrammes des sollicitations sous l'effet du poids propre.....	98
4.5.2. Diagrammes des sollicitations dus aux effets des câbles de fléau .....	100
4.5.3. Diagrammes des moments dus a l'ensemble des charges dans le fléau P1.....	102
4.6. Diagramme des sollicitations après clavage entre P1 et C1 dues a l'ensemble des charges a la fin de la phase de construction.....	104
4.7. Diagramme des sollicitations après clavage ente P1 et P2.....	105
4.8. Diagramme des sollicitations après clavage ente P2 et C27.....	107
4.9. Justification du tablier.....	112

## Liste des figures

### CHAPITRE 1: Présentation du projet

Figure.1.1. Plan de situation.....	02
Figure. 1.2. Profil en long du viaduc est le profil.....	03
Figure. 1.3. Coupe transversale.....	04
Figure. 1.4. Section transversale des piles.....	05
Figure 1.5. Schéma d'une cellule de préfabrication.....	09
Figure 1.6. Fardier de transport des voussoirs.....	10
Figure 1.7. Poutres de lancement courantes.....	11
Figure 1.8. Pose à la grue terrestre.....	12
Figure 1.9. Pose au portique.....	12
Figure 1.10. Voussoirs à Clés multiples.....	14
Figure 1.11. Réalisation des piles et culées.....	17
Figure 1.12. Réalisation du fléau P1.....	17
Figure 1.13. Réalisation des voussoirs coulés sur cintre C1.....	17
Figure 1.14. Clavage C1-P1 et mise en tension des câbles éclisses.....	18
Figure 1.15. Réalisation du fléau P2.....	18
Figure 1.16. Clavage P1-P2 et mise en tension des câbles éclisses.....	18
Figure 1.17. Réalisation des voussoirs coulés sur cintre C2.....	19
Figure 1.18. Clavage et mise en tension des câbles éclisses.....	19
Figure 1.19. Diagramme parabole rectangle pour le béton comprimé.....	22
Figure 1.20. Modèle contrainte-déformation pour les barres passives (EN1992-2).....	23
Figure 1.21. Modèle contrainte-déformation (diagramme idéalisée) pour les barres passives (EN1992-2).....	24
Figure 1.22. Modèle contrainte-déformation pour les torons de précontrainte (EN1992-2).....	24
Figure 1.23. Modèle contrainte-déformation (diagramme idéalisée) pour les torons de précontrainte EN1992-2.....	24

### CHAPITRE 2 : Dimensionnement par les Eurocodes

Figure 2.1. Détail trottoirs coté gauche .....	29
Figure 2.2. Détail des trottoirs coté droite.....	29

Figure 2.3. La largeur de la chaussée.....	35
Figure 2.4. Modèle de charge principal Modèle 1 selon l'Eurocode 1991-2.....	37
Figure 2.5. Composantes constitutives d'un profil de température.....	38
Figure 2.6. Aires effectives de béton autour des armatures dans le cas des poutres.....	46
Figure 2.7. Ouverture des fissures $w$ à la surface du béton en fonction de la distance aux armatures.....	46
Figure 2.8. Découpage d'une section à membrures pour l'analyse de la fissuration.....	48
Figure 2.9. Diagramme des déformations relatives admissibles à l'état-limite ultime [6.1].....	50
Figure 2.10. Sollicitations de calcul.....	50
Figure 2.11. Courbe d'interaction effort normal et moment fléchissant.....	51
Figure 2.12. Distribution rectangulaire simplifiée.....	52
Figure 2.13. Modèle de treillis.....	54
Figure 2.14. Résistance des armatures transversales à l'effort tranchant.....	55
Figure 2.15. Notations utilisées pour le calcul de la résistance à la torsion.....	56
Figure 2.16. Frottements le long du câble lors de la mise en tension.....	58
Figure 2.17. Tension le long du câble, avant et après relâchement de la pression.....	59
Figure 2.18. Classes d'exposition du caisson.....	62

### **CHAPITRE 3 : Etude préliminaire**

Figure 3.1. Notations utilisées.....	66
Figure 3.2. Epaisseur des âmes.....	68
Figure 3.3. Détail des goussets supérieurs.....	69
Figure 3.4. Détail des goussets inférieurs.....	69
Figure 3.5. Bossage d'ancrage des câbles de continuité inférieurs.....	70
Figure 3.6. Caractéristiques géométriques du voussoir.....	70
Figure 3.7. Fléau P1.....	71
Figure 3.8. Tronçon au droit de C1 posé sur cintre.....	72
Figure 3.9. Détermination des efforts dus au clavage côté C1.....	76
Figure 3.10. Représente la structure au moment du clavage P1-P2.....	77
Figure 3.11. Diagramme des moments de flexion dus aux poids de voussoir de clavage.....	78
Figure 3.12. Diagramme des moments dus à l'enlèvement de la travée de liaison.....	79
Figure 3.13. Diagramme des moments dus à l'enlèvement de la travée de liaison.....	79

Figure 3.14..Moment dû au gradient thermique dans le cas du trois travées symétriques.....	80
Figure 3.15. Diagramme des moments isostatiques dus à l'excentricité des câbles de continuité.....	81

## **CHAPITRE 4 : Modélisation et vérification de la sécurité structurale du pont**

Figure 4.1. Modèle globale de type « beam » .....	86
Figure 4.2. Caractéristiques mécaniques des torons.....	86
Figure 4.3. Caractéristiques mécaniques du béton .....	87
Figure 4.4. Paramètres liés au retrait et au fluage.....	87
Figure 4.5.Variation des déformations du retrait en fonction du temps pour un béton C45/55.....	88
Figure 4.6. Variation du coefficient de fluage en fonction du temps pour un béton C45/55.....	88
Figure 4.7. Evolution de la résistance à la compression du béton en fonction du temps.....	88
Figure 4.8. Dimensions de la section transversale du caisson.....	89
Figure 4.9. Section transversal des piles.....	89
Figure 4.10. Géométrie et discrétisation du pont.....	90
Figure 4.11. Définition des conditions d'appui.....	90
Figure 4.12. Liaison pile tablier de type rigide.....	91
Figure 4.13. Diamètre ,propriété mécanique ,position et tracée des câbles.....	91
Figure 4.14. Disposition des armatures passives.....	92
Figure 4.15. Vue en plan des câbles de fléau.....	92
Figure 4.16. Vue en élévation des câbles de fléau .....	92
Figure 4.17. Tracé des câbles de continuités P1-P2.....	93
Figure 4.18. Tracé des câbles de continuité C1-P1 .....	93
Figure 4.19. Charge de construction.....	94
Figure 4.20. Température et gradient thermique .....	94
Figure 4.21. Introduction de la force de précontrainte.....	95
Figure 4.22. Lignes de chargement.....	95
Figure 4.23. Propriété de la charge LM1.....	96
Figure 4.24. Liste des d'éléments, conditions d'appuis et chargement.....	96
Figure 4.25. Paramètres pour les différentes phases de construction.....	97

Figure 4.26. Combinaisons d'actions.....	97
Figure 4.27. Diagramme des moments .....	98
Figure 4.28. Diagramme des efforts tranchants .....	99
Figure 4.29. Diagramme des contraintes normales de traction sur la fibre supérieure.....	99
Figure 4.30. Diagramme des contraintes normales de compression sur la fibre inférieure.....	100
Figure 4.31. Diagramme des moments fléchissant.....	100
Figure 4.32. Diagramme des efforts tranchants .....	101
Figure 4.33. Diagramme des contraintes normales sur la fibre supérieure du fléau P1.....	101
Figure 4.34. Diagramme des contraintes normales dues à la précontrainte sur la fibre inférieure du fléau P1.....	102
Figure 4.35. Diagramme des moments fléchissant .....	102
Figure 4.36. Diagramme des contraintes sur la fibre supérieure .....	103
Figure 4.37. Diagramme des contraintes sur la fibre inférieure.....	103
Figure 4.38. Diagramme des moments fléchissant .....	104
Figure 4.39. Diagramme des contraintes sur la fibre supérieure .....	104
Figure 4.40. Diagramme des contraintes sur la fibre inférieure .....	105
Figure 4.41. Diagramme des contraintes sur la fibre supérieure dues à l'ensemble des charges.....	104
Figure 4.42. Diagramme des contraintes sur la fibre inférieure dues à l'ensemble des charges après clavage entre P1 et C1 .....	106
Figure 4.43. Diagramme somme des contraintes après clavage à la fibre inférieure.....	106
Figure 4.44. Diagramme des moments fléchissants dus au poids propre.....	107
Figure 4.45. Diagramme des moments fléchissants dus aux effets des câbles de Précontrainte.....	107
Figure 4.46. Diagramme des moments fléchissants dus à l'ensemble des charges.....	108
Figure 4.47. Diagramme des efforts tranchants dus à l'ensemble des charges .....	108
Figure 4.48. Diagramme des efforts tranchants dus à l'ensemble des charges .....	109
Figure 4.49. Diagramme des contraintes sur la fibre inférieure dues à l'ensemble des Charges.....	109
Figure 4.50. Déplacements verticaux du tablier .....	110
Figure 4.51. Diagramme des moments fléchissants dus aux effets du fluage en phase	

de construction.....	110
Figure 4.52. Diagramme des moments fléchissants dus aux effets du fluage au temps (t=10000jours).....	111
Figure 4.53. Diagramme des moments fléchissants dus aux effets du retrait en phase de construction.....	111
Figure 4.54. Diagramme des moments fléchissants dus aux effets du retrait au temps (t=10000jours .....	112

**ANNEXE J : Tracée des câbles de précontrainte**

Figure J.1. Tracée des câbles de fléau.....	143
Figure J.2. Tracée des câbles de continuité ente P1-C1.....	144
Figure J.3. Tracée des câbles de continuité ente P1-P2.....	144

## Liste des tableaux

### CHAPITRE 1: Présentation du projet

Tableau 1.1. Calendrier des phases constructives.....	16
---	----

### CHAPITRE 2 : Dimensionnement par les Eurocodes

Tableau 2.1. Coefficients d'ajustement du modèle de charges principal.....	37
--	----

Tableau 2.2. Valeurs des charges pondérées du système LM1.....	37
--	----

Tableau 2.3. Détermination de la classe d'exposition .....	63
--	----

### CHAPITRE 3 : Etude préliminaire

Tableau 3.1. Caractéristiques mécaniques de la section transversale des caissons.....	72
---	----

### CHAPITRE 4 : Modélisation et vérification de la sécurité structurale du pont

Tableau 4.1. Comparaison entre les Moments sur pile de l'étude préliminaire et Midas civil.....	98
---	----

#### Annexe A : Vérification des contraintes en phase de construction .

Tableau A.1. Liste des symboles utilisés pour la vérification des contraintes en phase de construction.....	115
--	-----

Tableau A.2. Vérification des contraintes en phase de construction.....	116
---	-----

#### Annexe B : Vérification des contraintes principales en phase de construction

Tableau B.1. Liste des symboles utilisés pour la vérification des contraintes principales en phase de construction.....	118
--	-----

Tableau B.2. Vérification des contraintes principales en phase de construction.....	119
---	-----

#### Annexe C : Vérification des contraintes à l'état limite service

Tableau C.1. Liste des symboles utilisés pour la vérification des contraintes des contraintes à l'ELS en phase d'exploitation .....	120
--	-----

Tableau C.2. Vérification des contraintes à l'ELS en phase d'exploitation.....	121
--	-----

#### Annexe D : Vérification des contraintes principales à l'état limite service

Tableau D.1. Liste des symboles utilisés pour la vérification des contraintes principales à l'ELS en phase d'exploitation .....	123
--	-----

Tableau D.2. Vérification des contraintes principales à l'ELS en phase d'exploitation .....	124
--	-----

#### Annexe E : Vérification de la fissuration à l'état limite service

Tableau E.1. Liste des symboles utilisés pour la vérification de la fissuration à l'état limite service.....	126
Tableau E.2. Vérification de la fissuration a l'état limite service.....	127
<b>Annexe F : Vérification de la résistance à la flexion</b>	
Tableau F.1. Liste des symboles utilisés pour la vérification de la résistance à la flexion.....	130
Tableau F.2. Vérification de la résistance à la flexion.....	131
<b>Annexe G : Vérification de la résistance à l'effort tranchant</b>	
Tableau G.1. Liste des symboles utilisés pour la vérification de la résistance à l'effort tranchant.....	134
Tableau G.2. Vérification de la résistance à l'effort tranchant.....	135
<b>Annexe H : Vérification de la résistance aux efforts de cisaillement et torsion</b>	
Tableau H.1. Liste des symboles utilisés pour la vérification de la résistance à l'effort tranchant et torsion.....	137
Tableau H.1.2. Vérification de la résistance aux efforts de cisaillement et torsion.....	138
<b>Annexe I : Pertes de précontrainte en phase d'exploitation pour le groupe de câbles P1-gauche</b>	
Tableau I.1.1. Pertes de précontrainte en phase d'exploitation.....	142

## **RESUME**

Le sujet de ce mémoire de fin d'études consiste à étudier le tablier d'un pont caisson en béton précontraint construit avec des voussoirs préfabriqués en utilisant les Eurocodes 1 et 2. L'étude est limitée à l'analyse longitudinale du tablier de pont qui tient compte des différentes phases de construction et de l'évolution de la résistance du béton au cours du temps. En premier lieu une étude préliminaire est menée, après pré dimensionnement de la section transversale du caisson, afin de proposer la section et le tracé des câbles de précontrainte. La méthodologie adoptée est celle proposée par la publication du guide SETRA. Une fois la section et le tracé des câbles connus, une étude plus affinée, tenant compte du calendrier de construction des pertes de précontraintes, les sections transversales sont justifiées, avec l'aide du logiciel de calcul des ponts MIDAS CIVIL, vis-à-vis des états limites ultimes et de service imposées par l'EC2. L'ensemble des résultats, obtenus durant toutes les phases de construction et après mise en service sur piles et aux interfaces entre les voussoirs, ont montré que pour la section du caisson et le câblage adoptés dans l'étude préliminaire les états limites ultime et de service ne sont pas dépassés.

**Mots clés :** Voussoir, Caisson, Eurocode, Précontrainte, MIDAS CIVIL, Préfabrication.

## المخلص

يتكون موضوع أطروحة نهاية الدراسات هذه في دراسة سطح جسر صندوقي خرساني مُجهَد مسبقًا مبني بأجزاء مسبقة الصنع باستخدام القوانين الأوروبية 1 و2 (EUROCODE 1et 2).

تقتصر الدراسة على التحليل الطولي لسطح الجسر. والذي يأخذ بعين الاعتبار مراحل البناء المختلفة وتطور مقاومة الخرسانة بمرور الوقت. في البداية، يتم إجراء دراسة أولية، بعد تحديد أبعاد المقطع العرضي للصندوق مسبقًا، من أجل اقتراح نوع ومخطط الكابلات مسبقة الإجهاد. المنهجية المعتمدة هي تلك التي اقترحها الدليل SETRA .

بمجرد معرفة نوع الكابلات ومسارها، يتم إجراء دراسة أكثر دقة، مع مراعاة الجدول الزمني للبناء لفقد الإجهاد، يتم تبرير المقاطع العرضية، بمساعدة برنامج MIDAS CIVIL، مقابل الحالات الحدية (Ultime et service) التي تفرضها القواعد الموجودة في (EUROCODE 2).

أظهرت جميع النتائج، التي تم الحصول عليها خلال جميع مراحل البناء وبعد التشغيل على الأعمدة وفي الواجهات بين الصناديق، أنه بالنسبة لقسم الصندوق والكابلات المعتمدة في الدراسة الأولية، لا يتم تجاوز الحالات الحدية (Ultime et service)

**الكلمات المفتاحية:** Caisson، الرمز الأوروبي EUROCODE، الإجهاد المسبق، MIDAS CIVIL، التصنيع المسبق.

**CHAPITRE 1 :**  
**PRESENTATION DU PROJET**

## 1.1. Situation et description du projet

La réhabilitation et doublement de la route nationale RN 20 sur un linéaire de 20 km entre El Khroub et Ain Abid comporte la réalisation par l'entreprise Nationale des Grands Ouvrages d'Art (ENGOA) de deux ponts routiers rentrant dans le cadre de l'aménagement routier du carrefour RN 20 desservant la wilaya d'Oum El Bouaghi et d'autres wilaya de l'est du pays.

La RN20 est un itinéraire entre Guelma et Constantine accueillant un important trafic routier estimé à 14 000 véhicules/jour dont 30 % sont des poids lourds desservant la wilaya de Guelma et de plusieurs wilayas de l'est du pays. La réalisation de ces deux bretelles a pour but de fluidifier et de sécuriser la circulation sur cet axe très sollicité et vise aussi à améliorer les échanges entre la voirie nationale et les voiries locales. Les deux viaducs franchissent la RN10 à hauteur d'un ouvrage existant du côté est et ouest de celui-ci permettant de relier directement la RN10 à la RN20 dans les deux directions comme il est illustré sur la figure 1.1.

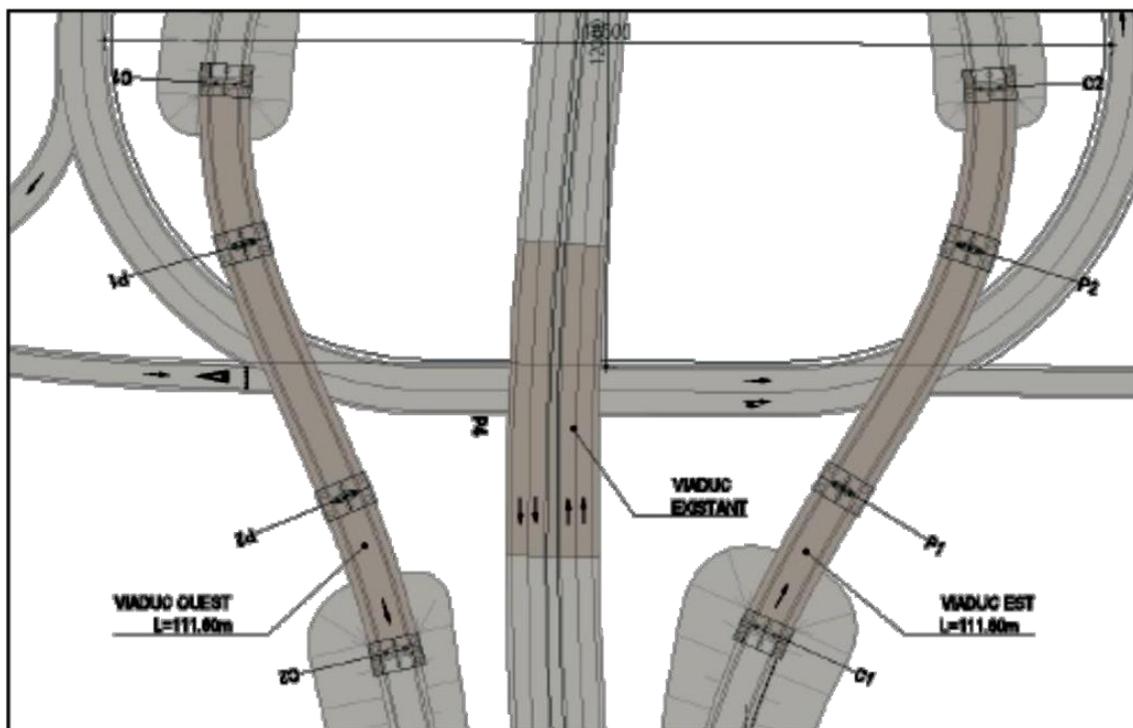


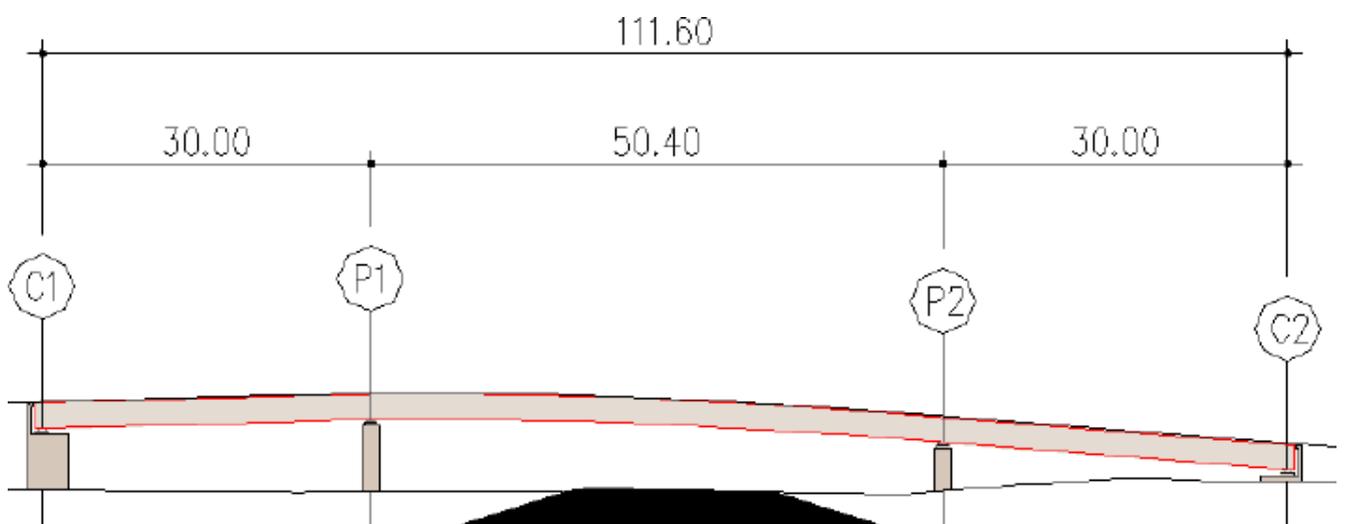
Figure.1.1. Plan de situation

L'étude des deux viaducs qui a été confiée à la société italienne IZC (ENGENNERI ZUCCOLO COSTRUZIONI) a abouti au choix de la solution pour chacun des deux viaducs un mono-caisson en béton précontraint) à trois travées continues construites par encorbellement successifs à partir des piles et sur cintre près des culées. La longueur totale des deux ouvrages entre les deux culées est

de 111.6 m. Les travées de rive ont une longueur de 30 m chacune et la travée centrale a une longueur de 50.4 m. Habituellement ces types de ponts comportent des travées de rive ayant une longueur égale à 60% de la travée centrale ( $30/50 = 0.5$ ).

Le tracé en plan des deux viaducs présente une faible courbure constante à l'axe du tablier. Le tablier sera donc calculé comme un pont droit.

Le profil en long du viaduc est en toit avec un point haut situé au niveau de la pile P1, présentant une légère courbure entre la pile P1 et la culée C2 et une légère différence d'altitude d'environ 6.7 m entre les deux culées. Ce profil en long permet de considérer le tablier comme parfaitement horizontal dans les calculs préliminaires. La figure 1.2 présente le profil en long du viaduc est.



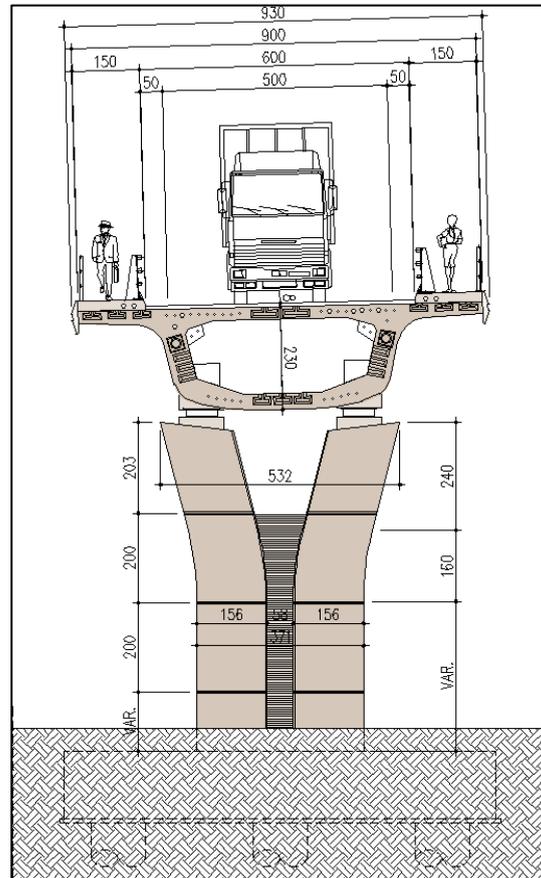
**Figure. 1.2.** Profil en long du viaduc est

Le profil en travers de l'ouvrage (Figure 1.3) est constitué comme suit :

- une chaussée de largeur 6 m ;
- deux trottoirs de largeur 1.5 m chacun ;
- deux gardes corps à chaque extrémité du tablier ;
- deux barrières de type BN4 séparant la chaussée et les deux trottoirs ;
- une bande dérasée gauche (BDG), et une bande dérasée droite (BDD) le long de chaque barrière chacune ayant une largeur 0.5 m.

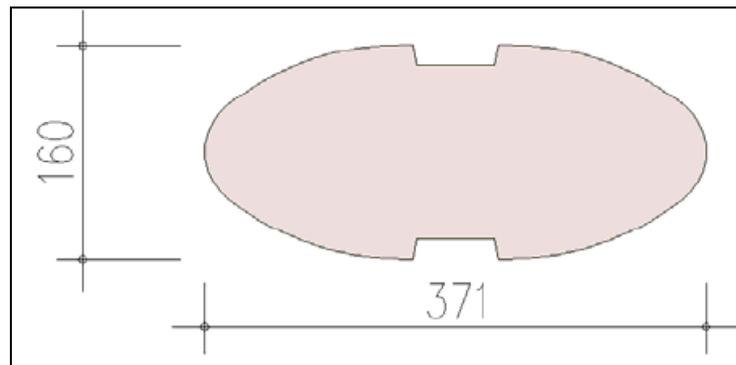
Le profil en travers de la chaussée comporte un seul versant dirigé vers l'extérieur au dévers de 5 % en section transversale, le tablier est un mono caisson simple de largeur 9 m à âmes inclinées avec un hourdis inférieur présentant une légère courbure. La solution du mono caisson est généralement

adoptée pour les tabliers ayant une largeur inférieure à 20 m. la hauteur du tablier est constante étant donnée que la portée déterminante est inférieure à 60 m. Les âmes sont souvent implantées au quart de la largeur du caisson ( $2/9.3=0.21$ ). Au niveau de la face extérieure du caisson, le raccordement entre le hourdis supérieur en console et l'âme est réalisé à l'aide de goussets circulaires.



**Figure. 1.3.** Coupe transversale

Les piles en béton armé sont de type poteau comportant chacune deux futs libres en tête dont la forme de base de la section transversale est représentée sur la figure 1.4. Le choix de ce type de section est dicté par des considérations d'ordre esthétique. En fonction de la topographie du terrain, les deux piles du viaduc est conçue avec des hauteurs hors semelle différentes de 6.70 m pour la pile P1 et de 4.5 m pour la pile P2. Les appuis définitifs adoptés pour le tablier de ce projet au niveau des piles et des culées sont des appareils d'appui au frottement de type « friction pendulum » à haute dissipation d'énergie. Le choix de cette solution au lieu d'encastrer le tablier en tête de pile est dictée par la faible hauteur des piles. La fondation des piles est constituée par 6 pieux forés de diamètre  $\phi = 1.20\text{m}$  relié par un radier de 2.00 m de hauteur. Les culées adoptées pour les deux viaducs de ce projet sont des culées remblayées fondées sur pieux.



**Figure. 1.4.** Section transversale des piles

## 1.2. Données géologiques et géotechniques

La reconnaissance du sol est un paramètre fondamental et essentiel pour définir le type de l'ouvrage correspondant, ainsi que la proposition des fondations envisagées pour les appuis, et de choisir un bon emplacement dont le but d'avoir un bon comportement mécanique de l'ouvrage.

La zone dans laquelle sont implantée les deux ouvrages est constitué principalement d'une couche d'argile limoneuse avec cailloux et graves allant jusqu'à 7.60 mètres, surplombant une couche d'argile graveleuse, plastique, atteignant les 21.40 mètres de profondeur qui surplombe une formation d'argile limoneuse ferme et cela jusqu'à la profondeur maximale de 30 m atteinte par les sondages.

La capacité portante admissible estimée du pieu vaut 3665 KN pour un du pieu de diamètre  $\varnothing=1,20$  met de longueur  $L = 20.00$  m

## 1.3. Données relatives à l'environnement

La région d'El Khroub a un climat tempéré chaud. Les précipitations sont plus importantes en hiver qu'en été. Selon la classification de Köppen-Geiger, le climat est de type Csa. El Khroub affiche une température annuelle moyenne de 15.3 °C.

Au mois de juillet, la température moyenne est de 25.8°C. Juillet est de ce fait le mois le plus chaud de l'année. Janvier est le mois le plus froid de l'année. La température moyenne est de 6.8°C à cette période.

Le record de chaleur est de 44°C enregistré le jeudi 29 juin 1944 et le record de froid de -10°C enregistré le mardi 2 février 1999.

La moyenne des précipitations annuelles atteints 501.7 mm . Les précipitations varient de 59.8 mm entre le mois le plus sec et le mois le plus humide. L'amplitude des températures tout au long de l'année est de 19°C. Des précipitations moyennes de 10.6 mm font du mois d'août le mois le plus sec. En décembre, les précipitations sont les plus importantes de l'année avec une moyenne de 70.4 mm .

Une différence de 55 mm est enregistrée entre le mois le plus sec et le mois le plus humide. Entre la température la plus basse et la plus élevée de l'année, la différence est de 19.7 °C.

Le niveau d'humidité perçu à El Khroub, tel que mesuré par le pourcentage de temps durant lequel le niveau d'humidité est lourd, oppressant ou étouffant, ne varie pas beaucoup au cours de l'année, se maintenant à 3 %.

La vitesse horaire moyenne du vent à El Khroub connaît une variation saisonnière modérée au cours de l'année. La période la plus venteuse de l'année dure 5,8 mois, du 1 novembre au 27 avril, avec des vitesses de vent moyennes supérieures à 12,5 kilomètres par heure. Le jour le plus venteux de l'année est le 28 décembre, avec une vitesse moyenne du vent de 14,2 kilomètres par heure. avec une vitesse moyenne horaire du vent de 10,8 kilomètres par heure.

#### **1.4. Classe d'exposition de l'ouvrage**

Dans les Eurocodes, les classes d'exposition traduisent les actions dues à l'environnement auxquelles le béton de l'ouvrage ou de chaque partie d'ouvrage, et les armatures vont être exposés pendant la durée d'utilisation de la structure. La norme EN 1992-2 [6] définit 18 classes d'exposition regroupées en 6 classes par risque de corrosion (XC, XD, XS) ou d'attaques (XF, XA) dépendant des actions et des conditions environnementales auxquelles le béton de l'ouvrage, ou de la partie de l'ouvrage, est soumis.

La prévention vis-à-vis des risques de corrosion permet en particulier de déterminer :  
au stade de la conception du projet :

- l'enrobage nécessaire des armatures pour assurer la durabilité ;
- la valeur limite de l'ouverture maximale calculée des fissures.

Au stade de l'étude et de la fabrication du béton : le dosage en ciment et le type de ciment adapté. En se référant aux données du projet, on considère pour cet ouvrage la classe d'exposition XF1 de l'EN 1992-1[5] utilisé pour les surfaces de béton soumis à une attaque significative due à des cycles de gel/dégel, alors qu'il est mouillé avec une faible saturation en eau avec agents de déverglaçage.

Pour cette classe d'exposition, l'enrobage sera déterminé par référence à la classe d'exposition XC4 comme il est indiqué dans l'Art 4.4.1.2(12) de l'EN 1992-1-1[5] .

## 1.5. Construction par encorbellement successif

### 1.5.1. Technique du Procédé

La méthode de construction par encorbellements successifs est généralement utilisée dans la construction des ponts. Elle consiste à construire le tablier du pont, partant des appuis pour atteindre la mi- portée par des tronçons successifs appelés voussoirs. Ces derniers sont plaqués l'un avec le précédent, par la mise en tension des câbles précontraints.

La construction par encorbellements successifs est effectuée en plusieurs phases qui sont :

- Construction des piles et des culées qui reposent sur des fondations ; soit des radiers sur pieux qui peuvent supporter des charges et des moments fléchissant énormes qui conviennent les cas des ponts à grands portées.
- Réalisation du voussoir sur pile qui est généralement préfabriqué nommé par VSP.
- Réalisation les voussoirs des travées appelés fléaux, débutant symétriquement de part et d'autre des piles, pour minimiser les moments sur cet appui.
- Exécution des tronçons pré des culées qui sont en général coulés sur cintre, le moment de renversement étant équilibré par un contre poids.
- Clavage des deux fléaux adjacents.

### 1.5.2. Domaine d'emploi

Les ponts construits par encorbellements successifs en caisson précontrainte, sont utilisés pour des trajectoires droites ou courbes qui possèdent une portée de 80 à 150 m voire 200 m. [10].

Si la portée est supérieure à 200 m, la méthode devient coûteuse à cause de l'augmentation des matériaux.

La construction par encorbellements successifs, est effectuée au niveau des tabliers sans contact avec le sol. Pour cette raison, cette méthode est la plus adéquate pour construire des ouvrages au-dessus des rivières à forte crue, ou au-dessus des vallées très accidentées ou très profondes, et au-dessus des sites où on ne peut pas mettre d'échafaudages (ouvrage au-dessus d'une autoroute).

Cette méthode est utilisée dans des ouvrages où il y a une diversité géométrique en plan et en long, nous permettant aussi d'effectuer des tabliers à épaisseur constante ou variable (parabolique ou linéaire).

La réalisation de la construction par encorbellements successifs est valable quel que soit les caractéristiques naturelles du site (profondeur importante, versants abruptes, sols de très mauvaise qualité, site maritime).

### **1.5.3. La construction par voussoirs préfabriqués**

On considère en général que la préfabrication d'un tablier est plus économique que sa construction in situ lorsque le nombre de voussoirs à construire dépasse 350 à 400 unités.

Des difficultés particulières peuvent cependant déplacer ce seuil, à la hausse comme à la baisse. Ainsi, un délai contractuel très court ou des conditions climatiques difficiles augmentent l'intérêt de la préfabrication. Au contraire, l'absence de place disponible près du chantier ou des conditions d'accès difficiles peuvent imposer la construction en place d'un ouvrage pourtant assez long [13].

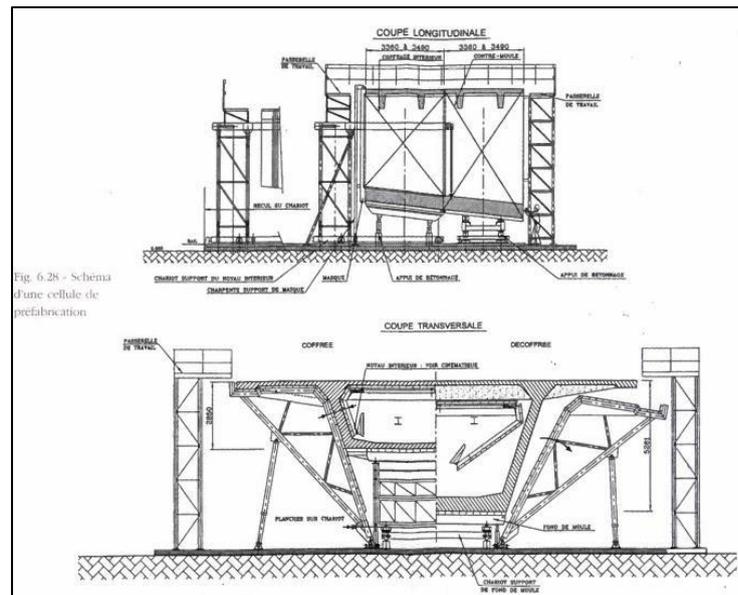
#### **1.5.3.1. L'atelier de préfabrication de voussoirs**

L'atelier de préfabrication est installé sur un terrain d'environ deux hectares de superficie, qui est en général situé au bord du franchissement, mais qui peut aussi être situé à plusieurs kilomètres.

Il peut être décomposé en deux grands secteurs, le premier dédié à la construction des voussoirs, le second à leur stockage.

Depuis une dizaine d'années, la construction des voussoirs s'effectue toujours à l'aide de cellules de préfabrication. Bénéficiant des progrès importants accomplis dans le domaine de la maîtrise de la géométrie, cette méthode s'est définitivement imposée sur la méthode du banc long avec doucine plus coûteuse et plus encombrante

Une cellule de préfabrication est un atelier de travail de la longueur de deux à trois voussoirs courants, sur lequel sont effectuées les opérations de coffrage et de bétonnage d'un voussoir. Latéralement, le coffrage est assuré par deux joues métalliques ; longitudinalement, cette fonction est assurée côté clef par un masque métallique et côté pile par le voussoir n-1, ce qui permet d'assurer une parfaite conjugaison entre les différents éléments. Une cellule bien conçue produit un voussoir courant par jour ou un voussoir sur pile tous les deux jours. Afin de tenir des cadences aussi élevées, les cellules sont équipées de mâts de bétonnage alimentés en béton par des canalisations ou des convoyeurs reliés à une centrale de chantier.



**Figure 1.5.** Schéma d'une cellule de préfabrication

Elles reçoivent également des cages d'armatures complètes, préfabriquées sur des gabarits par des ateliers spécialisés et équipées de tous leurs inserts (gaines, plaques d'ancrage, rails d'ancrage).

Selon le nombre de voussoirs à exécuter, le nombre de cellules peut varier de trois à plusieurs dizaines. Une partie de ces cellules sont dédiées aux voussoirs sur piles et sur culées, les autres se consacrant aux voussoirs courants.

Les voussoirs sur piles sont toujours coupés en deux, de manière à ne pas surdimensionner le matériel de transport et de levage. Les demi voussoirs sur piles sont exécutés côte à côte dans des cellules spécialisées ; après séparation ils sont acheminés vers les cellules dédiées aux voussoirs courants pour servir de contre moules aux premiers voussoirs courants de chaque fléau.

Selon les chantiers, les voussoirs déviateurs sont soit exécutés dans des cellules spécialisées, soit exécutés dans les cellules des voussoirs courants, l'exécution des voiles s'effectuant alors en seconde phase et hors cellule pour ne pas modifier le cycle des voussoirs courants.

Des cellules spécialisées sont également dédiées aux voussoirs d'articulation, lorsque le tablier en comporte.

Compte tenu des erreurs qu'ils doivent rattraper, les clavages ne sont pas préfabriqués mais coulés en place. Leur longueur est également réduite à quelques dizaines de centimètres.

Les voussoirs sont stockés sur l'aire de préfabrication pendant un délai compris entre un et trois mois. La résistance du béton au moment de la pose des voussoirs est donc très élevée, ce qui permet de se passer des blocs d'ancrage préfabriqués décrits précédemment. Le stockage s'effectue en général sur un seul niveau. Si nécessaire et moyennant une justification des voussoirs par le calcul, il peut aussi s'effectuer sur deux, voire trois niveaux.

Les voussoirs sont transportés à l'aide de grands portiques roulants, d'abord de puis les cellules vers leur emplacement de stockage, puis depuis ce lieu jusqu'à un engin de transport (barge, fardier, etc.)[14].

### 1.5.3.2. Le transport des voussoirs préfabriquée

#### ● Le transport par fardier

Le mode de déplacement des voussoirs le plus utilisé est le transport par fardier sur pneus. Selon les chantiers et le mode de pose retenu, le fardier se déplace soit sur le tablier déjà exécuté soit sur une piste tracée au sol le long de l'ouvrage à construire. Son chargement est effectué à l'aire de préfabrication en général par un portique de manutention, son déchargement étant réalisé par l'engin de pose.



Figure 1.6. Fardier de transport des voussoirs

#### ● Le transport par barge

Lorsque l'ouvrage franchit une voie d'eau navigable ou pouvant être rendue navigable par exemple par dragage, il est aussi possible de déplacer les voussoirs à l'aide de barges.

### 1.5.3.3. La pose des voussoirs préfabriquée

#### ● La pose à la poutre de lancement

La méthode la plus couramment utilisée pour poser des voussoirs préfabriqués par encorbellements successifs fait appel à une poutre de lancement. Cet outil, souvent appelé aussi lanceur, est un engin de manutention auto déplaçable, qui s'appuie sur le tablier et sur les piles, et qui s'affranchit donc de presque toutes les contraintes du franchissement. Son coût initial est très élevé mais la poutre est en général conçue pour être utilisée sur plusieurs chantiers successifs, ce qui permet d'amortir son coût sur une longue période.



Figure 1.7. Poutres de lancement courantes

#### ● La pose à la grue

Quand la hauteur des piles n'est pas trop importante et qu'il est possible de faire circuler un engin lourd au pied du tablier, on peut poser les voussoirs préfabriqués à l'aide de grues, ce qui réduit considérablement l'investissement initial.

Lorsque l'ouvrage franchit une étendue d'eau, la pose s'effectue à l'aide d'une grue à flèche en treillis fixée sur une barge, de 200 à 500 t de capacité.

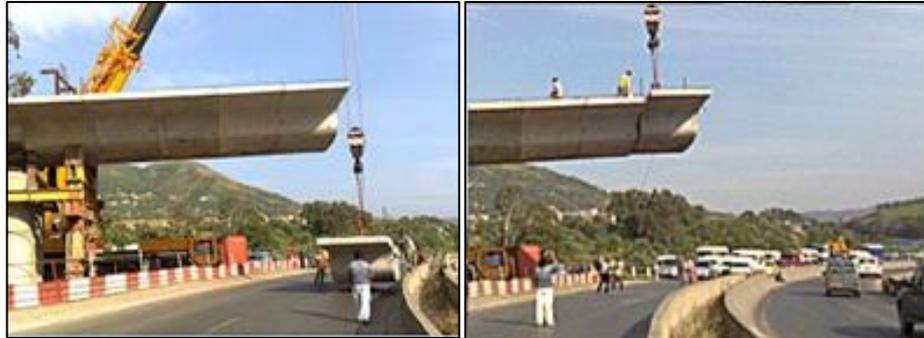
Lorsque l'ouvrage surplombe des zones à terre, la pose s'effectue à l'aide d'une grue sur chenilles à flèche en treillis de même puissance. Compte tenu de l'ordre de pose des voussoirs, la grue se déplace en permanence d'une extrémité du fléau à l'autre.

Quel que soit le type de grue utilisé, un palonnier est interposé entre le crochet de la grue et les voussoirs. Lorsque le dévers et le profil en long sont peu marqués, le voussoir peut être guidé par des profilés d'accostage ; le palonnier peut donc être très simple.

Lorsque le dévers ou le profil en long sont très marqués, il est préférable de présenter les voussoirs dans une position proche de leur position finale, ce qui nécessite des palonniers beaucoup plus

élaborés, avec réglage transversal et/ou longitudinal.

Dans le cas du présent projet, la pose des voussoirs a été effectuée à l'aide de grues mobiles.



**Figure 1.8.** Pose à la grue terrestre

### ● Autre méthode de pose

Outre la poutre de lancement et la grue, d'autres méthodes de pose des voussoirs préfabriqués sont envisageables.

Quand on peut amener chaque voussoir l'aplomb de son emplacement final, il est possible de lever des voussoirs ou des parties de voussoirs "au treuil", c'est-à-dire avec des poutres métalliques légères hissant les voussoirs jusqu'au tablier.



**Figure 1.9.** Pose au portique

#### **1.5.3.4. Le brêlage provisoire**

Afin de libérer aussi vite que possible l'engin de pose, les entreprises procèdent à un brêlage des voussoirs en cours de pose avant de mettre en œuvre la précontrainte de fléau. Ce brêlage, qui est démonté une fois les câbles définitifs tendus et la colle époxy durcie, est constitué de barres, en général de 36 mm de diamètre, ancrées soit dans des bossages situés en haut et en bas des âmes, soit dans des montants d'âmes, soit dans les hourdis. La contrainte normale exercée par ces barres doit être d'environ 0,2 MPa, ce qui permet un bon étalement et la prise de la colle époxy et évite toute décompression des fibres extrêmes [14].

#### **1.5.3.5. Les clavages**

Les clavages entre fléaux sont exécutés de manière traditionnelle, en coulant en place un joint d'une vingtaine de centimètres. Compte tenu de cette très faible longueur, les entreprises utilisent souvent pour cette tâche des coffrages bandes à éléments modulaires appelées calepinage.

#### **1.5.3.6. Les tronçons coulés sur cintre**

Comme pour le coulage en place, les extrémités côté culées des travées de rive sont en général construites sur cintre. Dans le cas des voussoirs préfabriqués, les voussoirs correspondants sont posés et assemblés sur un cintre. Afin de permettre les mouvements nécessaires à une parfaite conjugaison des clefs, des cales ou des vérins sont interposés entre le dessous des voussoirs et le dessus du cintre.

#### **1.5.3.7. Le collage des voussoirs**

Avant pose, une colle époxydique est mise en place sur la face côté pile du voussoir en cours de pose. Cette colle est étalée juste avant la pose, à la main, et son épaisseur doit être d'environ 1 mm.

Dans les ouvrages construits jusqu'à ces dernières années la colle jouait un quadruple rôle. Elle avait pour objet :

Pendant la construction, avant durcissement :

- De lubrifier les surfaces en contact lors de la mise en place des voussoirs.
- De compenser les imperfections mineures dans la conjugaison des surfaces.

Dans l'ouvrage terminé, après durcissement :

- De réaliser l'étanchéité à l'eau des joints, en particulier au droit de la dalle de Chaussée
- De participer à la résistance de la structure en transmettant de travers les joints des

efforts de compression et de cisaillement.

Pendant la construction, avant durcissement :

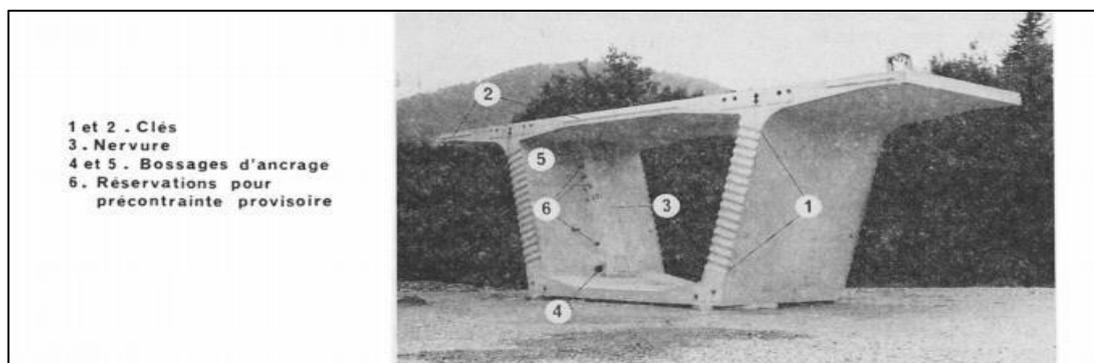
- De lubrifier les surfaces en contact lors de la mise en place des voussoirs.
- De compenser les imperfections mineures dans la conjugaison des surfaces.

Dans l'ouvrage terminé, après durcissement :

- De réaliser l'étanchéité à l'eau des joints, en particulier au droit de la dalle de Chaussée
- De participer à la résistance de la structure en transmettant de travers les joints des efforts de compression et de cisaillement.

Mais, par suite de leur lubrification, les joints ne présentent pratiquement aucune résistance au cisaillement avant Polymérisation de la colle. Il a donc été nécessaire, dans les premiers ouvrages de ce type, de ménager dans chaque amé des voussoirs une clé destinée à empêcher le glissement relatif au droit des joints et à assurer le transfert de l'effort tranchant.

Les voussoirs de deuxième génération disposent de Joints à clés multiples. leurs formes permettent la transmission des efforts de cisaillement entre voussoirs sans faire appel à la résistance des colles époxy. [15]



**Figure 1.10.** Voussoirs à Clés multiples

### **1.5.3.8. La stabilisation des fléaux**

Le système de stabilisation des fléaux est en grande partie conditionné par les dimensions des têtes de pile.

Toutefois, la conjugaison des voussoirs ne permettant pas de corriger facilement la géométrie des fléaux, ces derniers sont souvent construits en appui sur un ensemble de vérins équipés d'écrous de sécurité.

Lorsque, au contraire, des cales classiques sont utilisées, un matage doit être réalisé entre le dessus de celles-ci et la sous-face des voussoirs sur pile, pour corriger les défauts d'exécution et de pose de ces pièces

Pour être tout à fait complet, nous préciseront enfin que les fléaux sont parfois stabilisés par la poutre de lancement elle-même, comme ce fut le cas sur les chantiers des viaducs Baldwin, aux Etats Unis.

### **1.5.3.9. Influence des méthodes de pose sur le dimensionnement des ouvrages**

Les poses à la grue ou au portique n'engendrent que très peu d'efforts longitudinaux sur le tablier, les charges appliquées aux fléaux se limitant au poids des éventuelles passerelles de travail.

Lorsque les voussoirs sont posés à la poutre de lancement ou au treuil, des efforts plus importants, dus aux poids de ces dispositifs et des voussoirs manutentionnés, se développent dans le tablier et doivent donc être pris en compte.

En flexion locale, quelle que soit la méthode de pose utilisée, il convient de vérifier que le ferrailage des voussoirs est capable de reprendre les moments transversaux qui se développent pendant le stockage et la manutention des voussoirs. Lorsque la construction se fait au moyen d'une poutre de lancement et/ou prévoit le passage d'un fardier, il convient également de prendre en compte les efforts locaux engendrés par ces engins dans le dimensionnement du ferrailage passif des voussoirs.

## 1.6. Phases de construction du projet

Les principales phases constructives sont résumées dans le tableau suivant :

**Tableau1.1.** Calendrier des phases constructives

Phases de construction	Durée de l'opération [Jours]
Exécution des appuis du tablier	60 Jours
Lancement des voussoirs du tablier à partir de la pile P1 et application de la précontrainte.	30 Jours
Pose du Voussoir de tête-culée C1 et les voussoirs préfabriqués adjacents au moyen de palées de soutènements temporaires	10 Jours
Coulage du joint de clavage C1-P1	30 jours
Mise en tension des câbles de continuité C1-P1	10 Jours
Exécution des voussoirs de fléau à partir de la pile P2 et mise en tension des câbles de fléau.	30 Jours
Exécution du voussoir de clavage P1-P2	30 Jours
Application de la précontrainte des câbles de continuité entre P1 et P2	10 Jours
Pose du Voussoir de tête-culée C2 et les voussoirs préfabriqués adjacents au moyen de palées de stabilité temporaires	10 Jours
Coulage du joint de clavage C2-P2	30 Jours
Mise en tension des câbles de continuité inférieurs C2-P2	10 Jours

Les différentes phases de réalisation du projet sont résumées dans les figures suivantes :



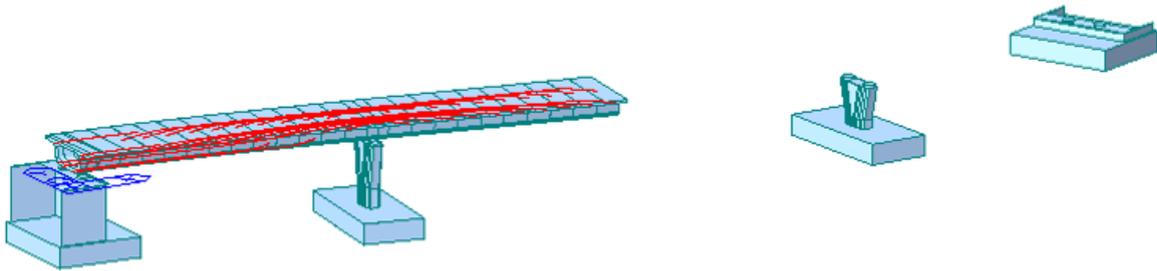
**Figure 1.11.** Réalisation des piles et culées



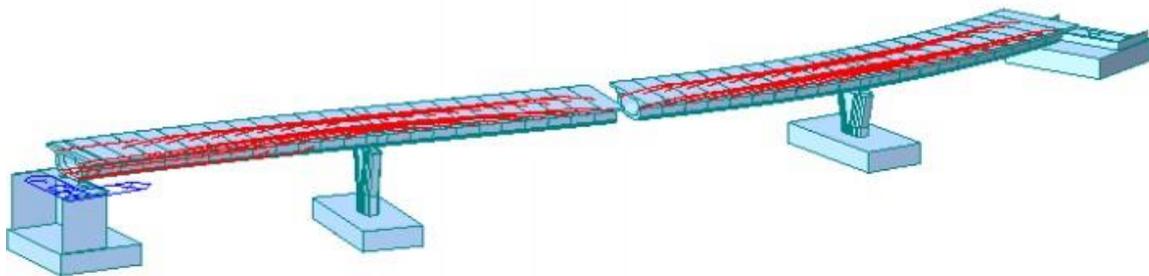
**Figure 1.12.** Réalisation du fléau P1



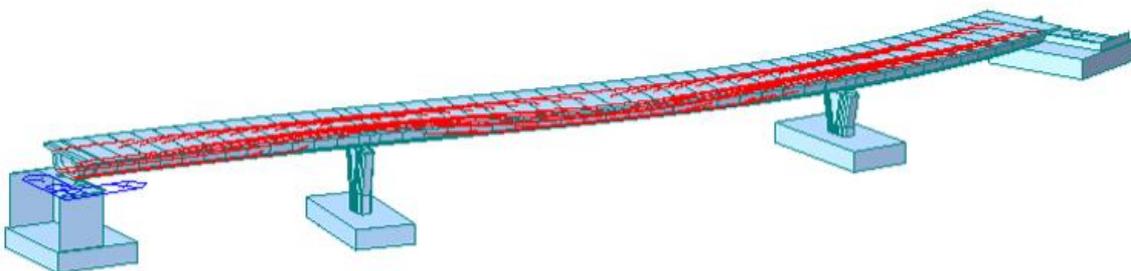
**Figure 1.13.** Réalisation des voussoirs coulés sur cintre C1



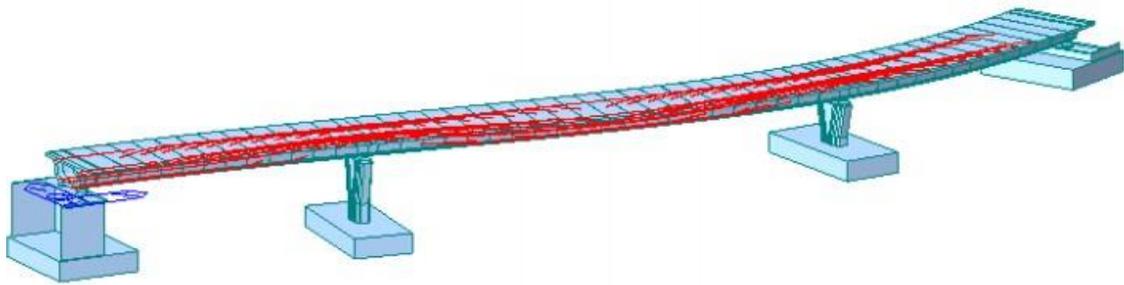
**Figure 1.14.** Clavage C1-P1 et mise en tension des câbles éclisses



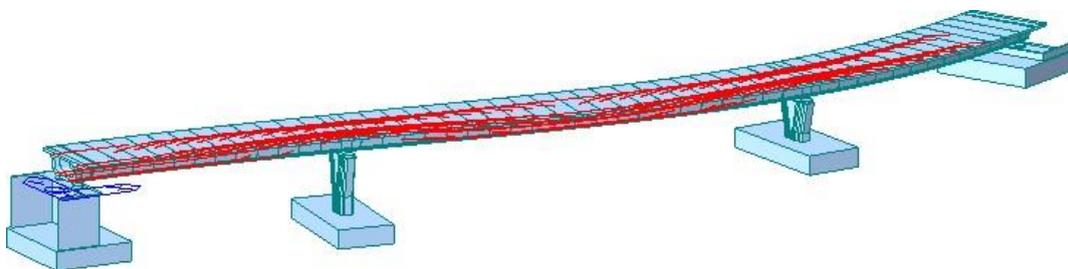
**Figure 1.15.** Réalisation du fléau P2



**Figure 1.16.** Clavage P1-P2 et mise en tension des câbles éclisses



**Figure 1.17.** Réalisation des voussoirs coulés sur cintre C2



**Figure 1.18.** Clavage et mise en tension des câbles éclisses

## 1.7. Caractéristiques des matériaux

### 1.7.1. Béton

Le béton est défini par sa résistance caractéristique à la compression sur cylindre à 28 jours notée (fractile 5%).  $f_{ck}$  est compris entre 12 et 90 MPa.

Les propriétés peuvent être déterminées par le tableau 3.1 de l'EN 1992-1-1:

- Résistance caractéristique à la compression sur cylindre :  $f_{ck} = 30$  MPa;
- Résistance moyenne à la compression sur cylindre :  $f_{cm} = 38$  MPa;
- Résistance caractéristique à la compression sur cube :  $f_{c\ cube} = 37$  MPa;
- Valeur moyenne de la résistance à la traction :  $f_{ctm} = 2.9$  MPa;
- La résistance caractéristique à la traction :  $f_{ctk,0.05} = 2$  MPa;
- La résistance caractéristique à la traction :  $f_{ctk,0.95} = 3.8$  MPa;
- Module d'élasticité :  $E_{cm} = 33$  GPa.

On utilise pour les voussoirs coulés en place un béton de classe C40/50 et un ciment CEM II/A 42.5.

- Résistance caractéristique à la compression sur cylindre :  $f_{ck} = 40$  MPa;
- Résistance moyenne à la compression sur cylindre :  $f_{cm} = 48$  MPa;
- Résistance caractéristique à la compression sur cube :  $f_{c\ cube} = 50$  MPa;
- Valeur moyenne de la résistance à la traction :  $f_{ctm} = 3.5$  MPa;
- La résistance caractéristique à la traction :  $f_{ctk,0.05} = 2.5$  MPa;
- La résistance caractéristique à la traction :  $f_{ctk,0.95} = 4.6$  MPa;
- Module d'élasticité :  $E_{cm} = 35$  GPa.

On utilise pour les voussoirs préfabriqués un béton de classe C45/55 et un ciment CEM II/A 42.5.

- Résistance caractéristique à la compression sur cylindre :  $f_{ck} = 45$  MPa;
- Résistance moyenne à la compression sur cylindre :  $f_{cm} = 53$  MPa;
- Résistance caractéristique à la compression sur cube :  $f_{c\ cube} = 55$  MPa;
- Valeur moyenne de la résistance à la traction :  $f_{ctm} = 3.8$  MPa;
- La résistance caractéristique à la traction :  $f_{ctk,0.05} = 2.7$  MPa;
- La résistance caractéristique à la traction :  $f_{ctk,0.95} = 4.9$  MPa;
- Module d'élasticité :  $E_{cm} = 36$  GPa.

La résistance moyenne à la compression du béton  $f_{cm}(t)$  à un âge  $t$  quelconque en jours peut être déduite de la résistance  $f_{cm}$  à 28 jours à partir de la relation (Art 3.1.2 (6)):

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t)f_{cm}$$

avec

$$\beta_c(t) = \exp\{s[1 - (28/t)^{1/2}]\}$$

$f_{cm}(t)$  est la résistance moyenne en compression du béton à l'âge de  $t$  jours.

$f_{cm}$  est la résistance moyenne en compression du béton à 28 jours.

$\beta_{cc}(t)$  est un coefficient qui dépend de l'âge  $t$  du béton est l'âge du béton, en jours

$s$  est un coefficient qui dépend du type de ciment :

- $s = 0,20$  pour les ciments de classe de résistance CEM 42,5 R/ 52,5 N/52,5R
- $s = 0,25$  pour les ciments de classe de résistance CEM 32,5 R, CEM 42,5N
- $s = 0,38$  pour les ciments de classe de résistance CEM 32,5 N (Classe S)

### 1.7.2 Déformation élastique

Le module d'élasticité du béton dépend du module d'élasticité de ses constituants. Des valeurs approchées de  $E_{cm}$ , module sécant entre  $\sigma_c = 0$  et  $0,4f_{cm}$ , sont données dans le Tableau 3.1 :

$$E_{cm}(t) = \left[ \frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}} \right] E_{cm}$$

expression dans laquelle  $E_{cm}(t)$  et  $f_{cm}(t)$  sont les valeurs à l'âge  $t$  (jours) et  $E_{cm}$  et  $f_{cm}$  les valeurs déterminées à 28 jours.

Le coefficient de Poisson peut être pris égal à 0,2 pour le béton non fissuré et à 0 pour le béton fissuré.

### 1.7.3. Relations contrainte-déformation pour le calcul des sections

Le calcul des sections peut être effectué en utilisant la relation contrainte-déformation suivante :

$$\sigma_c = f_{cd} [1 - [1 - \varepsilon_c / -\varepsilon_{c2}]^n ]$$

$$\text{Pour } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2}$$

$$\sigma_c = f_{cd}$$

$$\text{Pour } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}$$

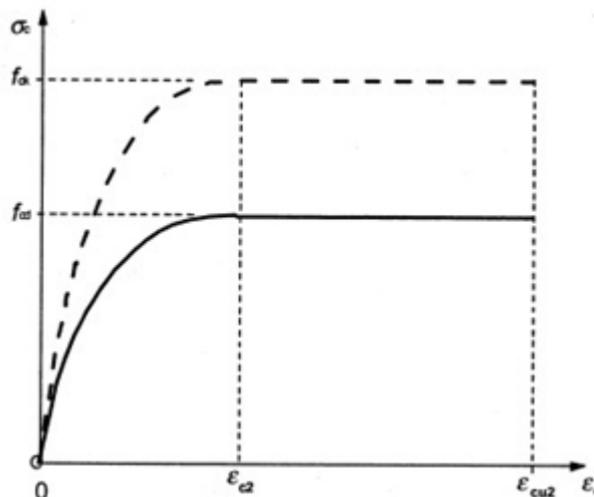
Où :

$n$  est l'exposant, tel qu'indiqué dans le Tableau 3.1

$\varepsilon_{c2}$  est la déformation atteinte pour la contrainte maximale, indiquée dans le Tableau 3.1

$\varepsilon_{cu}$  est la déformation ultime, telle qu'indiquée dans le Tableau 3.1.

Le diagramme contraintes ( $\sigma_{bc}$ ) -déformations ( $\varepsilon_{bc}$ ) du béton utilisé dans tous les cas est celui appelé "parabole-rectangle":



**Figure 1.19.** Diagramme parabolique rectangle pour le béton comprimé

Où

- $\varepsilon_{c2} = 0.2\%$
- $\varepsilon_{cu2} = 0.35\%$

Pour les combinaisons fondamentales :

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} c_k(t)}{\gamma_c}$$

avec

- $\alpha_{cc} = 1.00$
- $\gamma_c = 1.50$

Pour les combinaisons accidentelles:

avec

- $\alpha_{cc} = 1.00$
- $\gamma_c = 1.50$

#### 1.7.4. Armatures passives

FeE400

$f_{yk} = f_e = 400$  Mpa

$E_a = 200$  GPa

La courbe déformation ( $\varepsilon_s$ ) – contraintes ( $\sigma_s$ ) de l'acier est conventionnellement définie ci-dessous.

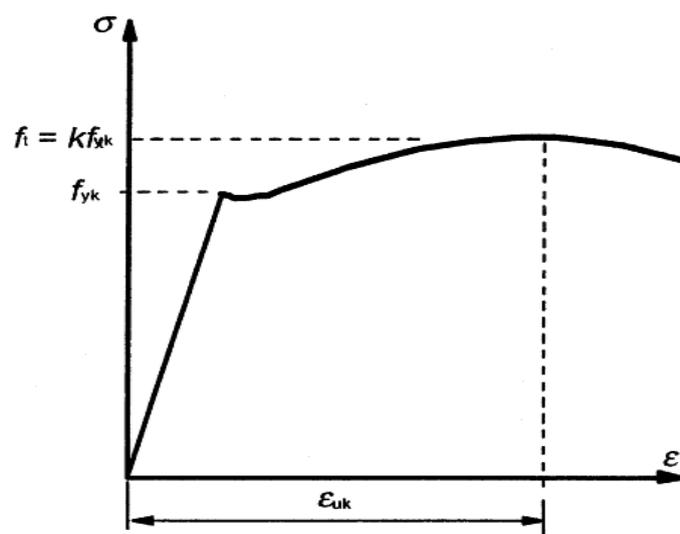
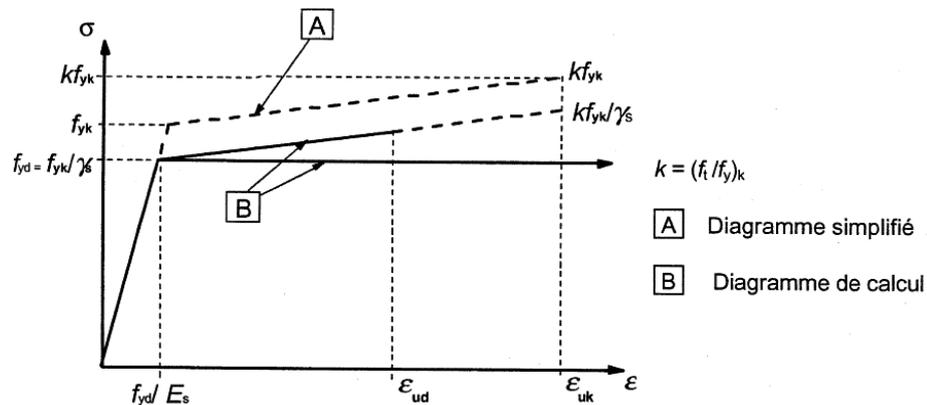


Figure 1.20. Modèle contrainte-déformation pour les barres passives (EN1992-2)

On considère une relation contrainte-déformation idéalisée (branche post-élastique croissance) du type reporté dans la figure ci-dessous :

$$y_d = \frac{yk}{\gamma_s}$$



**Figure 1.21.**Modèle contrainte-déformation (diagramme idéalisée) pour les barres passives (EN1992-2)

Les valeurs utilisées pour les coefficients  $\gamma_a$  sont les suivantes:

- Pour les combinaisons fondamentales:  $\gamma_a = 1.15$
- Pour les combinaisons accidentelles:  $\gamma_a = 1.00$

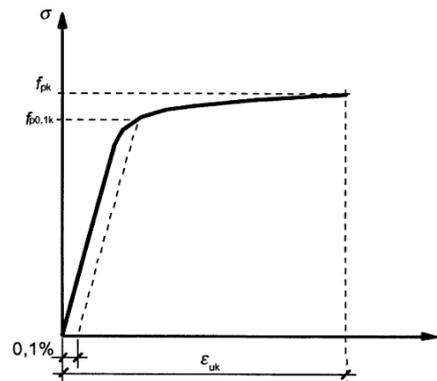
### 1.7.5. Armatures de précontraintes

On a adopté une précontrainte par post-tension en employant des câbles à T15S ayant les caractéristiques suivantes :

- Module d'élasticité  $E_p = 1900000$  MPa
- Résistance en traction  $f_{pk} = 1860$  MPa
- Limite conventionnelle d'élasticité  $f_{p0,1k} = 1640$  MPa
- Section nominale  $150$  [mm<sup>2</sup>]

Les torons prévus pour constituer les câbles de précontrainte devront avoir les caractéristiques mécaniques suivantes :

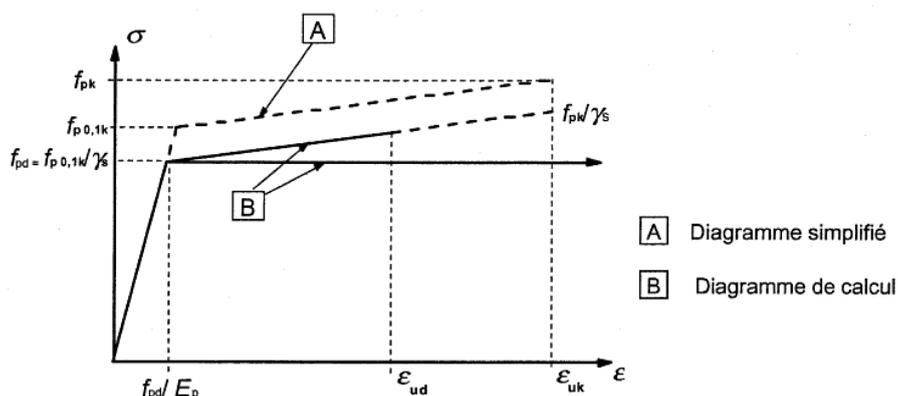
- $f_{pk} = 1860 \text{ MPa}$
- $f_{p0,1k} = 1640 \text{ MPa}$
- $E_p = 195000 \text{ MPa}$



**Figure 1.22.** Modèle contrainte-déformation pour les torons de précontrainte (EN1992-2)

On considère une relation contrainte-déformation idéalisée (branche post-élastique croissance) du type reporté dans la figure 1.23 :

$$y_d = \frac{f_{yk}}{s}$$



**Figure 1.23.** Modèle contrainte-déformation (diagramme idéalisé) pour les torons de précontrainte (EN1992-2)

pour ce qui concerne la relaxation, on considère un acier TBR (très basse relaxation).

**CHAPITRE 2 :**  
**Dimensionnement par les Eurocodes**

## 2.1. Présentation des Eurocodes

Les Eurocodes constituent un ensemble de normes élaborées au niveau européen avec comme ambition de contribuer à l'uniformisation des règles techniques de conception et de calcul des structures. Après la parution des normes européennes expérimentales (XP ENV ou ENV), les Eurocodes actuels (EN) sont le résultat de la transformation sur une période relativement courte de cet ensemble de textes expérimentaux. Ils ont alors nettement gagné en cohérence et bénéficié d'une remise à jour proche des derniers développements techniques et scientifiques.

Lorsqu'on calcule un pont en béton armé ou précontraint, le texte normatif directeur est la partie 2 de l'Eurocode 2 (EN1992-2). L'EN 1992-2 n'appelle que les Eurocodes généraux (c'est à dire les Eurocodes 0, 1, 7 et 8) et les parties 2 des autres Eurocodes "matériau" (c'est-à-dire les Eurocodes 2, 3, 5, 6 et 9). A l'exception de certaines exceptions, pour un pont, une partie 1-1 (règles générales) d'un Eurocode "matériau" ne peut donc être appelée que via la partie 2 de ce même Eurocode.

L'Eurocode 2 comporte actuellement quatre parties :

- Partie 1-1 : Règles générales et règles pour bâtiments
- Partie 1-2 : Calcul du comportement au feu
- Partie 2 : Ponts en béton
- Partie 3 : Silos et réservoirs

Les normes suivantes ont été utilisées dans cette étude :

### **Eurocode 0 : Bases de calcul des structures :**

- Eurocode EN 1990 : Bases de calcul des structures.

### **Eurocodes 1 : Actions sur les structures :**

- EN 1991-2 : Actions sur les ponts dus au trafic.
- EN 1991-1-5 : Actions générales – Actions thermiques.
- EN 1991-1-6 : Actions générales – Actions en cours d'exécution.

### **Eurocode 2 : Calcul des structures en béton :**

- Eurocode EN 1992-1-1 : Règles générales et règles pour bâtiments.
- Eurocode EN 1992-2 : Calcul des structures en béton.

## 2.2. Actions et combinaisons d'actions

### 2.2.1. Actions permanentes

#### 2.2.1.1. Béton et superstructures

Le poids propre du béton est calculé à partir de ces dimensions nominales et du poids volumique du béton armé ou précontraint dont la valeur est prise égale à  $25 \text{ kN/m}^3$ .

Les superstructures sont constituées par tous les éléments du tablier qui n'interviennent pas dans la résistance mécanique de l'ouvrage. L'évaluation du poids propre des caissons doit tenir compte de la variabilité de la section dans l'analyse longitudinale globale. En flexion transversale, on peut considérer des valeurs moyennes.

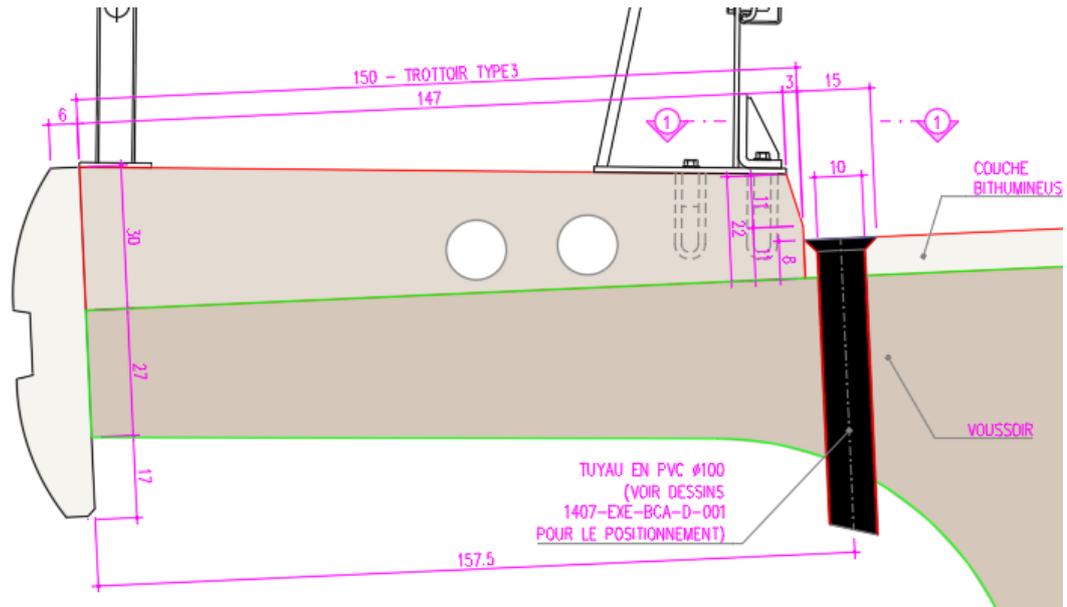
L'asphalte coulé utilisé pour la couche d'étanchéité et le béton bitumineux utilisé pour la couche de roulement ont un poids volumique de  $25 \text{ kN/m}^3$ , comme il est indiqué au Tableau A.6 de l'EN 1991-1-1[5]. La chape d'étanchéité a une épaisseur de 3 cm et posée sur toute la largeur du tablier. La couche de roulement a une épaisseur de 8 cm et posée sur toute la largeur roulable.

Pour tenir compte des incertitudes et de la variabilité sur le poids de la chaussée, le poids de la couche d'étanchéité et de la couche de roulement est décomposé en deux valeurs caractéristiques minimale  $G_{k,inf}$  et maximale  $G_{k,sup}$ .

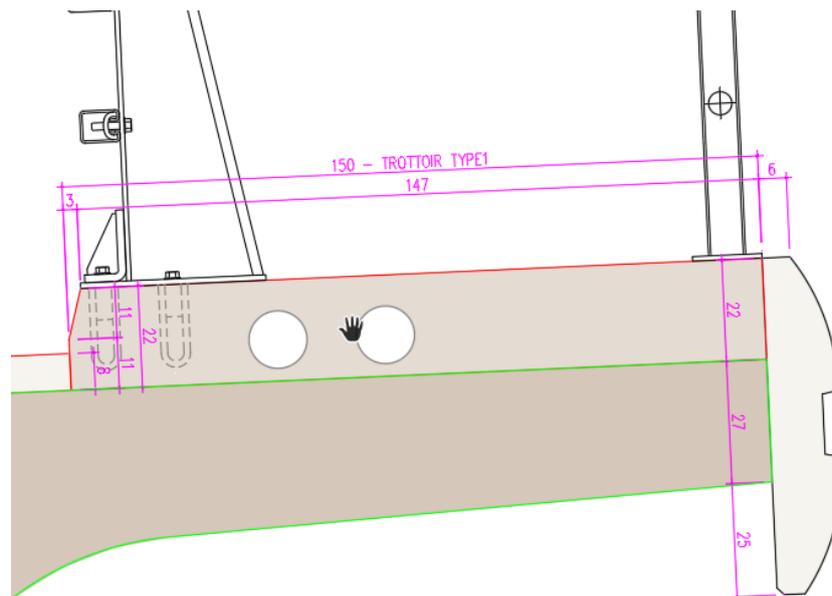
Cette notion est particulièrement importante dans le cas d'ouvrages précontraints, pour lesquels un dimensionnement à charge minimal doit être effectué afin d'éviter la rupture due à une précontrainte excessive.

Les valeurs nominales de la couche d'étanchéité et des enrobées sont pondérées par +40% et -20% (EN1991-1-1, 5.2.3).

Le tablier comporte deux trottoirs pleins de dimensions différentes comme il est illustré sur la figure 2.1. Le poids des trottoirs est calculé à partir des dimensions nominales et du poids volumique du béton armé



**Figure 2.1.** Détail trottoirs coté gauche



**Figure 2.2.** Détail des trottoirs coté droite

Le poids d'une barrière BN4 est représenté par une charge verticale uniformément répartie de 70 daN/m.

### 2.2.1.2. Force de précontrainte

La précontrainte est connue en force et en tracé. elle est généralement modélisée sous forme d'actions extérieures appliquées aux sections du pont.

La force appliquée à l'armature de précontrainte  $P_{\max}$  (la force appliquée à l'extrémité active pendant la mise en tension) ; naturellement elle doit être limitée pour éviter la plastification des armatures et ne doit pas dépasser la valeur suivante :

$$P_{\max} = A_p \cdot \sigma_{p,\max}$$

où :

$A_p$  est l'aire de la section des armatures de précontrainte.

La contrainte maximale de l'armature :

$$\sigma_{p,\max} = \min \{k_1 \cdot f_{pk} ; k_2 \cdot f_{p0,1k}\}$$

Les valeurs recommandées sont

$$k_1 = 0,8$$

$$k_2 = 0,9.$$

La valeur de la force de précontrainte initiale  $P_{m0}(x)$  (à l'instant  $t = t_0$ ) appliquée au béton immédiatement après mise en tension et mise en place de l'ancrage (précontrainte par post-tension) ou après transfert de la force de précontrainte (précontrainte par pré-tension) est obtenue en retranchant de la force à la mise en tension  $P_{\max}$  les pertes instantanées  $\Delta P_i(x)$  ; il convient de ne pas dépasser la valeur suivante :

$$P_{m0}(x) = A_p \cdot \sigma_{pm0}(x)$$

où la contrainte dans l'armature immédiatement après la mise en tension est :

$$\sigma_{pm0}(x) = \min \{k_7 \cdot f_{pk} ; k_8 \cdot f_{p0,1k}\}$$

La contrainte dans l'armature immédiatement après la mise en tension

Les valeurs recommandées sont

$$k_7 = 0,75$$

$$k_8 = 0,85.$$

Une force de précontrainte probable représentée par  $P_{m,t(x)}$ . C'est la force de précontrainte variable le long de l'armature et dans le temps, qui résulte de la déduction des pertes instantanées et des pertes différées.

Pour les justifications aux ELS, la précontrainte est représentée par deux valeurs caractéristiques  $P_{k,inf}$  et  $P_{k,sup}$  encadrant la valeur probable  $P_m$ , encore communément appelé fourchette, avec :

$$P_{k,inf} = r_{inf} \times P_{m,t}$$

$$P_{k,sup} = r_{sup} \times P_{m,t}$$

Les valeurs de  $r_{inf}$  et  $r_{sup}$  sont de 0,95 et 1,05 pour la précontrainte extérieure ou la précontrainte par pré-tension ou bien 0,90 et 1,10 pour la précontrainte intérieure adhérente par post-tension.

Pour les justifications vis-à-vis des ELU, au contraire, seule la valeur probable du précontraint est à considérer, d'éventuels écarts par rapport à cette valeur ayant peu d'incidence sur la sécurité à rupture [5].

### 2.2.1.3. Fluage et retrait

Les lois constitutives qui donnent l'évolution dans le temps du retrait et du fluage du béton sont celles des règles EN 1992-1-1 : 2005 [6].

On a considéré que les voussoirs préfabriqués ne seront pas traités thermiquement.

Toutes les lois constitutives d'évolution des matériaux en fonction du temps ont été appliquées au modèle numérique à l'aide du logiciel de calcul MIDAS Civil, par lequel a été déterminée la redistribution des efforts due aux phénomènes lents.

Le retrait et le fluage sont des propriétés du béton dépendantes du temps. Il convient généralement de tenir compte de leurs effets pour la vérification aux états-limites de service.

Pour les états-limites ultimes, il convient de ne considérer les effets du retrait et du fluage que lorsque ceux-ci sont significatifs dans la vérification des états-limites ultimes de stabilité, par exemple, lorsque les effets du second ordre ont leur importance.

Dans les autres cas, il n'y a pas lieu de prendre ces effets en considération pour les états-limites ultimes, sous réserve toutefois que la ductilité et la capacité de rotation des éléments soient suffisantes.

Le fluage et le retrait du béton dépendent de l'humidité ambiante, des dimensions de l'élément et de la composition du béton.

## ● Fluage

Le fluage du béton est le phénomène selon lequel la déformation du béton soumis à une charge constante continue de croître dans le temps. Lorsque le fluage est pris en compte, il convient d'en évaluer les effets, dans le dimensionnement, sous la combinaison quasi-permanente des actions, indépendamment de la situation de projet considérée durable, transitoire ou accidentelle.

Dans la plupart des cas, les effets du fluage peuvent être évalués sous charges permanentes et pour la valeur moyenne de la précontrainte.

Le fluage dépend également de la maturité du béton lors du premier chargement ainsi que de la durée et de l'intensité de la charge.

En analyse linéaire, la prise en compte du fluage se fait par l'utilisation du module effectif du béton [EC2-1-1 7.4.3[6]], un équivalent du module différé qui n'est pas utilisé explicitement dans l'Eurocode 2 pour les calculs de contrainte mais qui est défini pour les calculs de déformations.

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \phi(t, t_0)}$$

$\phi(t, t_0)$  est le coefficient de fluage fonction d' $E_c$ , calculé à partir des formules de l'annexe B de L'EN 1992-2-1[6].

$t_0$  âge du béton au moment du premier chargement.

$\phi(t, t_0)$  coefficient de fluage à l'instant  $t$ , calculé à partir des formules de l'Annexe B de L'EN 1992-1-1 [5].

Le coefficient de fluage est aussi fonction du rapport  $h_0 = 2A_c/u$ , où  $A_c$  est l'aire de la section transversale du béton et  $u$  le périmètre de la partie exposée à la dessiccation, du type de ciment et du taux d'humidité ambiante.

Dans les cas où une grande précision n'est pas requise, la valeur obtenue à l'aide de la Figure 3.1 de l'EC2-1-1 peut être considérée comme le coefficient de fluage, sous réserve que le béton ne soit pas soumis à une contrainte de compression supérieure à  $0,45 f_{ck}(t_0)$  à un âge  $t_0$ , âge du béton au moment du chargement et dans des conditions courantes de température ambiante ( $-40^\circ\text{C}, +40^\circ\text{C}$ ) et d'humidité relative ( $40\% < RH < 100\%$ ).

## ● Retrait

Le retrait est le raccourcissement spontané du béton au cours de son durcissement en l'absence de toute contrainte. Le retrait a plusieurs origines, mais les deux effets principaux sont le retrait d'origine chimique, dit « retrait endogène » et le retrait de dessiccation ou retrait de séchage.

Le retrait endogène  $\epsilon_{ca}$  est dû à une diminution du volume de béton du fait de la réaction chimique de prise du béton. Les molécules avant réaction chimique occupent en effet un volume plus élevé que les molécules après réaction, ce qui engendre donc une diminution de volume.

Le retrait de dessiccation  $\epsilon_{cd}$  provient de l'évaporation des molécules d'eau non consommées par la réaction chimique. Ceci entraîne également un raccourcissement du béton. Ce raccourcissement total peut se mettre sous la forme :

$$\epsilon_{cs}(t) = \epsilon_{cd}(t) + \epsilon_{ca}(t)$$

La valeur finale du retrait de dessiccation peut être lue dans le Tableau 3.2 de l'EN 1992-1-1 [6].

L'évolution du retrait de dessiccation avec le temps est fonction du rayon moyen, l'âge du béton à l'instant considéré de l'âge au début du retrait de dessiccation, ceci correspond normalement à la fin de la cure, de l'aire de la section du béton et du périmètre de la partie de la section exposée à la dessiccation. L'Art 3.1.4(6) de l'EN 1992-1-1 [6] fourni les formules permettant d'évaluer le retrait de dessiccation et le retrait endogène.

## 2.2.2. Actions variables

### 2.2.2.1. Charges de construction

Le dimensionnement d'ouvrages construits par phases doit tenir compte, pour les vérifications en phases intermédiaires, des charges de chantier. Les charges de construction sont considérées comme des actions variables et sont définies par l'EN 1991-1-6 [4] .

Ces groupes de charges peuvent être regroupés et appliqués en tant qu'action variable unique  $Q_c$ .

Les charges de construction à retenir en phase de construction des fléaux sont les suivantes :

#### - Personnel et petit outillage :

Pour les ponts, il s'agit des charges dues au personnel d'exécution, à l'encadrement et aux visiteurs, le cas échéant avec un équipement léger de chantier. Ces charges sont modélisées par une charge uniformément répartie  $q_{ca}$  . La valeur caractéristique de cette charge répartie est :

$$q_{ca} = 1 \text{ kN/m}^2$$

Cette charge est appliquée de manière à obtenir les effets les plus défavorables. Pour un pont construit par encorbellements successifs, elle est appliquée verticalement sur la surface d'un demi-fléau (charge gravitaire).

#### - Stockage d'éléments déplaçables $Q_{cb}$ :

Pour les ponts, il s'agit des charges dues aux éléments préfabriqués, équipements et aux matériels divers (par exemple matériel de précontrainte) stockés sur le tablier

Ces charges sont modélisées par une charge uniformément répartie  $q_{cb}$  et une charge concentrée

Les valeurs caractéristiques de la charge répartie et de la charge concentrée sont :

$$q_{cbk} = 0,2 \text{ kN/m}^2 \quad F_{cb,k} = 100 \text{ kN}$$

Dans le cas d'un pont construit par encorbellements successifs, la charge répartie est appliquée verticalement sur la surface d'un demi-fléau et la charge concentrée est appliquée à l'arrière du voussoir en cours de bétonnage.

### - Poids des équipements non permanents $Q_{CC}$ :

Pour les ponts, il s'agit des équipements non permanents en cours d'exécution, qu'ils soient fixes (échafaudage, cintre) ou déplaçables (équipages mobiles, poutre de lancement, avant-bec de poussage, contrepoids, mât de haubanage provisoire, etc.).

Si aucune information n'est disponible pour caractériser ces charges, ces charges sont modélisées par une charge uniformément répartie  $q_{cc}$ . La valeur caractéristique de la charge répartie est :

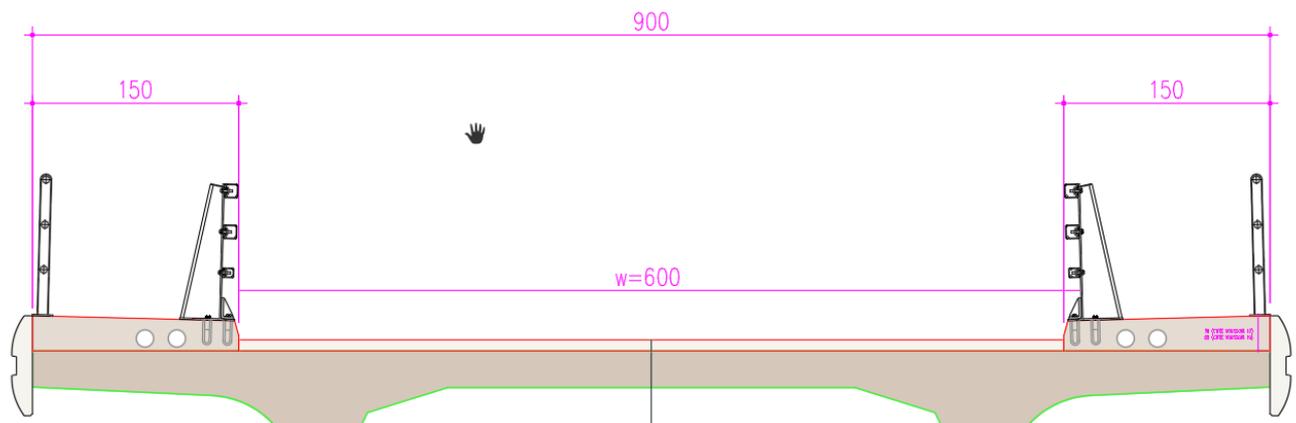
$$q_{cc,k} = 0,5 \text{ KN/m}^2$$

Les charges définies ci-dessus sont disposées de manière à provoquer les effets maximum et minimum qui peuvent ou non être symétriques.

### 2.2.2.2. Actions de trafic routier

#### ● Découpage de la chaussée en voies conventionnelles

Il convient de mesurer la largeur  $w$  de la chaussée entre bordures ou entre limites intérieures des dispositifs de retenue des véhicules, en excluant la distance entre les dispositifs de retenue fixes ou les bordures du terre-plein central ainsi que la largeur de ces dispositifs de retenue.



**Figure 2.3.** La largeur de la chaussée

Les largeurs  $w_1$  des voies d'une chaussée et le plus grand nombre entier possible " $n_1$ " de telles voies de cette chaussée selon le tableau 4.1 de l'EN 1991-2 [2] .

La largeur de la chaussée  $w = 6$  donne un nombre de voie de circulation calculé avec la formule donnée dans le Tableau 4.1 de l'EN 1991-2 [2] :

$$n_l = 2$$

Avec une largeur d'une voie conventionnelle égale à 3m, nous trouvons une aire résiduelle mesurant :

$$w - 3 \times n_l = 0 \text{ m}$$

### ● Modèles de charges verticales

Pour les ponts routiers, quatre modèles de charges sont définis dans l'Eurocode 1 pour la vérification de la sécurité structurale.

- Modèle de charge 1 : charges concentrées et uniformément réparties, couvrant la plupart des effets du trafic de camions et de voitures. Ce modèle est destiné à des vérifications générales et locales.

- Modèle de charge 2 : une charge d'essieu unique appliquée à des surfaces spécifiques de contact des pneumatiques, couvrant les effets dynamiques du trafic normal sur des éléments structuraux très courts. Ce modèle est à considérer séparément et seulement pour les vérifications locales.

- Modèle de charge 3 : une série d'ensembles de charges d'essieu représentant des véhicules spéciaux (par exemple pour transport industriel ou militaire) qui peuvent circuler sur les routes ouvertes à des charges exceptionnelles. Ce modèle n'est à utiliser que lorsque, et dans la mesure où, le maître d'ouvrage l'exige, pour des vérifications générales et locales.

- Modèle de charge 4 : lorsqu'il y a lieu de le considérer, le chargement de foule est représenté par une charge nominale (comprenant une majoration dynamique) qui est la charge caractéristique. Sauf spécification différente, il convient de l'appliquer sur les longueurs et largeurs appropriées du tablier de pont-route, terre-plein central compris le cas échéant. Ce système de chargement, destiné à des vérifications générales, n'est associé qu'à une situation transitoire.

Dans le cadre de ce mémoire on se contente de considérer les modèle de charge LM1.

Les coefficients  $\alpha_{Qi}$ ,  $\alpha_{qi}$ ,  $\alpha_{qr}$  affectant l'intensité des diverses composantes du modèle n°1 (voir tableau 4.3.b) permettent d'associer à un ouvrage particulier une classe de chargement.

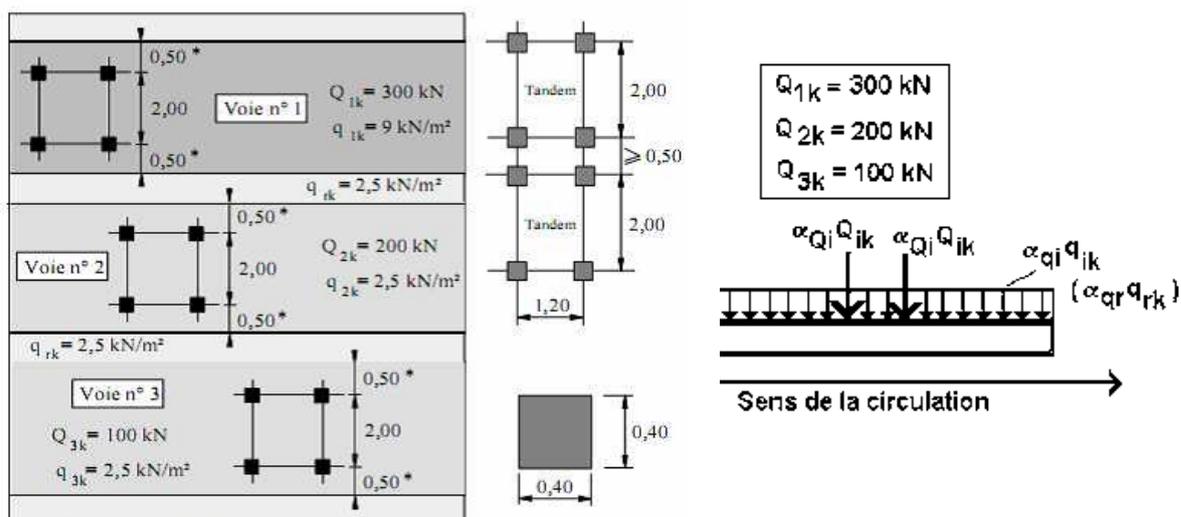
**Tableau 2.1.** Coefficients d'ajustement du modèle de charges principal

	$\alpha_{Q1}$	$\alpha_{Qi}(i \geq 2)$	$\alpha_{q1}$	$\alpha_{qi}(i \geq 2)$	$\alpha_{qr}$
1 <sup>re</sup> classe	1	1	1	1	1
2 <sup>e</sup> classe	0,9	0,8	0,7	1	1
3 <sup>e</sup> classe	0,8	0,5	0,5	1	1

Les coefficients d'ajustement sont pris ici en classe 2, concernant les réseaux routiers principal et autoroutier. Les valeurs des charges pondérées UDL et des essieux TS pour chaque voie sont résumées dans le tableau 2.2 Les tandems sont centrés dans leurs voies conventionnelles.

**Tableau 2.2.** Valeurs des charges pondérées du système LM1

	Voie 1	Voies 2
$\alpha_{qi}$ ou $\alpha_{qr}$	0.7	1
$\alpha_{Qi}$ ou $\alpha_{Qr}$	0,9	0.8
$\alpha_{qi} q_{ik}$ ou $\alpha_{qr} q_{rk}$ (kN/m <sup>2</sup> )	6.3	2.5
$\alpha_{Qi} Q_{ik}$ ou $\alpha_{qr} Q_{rk}$ (kN)	270	160

**Figure 2.4.** Modèle de charge principal Modèle 1 selon l'Eurocode 1991-2

### ● Action sur les trottoirs

La simultanéité des systèmes de chargement avec les charges de trottoirs est prise en compte par des groupes de charges définis dans le tableau 3.4a de l'EN 1991-2 [2]. Deux valeurs caractéristiques de surcharges de trottoir doivent successivement être considérées :

- une valeur de combinaison dont la valeur recommandée  $q_{fk} = 3 \text{ kN/m}^2$  et qui fait partie de la combinaison du groupe 1a qui comprend les charges UDL et TS

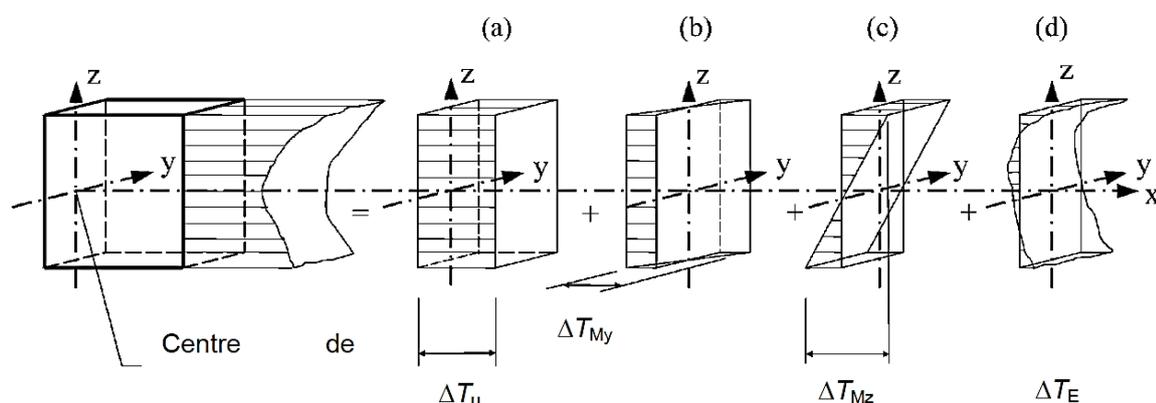
-  $q_{fk} = 5 \text{ kN/m}^2$  cette valeur recommandée qui peut être modifiée par les spécifications du projet qui est la seule composante variable de la combinaison du groupe 3. Si les spécifications du projet prévoient la possibilité d'une foule dense sur toute la surface du tablier (y compris sur les trottoirs, les pistes cyclables et d'éventuel terre-plein celle du groupe gr3 est remplacé par le groupe gr4 avec une valeur caractéristique de charge imposée à  $q_{fk} = 5 \text{ kN/m}^2$  répartie sur toute la surface du tablier

#### 2.2.2.3 Actions de la température

L'action thermique caractéristique, notée  $T_k$ , se décompose en 4 composantes constitutives selon le schéma de la figure :

- une composante uniforme :  $\Delta T_u$
- un gradient thermique linéaire suivant l'axe horizontal transversal du tablier :  $\Delta T_{My}$
- un gradient thermique linéaire suivant la hauteur du tablier :  $\Delta T_{Mz}$
- une composante non linéaire donnant lieu à des contraintes auto-équilibrées :  $\Delta T_E$

Dans cette étude, on considère un gradient thermique linéaire suivant la hauteur du tablier.



**Figure 2.5.** Composantes constitutives d'un profil de température

La composante de température uniforme dépend de la température minimale et maximale qu'un pont peut atteindre. Cela conduit à une étendue de variations uniformes de température qui, dans une structure libre, se manifesterait par une variation de la longueur d'un élément.

Les valeurs caractéristiques des étendues maximales des variations positives et négatives de la composante de température uniforme d'un pont sont déterminées à partir des formules suivantes de l'EN 1991-1-5 [3] :

la valeur caractéristique de l'étendue des variations négatives de la composante de température uniforme d'un pont,  $\Delta T_{N,con}$ , correspond généralement à :

$$\Delta T_{N,con} = T_0 - T_{e,min}$$

et la valeur caractéristique de l'étendue des variations positives de la composante de température uniforme d'un pont,  $\Delta T_{N,exp}$ , correspond généralement à :

$$\Delta T_{N,exp} = T_{e,max} - T_0$$

$T_0$  : température d'origine à la date où la configuration finale de l'élément de structure est réalisée ;

$T_{min}$  : valeur de la température minimale de l'air sous abri, avec une probabilité annuelle d'être dépassée de 0,02 (équivalant à une période moyenne de retour de 50 ans), basée sur les valeurs horaires minimales enregistrées ;

$T_{max}$  : valeur de la température maximale de l'air sous abri, avec une probabilité annuelle d'être dépassée de 0,02 (équivalant à une période moyenne de retour de 50 ans), basée sur les valeurs horaires maximales enregistrées ;

$T_{e,max}$  : composante de température uniforme maximale des ponts ;

$T_{e,min}$  : composante de température uniforme minimale des ponts.

Les composantes de température uniformes du pont  $T_{e,min}$  et  $T_{e,max}$  se déduisent de  $T_{min}$  et  $T_{max}$  par lecture de l'abaque de la figure 6.1 de l'EN 1991-5[1].

Au cours d'un intervalle de temps prescrit, l'échauffement et le refroidissement de la surface supérieure d'un tablier de pont entraîneront une variation de température maximale positive (surface supérieure plus chaude) et maximale négative (surface inférieure plus chaude).

L'EN 1991-1-5 [4] propose deux définitions du gradient thermique vertical dans un pont.

- Un gradient linéaire identique sur toute la hauteur du tablier ;
- un gradient non-linéaire qui peut être défini suivant deux procédures, continue ou discontinue.

Dans le cadre de ce projet nous allons utiliser la première méthode. Les valeurs recommandées de la composante linéaire de gradient thermique pour les poutres caissons en béton sont donnés dans le Tableau 6.1 de l'EN 1991-1-5 [1]:

- Dans le cas où la surface supérieure est plus chaude que la partie inférieure :

$$\Delta T_{M,heat} = 7^{\circ}$$

- Dans le cas où la partie inférieure est plus chaude que la partie supérieure :

$$\Delta T_{M,cool} = -7^{\circ}$$

Les valeurs données dans le tableau 6.1 de l'EN 1991-1-5 [1] sont fondées sur une épaisseur de revêtement égale à 50 mm. Pour d'autres épaisseurs de revêtement, les valeurs de  $\Delta T_{M,heat}$  ou  $\Delta T_{M,cool}$  doivent être multipliés par le coefficient  $k_{sur}$  donné dans le tableau 6.2 de l'EN 1991-1-5 [1] en fonction de l'épaisseur du revêtement.

L'action thermique caractéristique  $T_k$  est définie comme l'enveloppe de huit combinaisons écrites à partir des composantes de température uniformes et de gradients thermiques :

$$\Delta T_{M,heat}(\text{ou } \Delta T_{M,cool}) + 0.35\Delta T_{N,con}(\text{ou } \Delta T_{N,exp})$$

Ou

$$0.75\Delta T_{M,heat}(\text{ou } \Delta T_{M,cool}) + \Delta T_{N,con}(\text{ou } \Delta T_{N,exp})$$

où il convient de choisir l'effet le plus défavorable

## 2.3. Combinaisons d'action

### 2.3.1. Combinaisons ELU

Les combinaisons d'actions verticales à considérer, lorsqu'il y'a risque de défaillance par déformation excessive, rupture, perte de stabilité de la structure ou d'une partie quelconque de celle-ci (STR) ou défaillance ou déformation excessive du sol (GEO) sont :

$$1.35 G_{k,sup} + G_{k,inf} + \gamma_p P + 1.35(TS + UDL + f_k) + \{1.5(0.6 T_k) \text{ ou } 0\}$$

$$1.35 G_{k,sup} + G_{k,inf} + \gamma_p P + 1.5T_k + \{1.35(0.75TS + 0.4UDL + 0.4f_k) \text{ ou } 0\}$$

$G_{k,sup}$  : ensemble des actions permanentes défavorables ;

$G_{k,inf}$  : ensemble des actions permanentes favorables ;

$q_{fk}$  : charge uniforme de trottoir ;

$P$  : valeur probable de la précontrainte ;

$T_k$  : action de la température.

Le coefficient partiel relatif à la précontrainte  $\gamma_P$  vaut :

$\gamma_P = 1$  si la précontrainte a un effet favorable ;

$\gamma_P = 1,2$  si elle a des effets défavorables pour la vérification des effets locaux [EC2-1-1 2.4.2.2].

$\gamma_P = 1,3$  lors de la vérification de l'état limite de stabilité en présence d'une précontrainte extérieure, si la précontrainte peut être défavorable.

Les combinaisons d'actions verticales à considérer pour les états limites ultimes d'équilibre statiques ou de déplacement des structures comme un tout (EQU) sont :

$$1.1 G_{k,sup} + 0.9 G_{k,inf} + \gamma_P P + 1.5(Q_k)$$

$Q_k$  : Valeur caractéristique d'une action variable (charges de construction, par exemple).

### 2.3.2. Combinaisons ELS

Pour les états limites de service, on considère les combinaisons suivantes :

#### Combinaisons caractéristiques :

$$G_{k,sup}(\text{ou } G_{k,inf}) + P_k + (TS + UDL + f_k) + \{(0.6 T_k) \text{ ou } 0\}$$

$$G_{k,sup}(\text{ou } G_{k,inf}) + P_k + T_k + \{(0.75TS + 0.4UDL + 0.4f_k) \text{ ou } 0\}$$

$P_k$  Valeur caractéristique d'une action de précontrainte

#### Combinaison fréquente :

$$G_{k,sup}(\text{ou } G_{k,inf}) + P_k + (0.75TS + 0.4UDL + 0.4f_k) + \{(0.5 T_k) \text{ ou } 0\}$$

$$G_{k,sup}(\text{ou } G_{k,inf}) + P_k + 0.6 T_k$$

#### Combinaison quasi-permanente :

$$G_{k,sup}(\text{ou } G_{k,inf}) + P_k + \{(0.5 T_k) \text{ ou } 0\}$$

## 2.4. Principes de vérification

Les exigences de base de dimensionnement et de réalisation prescrits par les Eurocodes sont :

- Résistance structurale ;
- Aptitude de service ;
- Durabilité.

### 2.4.1. Justifications vis-à-vis des états-limites de service

Les vérifications aux ELS exigées par le l'EC2 sont les suivantes :

- Maîtrise de la fissuration à assurer sous combinaison quasi-permanente ;
- Limite de traction du béton à vérifier sous combinaison quasi-permanente ;
- Limite de déformation.

#### 2.4.1.1. Maîtrise de la fissuration

Le principe adopté par l'Eurocode 2 pour la maîtrise de la fissuration consiste, par le biais d'un calcul d'ouverture de fissures et d'un calcul de contrainte, à vérifier:

- une valeur limite de l'ouverture calculée des fissures en fonction de la classe d'exposition et de la nature de l'élément considéré (béton armé, béton précontraint à armatures non-adhérentes, ou béton précontraint à armatures adhérentes) ;
- et/ou un critère de vérification de non-décompression.

#### ● Limitation des contraintes

Les matériaux étant censés se comporter élastiquement, il suffit de calculer les contraintes qu'engendrent, dans les sections, les sollicitations de calcul et de s'assurer qu'elles respectent bien les contraintes limites définies réglementairement. Les limites que l'on fixe dépendent des conditions environnantes à l'ouvrage.

Le calcul de ces contraintes fait intervenir les sections homogènes ou homogénéisées en section fissurée ou en section non-fissurée.

Les sections homogènes interviennent dans les calculs en section non-fissurée sont obtenues en ajoutant aux sections nettes la section des armatures de béton armé et/ou de précontrainte multipliée par le coefficient d'équivalence  $n$  qui est le rapport de leur module de déformation au module de déformation du béton.

Les sections homogènes réduites interviennent dans les calculs en section fissurée pour lesquels le béton tendu est négligé; ce sont les sections homogènes obtenues avec la seule partie comprimée du béton.

Pour rappel, les sections brutes sont les sections du béton seul, telles qu'elles résultent des dessins de coffrage, sans déduction des évidements, encoches et conduits destinés à recevoir les armatures de précontrainte ou leurs ancrages et qui sont souvent utilisées pour les analyses structurales. Les sections nettes sont obtenus en soustrayant des sections brutes les vides tels que trous, encoches et conduits ménagés pour le passage ou l'ancrage des armatures de précontrainte, et ce, même si ces vides sont ultérieurement remplis.

L'introduction de ces sections homogénéisées permet de prendre en compte les variations de tension qui affectent les armatures de précontrainte lorsque des charges variables sont appliquées à la structure. En pratique, les caractéristiques des sections brutes, nettes et homogénéisées sont souvent très voisines et l'on peut les confondre au stade du pré dimensionnement.

### ● **Limitation des contraintes de compression**

Il est recommandé de limiter la contrainte de compression dans le béton à  $0,45 f_{ck}$  sous combinaison quasi-permanente des charges afin de pouvoir utiliser les modèles de fluage linéaire. Dans le cas contraire, il convient de considérer un fluage non linéaire.

En l'absence de confinement, la contrainte de compression dans le béton doit être limitée à  $0,6 f_{ck}$  sous combinaison caractéristique dans les parties exposées à des environnements de classe XD, XF et XS.

En construction, la contrainte de compression dans le béton dans les éléments précontraints par post-tension, doit être limitée à  $0,45 f_{ck}(t)$  en phase de construction afin de pouvoir utiliser les modèles de fluage linéaire. La contrainte de compression dans le béton doit être limitée à  $0,6 f_{ck}(t)$ .

### ● **Limitation des contraintes de traction**

Il existe d'autres limites de traction qui si elles sont dépassées nécessitent des vérifications complémentaires :

- Si la limite de traction du béton est dépassée sous combinaison caractéristique des charges ( $\sigma_c \leq f_{ctm}$ ) il est nécessaire de faire un calcul en section fissurée (pas de

résistance à la traction du béton, ou encore béton tendu négligé). Sinon, on peut réaliser les calculs en prenant en compte le béton tendu.

- Si on doit négliger le béton tendu (cas précédent) et qu'en plus la zone d'enrobage des câbles se décomprime sous combinaison fréquente des charges, on doit vérifier le comportement en fatigue des câbles.

La zone d'enrobage est définie par une distance de 100mm à l'armature de précontrainte adhérente ou à sa gaine

### ● Vérification de la fissuration

Les limites d'ouverture de fissure pour les éléments en béton précontraint à armatures adhérentes sont les suivantes en fonction des classes d'exposition :

- 1) classes d'exposition XC :

$w_{\max} < 0,2\text{mm}$  sous combinaison fréquente accompagné d'un contrôle de non-décompression  $\sigma_c > 0$  en zone d'enrobage sous combinaison quasi-permanente ;

- 2) classes d'environnement XD ou XS :

$\sigma_c > 0$  en zone d'enrobage sous combinaison fréquente.

### ● Calcul de l'ouverture des fissures

L'ouverture des fissures,  $w_k$ , peut être calculée au moyen de l'expression :

$$w_k = S_{r,\max}(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$$

$S_{r,\max}$  est l'espacement maximal des fissures ;

$\varepsilon_{sm}$  est la déformation moyenne de l'armature de béton armé sous la combinaison de charges considérée, incluant l'effet des déformations imposées et en tenant compte de la participation du béton tendu. Seul est pris en compte l'allongement relatif au-delà de l'état correspondant à l'absence de déformation du béton au même niveau ;

$\varepsilon_{cm}$  est la déformation moyenne du béton entre les fissures.

$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$  peut être calculé au moyen de l'expression :

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - \frac{k_t f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e) \rho_{p,eff}}{E_s} \geq 0.6 \frac{\sigma_s}{E_s}$$

ou :

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cm}}$$

$\sigma_s$  est la contrainte dans les armatures de béton armé tendues, en supposant la section fissurée ;

$A'_p$  est l'aire de la section des armatures de précontrainte (pré-tension ou post-tension) dans  $A_{c,eff}$  ;

$\phi_s$  est le diamètre de la plus grosse armature passive ;

$\phi_p$  est le diamètre équivalent de l'armature de précontrainte, pour les paquets :

$$\phi_p = 1.6 \sqrt{A_p}$$

$A_p$  est l'aire de la section de l'armature ou des armatures de précontrainte ;

$\xi$  est le rapport de la capacité d'adhérence des armatures de précontrainte à la capacité d'adhérence des armatures de béton armé, corrigé du rapport de leurs diamètres :

$$\xi_1 = \sqrt{\xi \frac{\phi_s}{\phi_p}}$$

Si seules les armatures de précontrainte sont utilisées pour maîtriser la fissuration

$$\xi_1 = \sqrt{\xi}$$

$A_{c,eff}$  est l'aire de la section effective de béton autour des armatures tendues, c'est-à-dire l'aire de la section de béton autour des armatures de traction, de largeur  $b$  et de hauteur  $h_{c,ef}$  :

$$h_{c,ef} = \min \left\{ \frac{(h - x)}{3}; 2.5(h - d); x \right\}$$

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_s + \xi_1^2 A'_p}{A_{c,eff}}$$

$k_t = 0.6$  pour un chargement de courte durée ;

$k_t = 0.4$  pour un chargement de longue durée ;

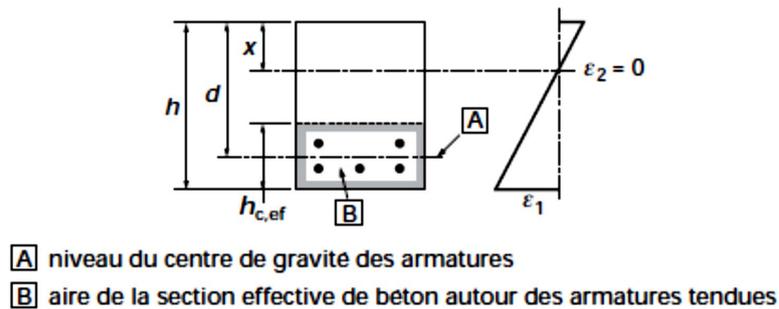
Dans le cas où la distance entre les axes de deux barres voisines (Figure) est au plus égal à

$(c + \phi/2)$ , l'espacement final maximal entre les fissures, en mm, est pris égal à 5.

$$S_{r,max} = k_3 c + k_1 k_2 k_4 \frac{\phi}{\rho_{p,eff}}$$

$c$  est l'enrobage des armatures longitudinales ;

$\phi$  Diamètre de la barre ou diamètre équivalent des barres en mm.



**Figure 2.6.** Aires effectives de béton autour des armatures dans le cas des poutres

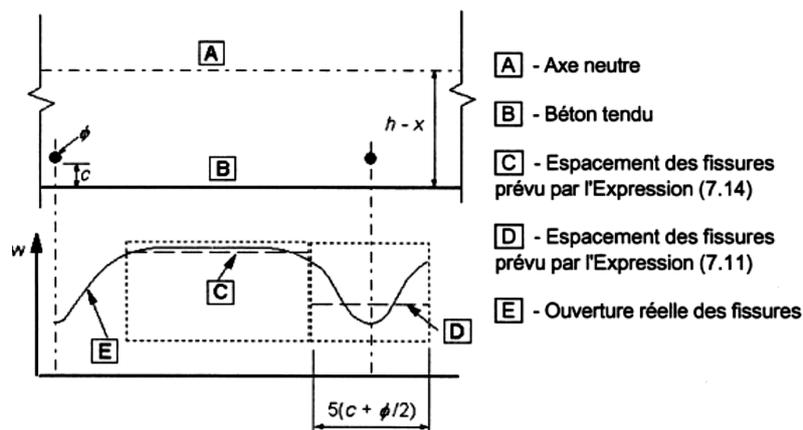
Lorsque deux diamètres de barres sont utilisés dans une même section, on remplace  $\phi$  par  $\phi_{eq}$  telle que :

$$\phi_{eq} = \frac{n_2 \phi_2^2 + n_1 \phi_1^2}{n_2 \phi_2 + n_1 \phi_1}$$

$k_1$  est un coefficient qui tient compte des propriétés d'adhérence des armatures adhérentes = 0,8 pour les barres à haute adhérence ;

$k_2$  est un coefficient qui tient compte de la distribution des déformations = 0,5 en flexion ;

$k_3 = 3,4$  et  $k_4 = 0,425$ .



**Figure 2.7.** Ouverture des fissures  $w$  à la surface du béton en fonction de la distance aux armatures

Lorsque l'espacement des armatures adhérentes excède  $5(c + \phi/2)$  ou lorsqu'il n'y a pas d'armatures adhérentes à l'intérieur du béton tendu, on peut définir une limite supérieure à l'ouverture des fissures en admettant un espacement maximal des fissures :

$$S_{r,max} = 1.3(h - x)$$

### ● Section minimale d'armatures tendues

Indépendamment du calcul d'ouvertures de fissures, il convient de prévoir un ferrailage minimal dans les zones susceptibles d'être tendu sous combinaison caractéristique. Cette quantité d'armatures doit être évaluée sur la base de l'effort de traction obtenue dans la partie tendue du béton avant qu'il ne fissure avec des aciers travaillant à leur limite élastique, ou moins si on souhaite limiter l'ouverture des fissures. L'Art 7.3.2 de l'EN 1992-1-1[5] propose la formule suivante :

$$A_{s,min} \sigma_s = k_c k f_{ct,eff} A_{ct}$$

où :

$A_{s,min}$  est la section minimale d'armatures de béton armé dans la zone tendue ;

$A_{ct}$  est l'aire de la section droite de béton tendu. La zone de béton tendue est la partie de la section dont le calcul montre qu'elle est tendue juste avant la formation de la première fissure

$\sigma_s$  est la valeur absolue de la contrainte maximale admise dans l'armature immédiatement après la formation de la fissure. Elle peut être prise égale à la limite d'élasticité,  $f_{yk}$ , de l'armature. Une valeur inférieure peut toutefois être adoptée afin de satisfaire les limites d'ouverture de fissures en fonction du diamètre maximal ou de l'espacement maximal des barres ;  $f_{ct,eff}$  a été définie au § 1.7.1 de l'EN 1992-1-1[5] ;

$k$  est un coefficient qui tient compte de l'effet des contraintes non-uniformes auto équilibrées conduisant à une réduction des efforts dus aux déformations gênées :

$k = 1,0$  pour les âmes telles que  $h \leq 300$  mm ou les membrures d'une largeur inférieure à 300 mm ;

$k = 0,65$  pour les âmes telles que  $h \geq 800$  mm ou les membrures d'une largeur supérieure à 800 mm ;

$k_c$  est un coefficient qui tient compte de la répartition des contraintes dans la section immédiatement avant la fissuration ainsi que de la modification du bras de levier.

Pour les sections rectangulaires soumises à la flexion simple ou composée :

$$k_c = 0.4 \left[ 1 - \frac{\sigma_c}{k_1 \left( \frac{h}{h^*} \right) f_{ct,eff}} \right] \leq 1$$

$$\sigma_c = \frac{N_{Ed}}{bh}$$

$N_{Ed}$  est l'effort normal agissant à l'état-limite de service dans la partie de la section considérée (positif pour un effort de compression).

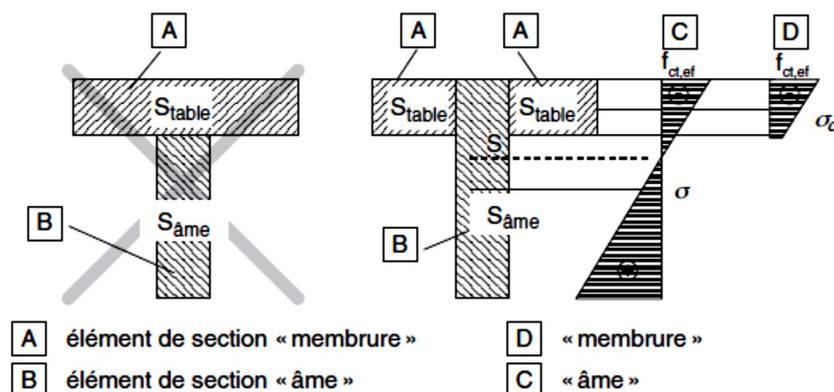
Dans le cas d'une section rectangulaire en flexion simple,  $k_c$  vaut 0,4. Le ferrailage minimal vaut donc :

$$A_{smin} = \begin{cases} 0.2 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} b_w h & \text{si } h \leq 30 \text{ cm} \\ 0.13 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} b_w h & \text{si } h \geq 80 \text{ cm} \end{cases}$$

Pour  $h$  compris entre 30 et 80 cm, on interpole linéairement.

Les valeurs intermédiaires peuvent être obtenues par interpolation ;

Dans le cas des sections en caissons ou en T et poutres-caissons, l'Art 7.3.2 de l'EN 1992-2 [6] exige de découper en éléments rectangulaires qui sont soit des hourdis, soit des âmes selon les indications de la figure 2.8. On détermine ensuite séparément le ferrailage minimal pour chacun des éléments de la section.



**Figure 2.8.** Découpage d'une section à membrures pour l'analyse de la fissuration

Dans un élément de type âme, on calcule le ferrailage minimal selon la formule générale en prenant  $\sigma_c$  égal à la contrainte au centre de gravité de l'âme.

Dans un élément de type hourdis, le ferrailage minimal est obtenu par la relation :

$$A_{smin} f_{yk} = \max[0.9k F_{cr} ; 0.5k f_{ctm} A_{ct}]$$

$F_{cr}$  est la valeur absolue de l'effort de traction dans la membrure juste avant la fissuration, correspondant au moment de fissuration calculé avec  $f_{ct,eff}$ .

$F_{cr} = 0$  si la membrure est entièrement tendue. Ce cas se produit lorsque l'axe neutre se trouve dans la nervure. En d'autres termes si la profondeur de l'axe neutre de la section non fissurée  $x > h_f$  ;

$A_{ct}$  aire de la zone de béton tendue. La zone tendue est la partie de la section dont le calcul montre qu'elle est tendue juste avant la formation de la première fissure.

La section minimale d'armature dans la zone tendue de l'âme de la poutre vaut :

$$A_{smin} = 0.13 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} b_w h$$

## 2.4.2. Justification aux états limites ultimes

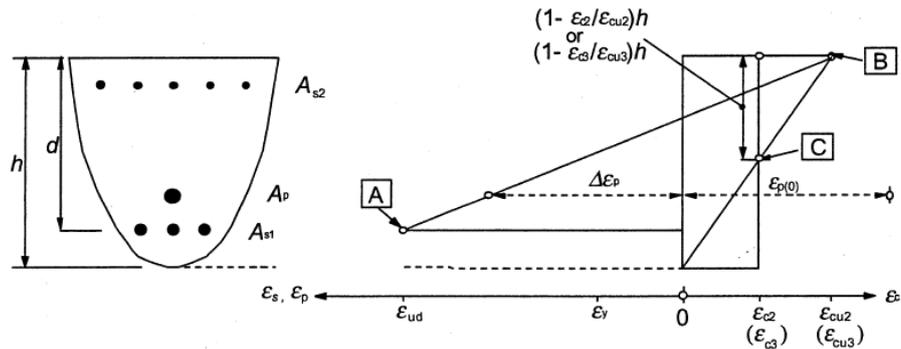
### 2.4.2.1. Flexion simple et composée

#### ● Déformations relatives limites

Il s'agit de s'assurer que les sollicitations obtenues avec les combinaisons de calcul réglementaires (voir § 2.3), que nous désignerons par  $S^*$ , n'entraînent pas l'apparition d'un état-limite ultime dans la section.

Réglementairement, on admet, de façon conventionnelle, qu'un ELU est atteint lorsque le diagramme des déformations est un diagramme limite passant par un des pivots A, B, C (ou encore A', B' ou C') (Figure 2.9). Les pivots A et B correspondent :

- pour les aciers, à des allongements ou à des variations d'allongements ultimes dont les valeurs dépendent de la loi de comportement choisie pour l'acier. Cette limite n'existe pas dans le cas d'un comportement élasto-plastique parfait ;
- la déformation en compression du béton doit être limitée à  $\epsilon_{cu2}$ , ou  $\epsilon_{cu3}$ , selon le diagramme contrainte-déformation utilisé ;
- le pivot C, quant à lui, permet de tenir compte du fait que, lorsqu'une pièce périt tout en étant partout comprimée, les raccourcissements qu'on y mesure sont sensiblement plus faibles que sur la fibre comprimée la plus déformée d'une pièce partiellement tendue à rupture.



- A** - limite de déformation relative en traction des armatures de béton armé
- B** - limite de déformation relative du béton en compression
- C** - limite de déformation relative du béton en compression pure

Figure 2.9. Diagramme des déformations relatives admissibles à l'état-limite ultime [6.1]

● **Sollicitations de calcul**

Les sollicitations de calcul sont généralement la composante normale de la résultante et le moment résultant au centre de gravité de la section G et qui sont définis par :

$$S = \begin{cases} N^* = \gamma_p P_m \\ M^* = M_{ext} + \gamma_p P_m e_0 \end{cases}$$

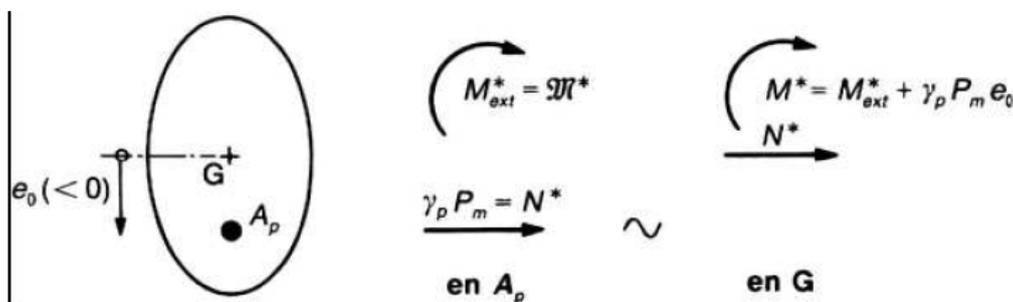


Figure 2.10. Sollicitations de calcul

En règle générale il y a deux sollicitations S\* à prendre en compte :

S\*<sub>max</sub> qui correspond à l'épuisement de la section par moments positifs ;

S\*<sub>min</sub> qui correspond à l'épuisement de la section par moments négatifs.

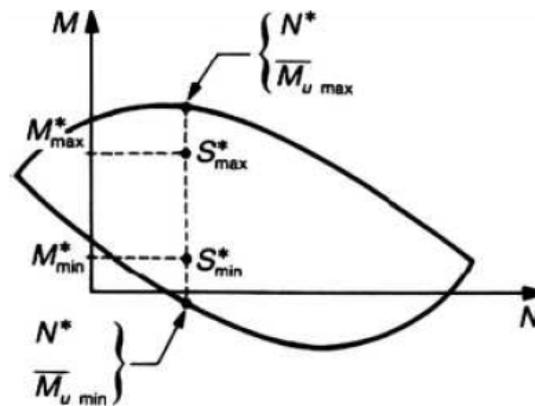
● **Principe de justification**

Si l'on définit les sollicitations par leurs éléments de réduction en G et si l'on se place dans un plan (N, M), l'ensemble des sollicitations S<sub>u</sub> (N<sub>u</sub>, M<sub>u</sub>) dont chacune peut être représentée par un point de ce plan, définit une courbe fermée dite courbe d'interaction effort normal-moment

fléchissant (Figure 2.9). Cette courbe délimite le domaine de résistance à la section, et il suffit de s'assurer que le point représentatif de  $S^*(N^*, M^*)$  est bien à l'intérieur de ce domaine.

En pratique, il n'est pas utile de construire la courbe d'interaction point par point. Compte tenu de la convexité du domaine, il suffit de déterminer les deux points d'intersection de cette courbe avec la verticale ou l'horizontale passant par  $S^*$  et de vérifier que  $S^*$  est bien entre ces deux points. Ainsi, sur la Figure 2.11 on calcule  $M_{\max}$  et  $M_{\min}$  en considérant  $N = N^*$  et vérifier que :

$$\begin{cases} M_{\max}^* \leq \bar{M}_{u\max} \\ M_{\min}^* \leq \bar{M}_{u\min} \end{cases}$$



**Figure 2.11.** Courbe d'interaction effort normal et moment fléchissant

Pour obtenir une telle sollicitation de flexion composée qui entraîne l'apparition d'un état-limite ultime dans la section, il suffit de partir d'un diagramme de déformation limite de la section (diagramme passant par l'un des pivots A, B, C), de remonter aux contraintes par l'intermédiaire des diagrammes contraintes-déformations de calcul et de déterminer la sollicitation qu'équilibrent ces contraintes. Si on utilise, pour le béton, le diagramme rectangulaire simplifié (Figure 2.11), les équations définissant un état-limite appartenant à l'un des domaines (1) ou (2) s'écrivent :

$$\bar{N}_u = A_c(0.8x)f_{cd} - \sum_j A_{pj}(\sigma_{pj} - \sigma_{pmj}) - \sum_{j'} A_{sj'}\sigma_{sj'}$$

$$\bar{M}_u = e_{Ac}(0.8x)A_c(0.8x)f_{cd} - \sum_j A_{pj}(\sigma_{pj} - \sigma_{pmj})e_{pj} - \sum_{j'} A_{sj'}\sigma_{sj'}e_{sj'}$$

$A_c$  ( $0,8x$ ) aire de la surface de béton comprimé ;

$A_p$  aire de la section de l'armature ou des armatures de précontrainte ;

$A_s$  aire de la section des armatures de béton armé.

$e_{Ac}(x)$  excentricité du centre de gravité du béton comprimé par rapport à  $G$  ;

$e_{pj}$  et  $e_{sj}$  sont respectivement l'excentricité des armatures de précontrainte et des armatures passives par rapport à  $G$ .

Si l'on pose  $\bar{N}_u = N^*$ , on obtient un système comportant deux équations et deux inconnues ( $x$  et  $\bar{M}_u$ ).

Dans le cas le plus général, on résout ce système par approximations successives et on doit

justifier : 
$$\begin{cases} M_{max}^* \leq \bar{M}_{u,max} \\ M_{min}^* \leq \bar{M}_{u,min} \end{cases}$$

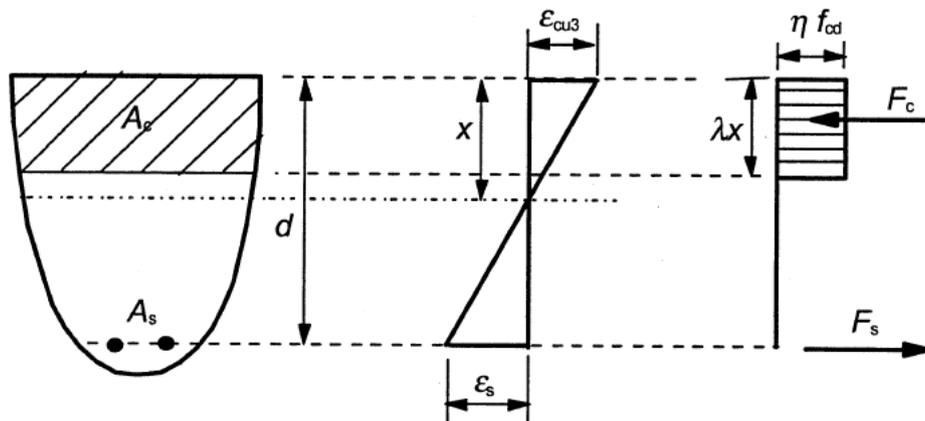


Figure 2.12. Distribution rectangulaire simplifiée

#### 2.4.2.2. Effort tranchant

Alors que la résistance à la flexion conditionne les membrures d'une poutre, c'est la résistance à l'effort tranchant qui permet de dimensionner les âmes et de préciser le tracé à donner aux câbles dans les zones où la flexion n'est pas prépondérante.

L'Eurocode 2 définit dans les procédures générales de vérification quatre valeurs de calcul. Ces vérifications sont faites exclusivement aux états limites ultimes :

$V_{Rd,c}$  est l'effort tranchant résistant de calcul pouvant être repris par l'élément en l'absence d'armatures d'effort tranchant ;

$V_{Rd,max}$  est l'effort tranchant de calcul maximal pouvant être repris par l'élément avant écrasement des bielles

$V_{Rd,s}$  est l'effort tranchant de calcul pouvant être repris par les armatures d'effort tranchant

travaillant à la limite d'élasticité de calcul  $f_{ywd}$  ;

Si  $V_{Ed} \leq V_{Rd,c}$  les armatures transversales ne sont théoriquement pas nécessaires mais il convient de prévoir des armatures minimales.

$V_{Rd}$  est l'effort tranchant de calcul pouvant être supporté par un élément avec armatures d'effort tranchant (contribution des armatures d'âme).

$$V_{Rd,c} = \left[ C_{Rd,c} k (100\rho_1 f_{ck})^3 + k_1 \sigma_{cp} \right] b_w d \text{ en Newtons}$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2$$

avec  $d$  en mm est un facteur de correction qui tient compte de l'effet de la hauteur utile de l'élément ;

$$\rho_1 = \frac{A_{sl}}{b_w d} ;$$

$A_{sl}$  est l'aire de la section des armatures tendues, prolongées sur une longueur  $\geq (l_{bd} + d)$  au-delà de la section considérée ;

$l_{bd}$  est la longueur d'ancrage de calcul ;

$b_w$  est la plus petite largeur de la section droite dans la zone tendue ; en mm ;

$$\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c < 0.2f_{cd} \text{ en MPa ;}$$

$N_{Ed}$  est l'effort normal agissant dans la section droite, dû aux charges extérieures appliquées et/ou à la précontrainte, en newtons ( $N_{Ed} > 0$  pour la compression). L'influence des déformations imposées sur  $N_{Ed}$  peut être négligée ;

$A_c$  est l'aire de la section droite du béton, en  $\text{mm}^2$ .

Les valeurs de  $C_{Rd,c}$ ,  $v_{min}$  et  $k_1$  recommandées sont :

$$C_{Rd,c} = \frac{0.18}{\gamma_c}$$

Si  $V_{Ed} \leq V_{Rd,c}$  les armatures transversales ne sont théoriquement pas nécessaires mais il convient de prévoir des armatures minimales. Cette vérification vise principalement les

éléments minces tels que les dalles qui n'ont pas de ferrailage transversal. Pour les poutres principales de pont, les armatures sont toujours nécessaires et il est inutile de calculer  $V_{Rd,c}$ .

Si  $V_{Ed} > V_{Rd,c}$  les armatures d'effort tranchant sont calculées de manière à vérifier la relation :

$$V_{Ed} \leq \min[V_{Rd,max}, V_{Rd,s}]$$

Et vérifier la section minimale des armatures. Si  $V_{Ed} > V_{Rd,c}$  les armatures d'effort tranchant sont calculées de manière à vérifier la relation :

$$V_{Ed} \leq \min[V_{Rd,max}, V_{Rd,s}]$$

$V_{Rd,max}$  est la valeur de calcul de l'effort tranchant maximal pouvant être repris par l'élément, avant écrasement des bielles de compression.

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} b_w z v_1 f_{cd} \frac{\cot\theta + \cot\alpha}{1 + \cot^2\theta}$$

$\alpha$  est l'angle d'inclinaison des armatures d'âme ;

$\alpha_{cw}$  est un coefficient tenant compte de l'état de contrainte dans la membrure comprimée ;

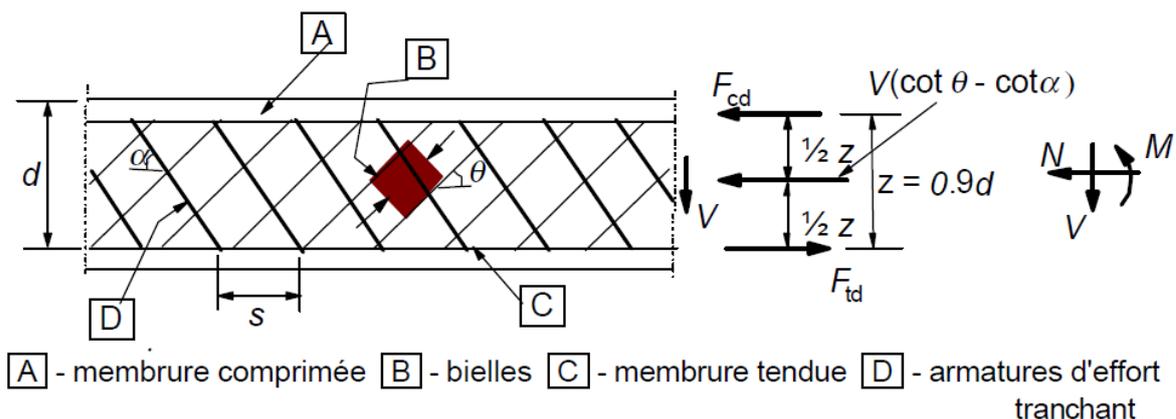
$\alpha_{cw} = 1$  est un coefficient tenant compte de l'état de contrainte dans la membrure comprimée

$$v_1 = v = \quad \text{si } f_{ywd} > f_{yw}$$

$b_w$  est l'épaisseur de la bielle ;

$z(\cos\theta + \cot\alpha \cdot \sin\theta)$  est la largeur d'appui de la bielle ;

$z(\cot\theta + \cot\alpha)$  est la longueur d'appui de la bielle sur l'horizontale :



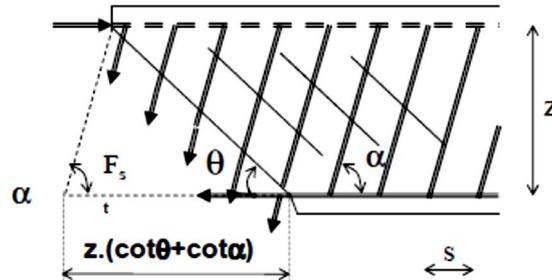
**Figure 2.13.** Modèle de treillis

L'angle d'inclinaison  $\theta$  des bielles de l'âme en flexion simple ou composée avec compression est choisi en fonction du cisaillement entre  $21.8^\circ$  et  $45^\circ$ . Cela correspond à :

$$1 \leq \cot\theta \leq 2.5$$

L'effort tranchant repris par les cours d'armatures sur la longueur  $z$  ( $\cot\theta + \cot\alpha$ ) vaut :

$$V_{Rd,s} = A_{sw}f_{ywd} \sin\alpha \frac{z(\cot\theta + \cot\alpha)}{s}$$



**Figure 2.14.** Résistance des armatures transversales à l'effort tranchant

### 2.4.2.3. Effort tranchant et torsion

La résistance d'un élément soumis aux sollicitations d'effort tranchant et de torsion est limitée par la résistance des bielles de béton. Afin de ne pas dépasser cette résistance, il convient de satisfaire la condition suivante (Art 6.3.2 (4) de l'EN 1992-1-1[5]) :

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd,max}} + \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} \leq 1$$

où :

$T_{Ed}$  est le moment de torsion agissant de calcul ;

$V_{Ed}$  est l'effort tranchant agissant de calcul ;

$T_{Rd,max}$  est le moment de torsion résistant de calcul donné par :

$$T_{Rd,max} = 2v\alpha_{cw}f_{cd}A_k t_{ef,i} \sin\theta \cos\theta$$

où :

$v$  est le facteur de réduction de la résistance du béton fissuré à l'effort tranchant calculé à l'aide de la formule (6.6N) de l'EN 1992-1-1 :

$$v = 0.6 \left[ 1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] \quad (f_{ck} \text{ en MPa})$$

$\alpha_{cw}$  est un coefficient tenant compte de l'état de contrainte dans la membrure comprimée.

La valeur recommandée est déterminée comme suit (Art 6.2.3 (3) de l'EN 1992-1-1) :

1 pour les structures non précontraintes ;

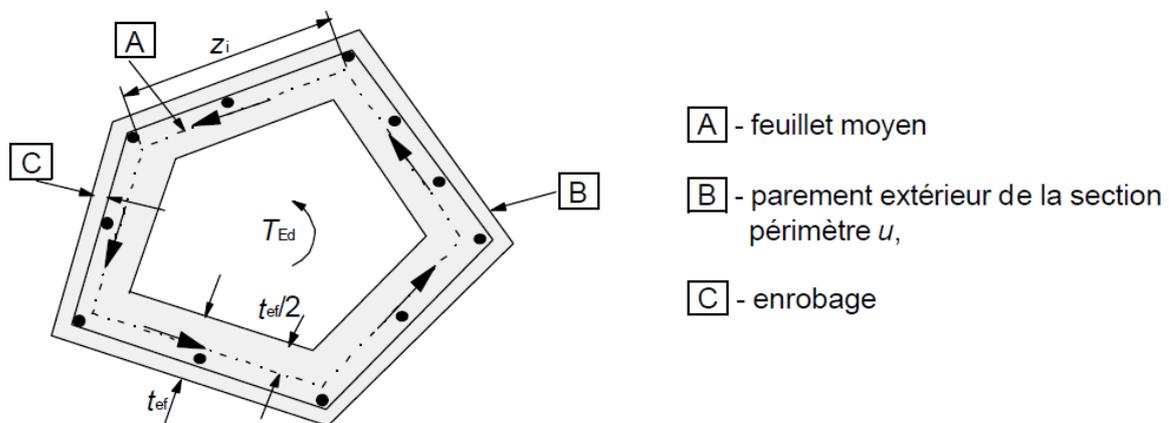
$$\begin{aligned}
 & (1 + \sigma_{cp}/f_{cd}) \quad \text{pour } 0 < \sigma_{cp} \leq 0.25 f_{cd} \\
 & 1.25 \quad \text{pour } 0.25 f_{cd} < \sigma_{cp} \leq 0.5 f_{cd} \\
 & 2.5 (1 + \sigma_{cp}/f_{cd}) \quad \text{pour } 0.5 f_{cd} < \sigma_{cp} \leq 1.0 f_{cd}
 \end{aligned}$$

où :

$\sigma_{cp}$  est la contrainte de compression moyenne dans le béton due à l'effort normal de calcul, mesurée positivement. Il convient de la déterminer en faisant la moyenne sur toute la section de béton, en tenant compte des armatures. Il n'y a pas lieu de calculer  $\sigma_{cp}$  à une distance inférieure à  $0.5d \cot\theta$  d'un appui ;

$A_k$  est l'aire intérieure au feuillet moyen des parois, partie creuse comprise ;

$t_{ef,i}$  est l'épaisseur de la paroi fictive. Elle peut être prise égale à  $A/u$ , mais il convient qu'elle ne soit pas inférieure à deux fois la distance entre le parement extérieur et l'axe des armatures longitudinales. Dans le cas de sections creuses, elle est limitée par l'épaisseur réelle de la paroi (Figure 2.15)



**Figure 2.15.** Notations utilisées pour le calcul de la résistance à la torsion.

## 2.5. Calcul des pertes de précontrainte

La force de précontrainte dans un câble varie à la fois dans l'espace (le long de l'abscisse du câble) et dans le temps. La tension en un point du câble dans la structure diffère de la force du vérin avec lequel le câble a été tendu, du fait d'un certain nombre de pertes qui font baisser significativement la tension du câble. C'est d'ailleurs à cause de ces pertes qu'on est obligé d'utiliser des câbles à très haute limite d'élasticité.

On regroupe habituellement les pertes en deux familles :

- Pertes instantanées : il s'agit des pertes qui se produisent dans un temps relativement court au moment de la mise en tension et de la mise en précontrainte, et qui résultent de la technologie ou des propriétés des matériaux :
- Pertes dues au frottement ;
- Pertes aux ancrages ;
- Pertes par non simultanéité des mises en tensions des différents câbles ;
- Pertes par application de charges permanentes postérieurement à la tension ;
- Pertes différées : qui se produisent pendant un temps plus ou moins long après que la structure ait été précontrainte et qui proviennent de l'évolution dans le temps des caractères des matériaux lorsqu'ils sont soumis à des actions permanentes ;
- Pertes dues au retrait du béton ;
- Pertes dues au fluage du béton ;
- Pertes dues à la relaxation des câbles.

### 2.5.1. Pertes dues au frottement

Considérons le même tronçon de câble AB mis en tension en A avec une force P. Le câble tend à s'allonger mais cet allongement est freiné par le frottement sur la gaine.

Les pertes  $\Delta P_{\mu}(x)$  dans les armatures précontraintes par post-tension, du fait du frottement, peuvent être estimées au moyen de l'expression (Art 5.10.5.2 de l'EN 1992-1-1)

$$\Delta P_{\mu}(x) = P_{\max}(1 - e^{-\mu(\alpha+kx)})$$

Où :

$\alpha$  est la somme des déviations angulaires sur la distance x (quels que soient leur direction et leur signe) ;

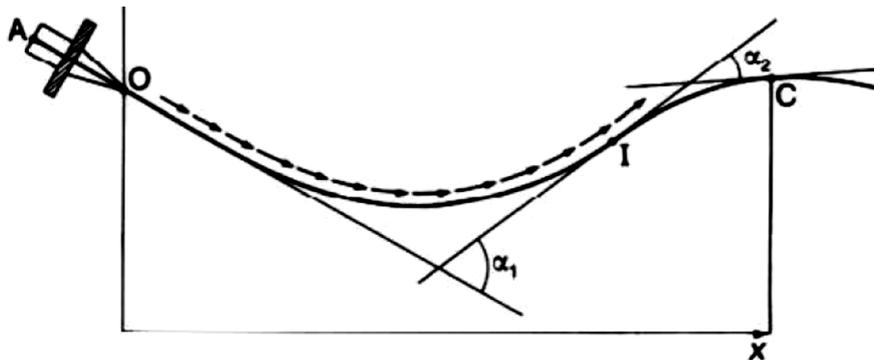
$\mu$  est le coefficient de frottement entre l'armature de précontrainte et sa gaine (supposé uniforme et constant quel que soit P) ;

x est la distance le long de l'armature depuis le point où la force de précontrainte est égale à  $P_{\max}$  (force à l'extrémité active pendant la mise en tension).

La valeur de  $\mu$  dépend des caractéristiques de surface des armatures et de la gaine, de la présence ou non de rouille, de l'allongement de l'armature et de son tracé. Pour les câbles constitués de fils ou de torons, on peut, lorsque les armatures sont huilées et que les conduits

(gaines ou tubes métalliques) sont en bon état, utiliser les valeurs moyennes du coefficient  $\mu$  données dans le tableau 5.1 de l'EN1992-1-1 [4].

Un conduit ne suit jamais parfaitement son tracé théorique. À la déviation angulaire théorique  $\alpha$  entre O et C (Figure 2.16) vient donc se superposer une déviation parasite sensiblement proportionnelle à la distance entre O et C, de la forme  $kx$ .



**Figure 2.16.** Frottements le long du câble lors de la mise en tension.

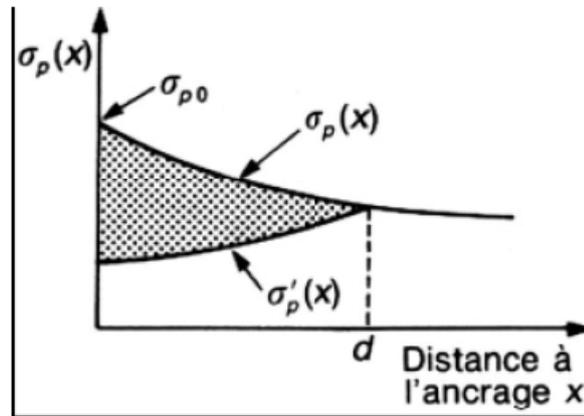
À défaut de données fournies par un Agrément Technique Européen, les valeurs des déviations angulaires parasites pour les armatures intérieures seront généralement telles que  $0,005 < k < 0,01$  par mètre.

Pour les tracés de câbles complexes il conviendra de retenir la valeur haute de la fourchette. Pour les câbles traversant de nombreux joints (comme par exemple les câbles intérieurs des ponts construits par encorbellements successifs) il y a lieu de majorer encore les valeurs de  $k$  pour tenir compte des variations angulaires parasites concentrées à chaque surface de reprise.

### 2.5.2. Pertes à la mise en charge de l'ancrage (rentrée d'ancrage)

Lors du report de l'effort du vérin à l'ancrage, le câble subit toujours un léger raccourcissement  $\sigma$  : faible dans le cas des ancrages par calage ou vissage ;  $g$ , de l'ordre de 2 mm, est alors la conséquence de la déformation du corps d'ancrage et du tassement des cales ou des filets ; plus important dans le cas des ancrages par coincement : les torons et les clavettes subissent un déplacement vers l'intérieur de la pièce qui peut atteindre 6 mm.

Son influence diminue donc à partir de l'ancrage jusqu'à s'annuler à une distance  $d$  de celui-ci à partir duquel la tension demeure inchangée.



**Figure 2.17.** Tension le long du câble, avant et après relâchement de la pression

Avant rentrée d'ancrage, la tension à l'abscisse  $x$  peut s'écrire sous la forme :

$$\sigma_p(x) = \sigma_{p0}(x)(1 - e^{-\mu(\alpha+kx)}) = \sigma_{p0}(1 - e^{-K(x)})$$

Avec  $K(x)$  fonction croissante de  $x$  on a :

$$K(x) = -\mu(\alpha + kx)$$

Après rentrée d'ancrage, la tension à l'abscisse  $x (< d)$  n'est plus que :

$$\sigma'_p(x) = \sigma_{p0}(1 - e^{-2K(d)+K(x)})$$

On peut écrire que  $g$  est la somme des pertes d'allongement des tronçons  $dx$  entre  $O$  et  $D$ , soit:

$$g = \int_0^d [\sigma_p(x) - \sigma'_p(x)] dx$$

L'intégrale figurant dans cette expression représente l'aire tramée sur la Figure 2.17.

Connaissant la valeur de  $g$  on peut déterminer la valeur de  $d$ .

La perte par rentré d'ancrage se calcule alors par la formule :

$$\Delta\sigma_g(x) = \sigma_p(x) - \sigma'_p(x)$$

### 2.5.3. Pertes par déformation instantanée du béton

Lorsque une poutre présente plusieurs câbles à la mise en tension, les câbles sont tendus l'un après l'autre. Toute action permanente  $j$  appliquée à une date  $t_j$  postérieurement à chaque mise en tension et à l'ancrage d'un câble de précontrainte provoque dans le béton adjacent une variation de contrainte  $\Delta\sigma_c(t)$  donc une variation de raccourcissement :

$$\Delta\varepsilon_{cj}(t) = \frac{\Delta\sigma_{cj}(t_j)}{E_{cm}(t_j)}$$

Le câble considéré subit la même variation de déformation, d'où une perte de tension :

$$E_p \frac{\Delta\sigma_{cj}(t_j)}{E_{cm}(t_j)}$$

Les actions permanentes  $j$  précédemment évoquées peuvent résulter de :

- La mise en tension d'un nouveau câble.
- L'application d'un supplément de poids propre dans le cas d'une construction par phases.
- La mise en place de superstructures.

En principe, le calcul de ces pertes s'effectue câble par câble, ce qui serait très laborieux. On se contente, en pratique, d'évaluer ces pertes par famille de câbles homogènes. Sont considérés comme appartenant à une même famille tous les câbles de tracé comparable tendus au cours d'une même phase de construction et non de façon simultanée.

On peut admettre une valeur moyenne  $\Delta P_{el}$  (Art 5.10.5.1 de l'EN 1992-1-1[5]) :

$$\Delta P_{el} = A_p \cdot E_p \cdot \sum \left[ \frac{j \cdot \Delta\sigma_c(t)}{E_{cm}(t)} \right]$$

où :

$\Delta\sigma_c(t)$  est la variation de contrainte au centre de gravité des armatures à l'instant  $t$  est un coefficient égal à :

$(n-1)/2n$  avec  $n$ , nombre d'armatures identiques mises successivement en tension. De manière approchée, on peut prendre  $j = 1$

$E_p$  valeur de calcul du module d'élasticité de l'acier de précontrainte.

## 2.6. Détermination des enrobages

L'enrobage est la distance entre la surface de l'armature (armatures longitudinales, épingles, étriers et cadres compris, ainsi que armatures de peau, le cas échéant) la plus proche de la surface du béton et cette dernière. L'enrobage nominal spécifié sur les plans est défini par l'Art 4.4.1.1 de l'EN 1992-1-1[5] comme étant la somme de l'enrobage minimal  $c_{min}$  plus

une marge de calcul pour tolérances d'exécution  $\Delta_{cdev}$ . La valeur recommandée de  $\Delta_{Cdev}$  est de 10mm.

### 2.6.1. Enrobage minimal $c_{min}$

Un enrobage minimal  $C_{min}$  doit être assuré afin de garantir :

- la bonne transmission des forces d'adhérence ;
- la protection de l'acier contre la corrosion.

L'enrobage minimum est défini comme étant la plus grande valeur satisfaisant les conditions de durabilité et d'adhérence (Art 4.4.1.2(2)) :

$$c_{min} = \max\{c_{min,b}; c_{min,dur}; 10 \text{ mm} \}$$

avec :

$c_{min,b}$  enrobage minimal vis-à-vis des exigences d'adhérence ;

$c_{min,dur}$  enrobage minimal vis-à-vis des conditions d'environnement.

Pour les ponts, la valeur de 10 mm n'intervient pas.

#### 2.6.1.1. Enrobage minimal vis-à-vis de l'adhérence

L'enrobage minimal  $c_{min,b}$  requis vis-à-vis de l'adhérence est donné dans le tableau 4.2 de l'EN 1992-1-1 [6]. La valeur recommandée de  $c_{min,b}$  pour les gaines de précontrainte par post-tension de section circulaire est leur diamètre. Si on adopte des câbles 12T15S,  $\phi_g = 0.09 \text{ m}$ . Si les gaines sont posées en deux lits et regroupées en paquet :

$$c_{min,b} = \phi_n = \phi_g = 0.09 = 0.09m$$

$\phi_n$  étant le diamètre équivalent du paquet et  $n_b$  le nombre des gaines du paquet.

Pour les armatures passives transversales, qui sont les plus proches de la surface du béton, la valeur recommandée de  $c_{min,b}$  est égal à leur diamètre.

#### 2.6.1.2. Enrobage minimal vis-à-vis de la durabilité

$c_{min,dur}$  est l'enrobage minimum nécessaire pour garantir la protection des armatures en acier contre la corrosion (Art 4.4.1.2 de l'EN 1992-1-1 [6]). On définit  $c_{min,dur}$  par rapport aux armatures transversales passives qui sont les plus proches de la surface du béton. Il est défini pour les armatures passives par le tableau 4.4N de l'EN 1992-1-1 en fonction de la classe d'exposition et de la classe structurale.

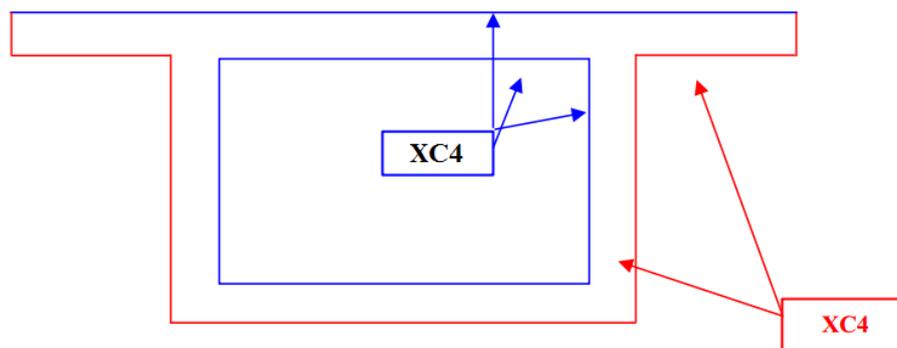
Les conditions d'exposition sont les conditions physiques et chimiques auxquelles la structure est exposée, en plus des actions mécaniques. Les conditions d'environnement sont classées conformément au Tableau 4.1 de l'EN 1992-1-1.

La classe d'environnement adoptée pour les parois intérieures et extérieures est la classe XF1 comme il est illustré sur la Figure 2.18, d'où

$$30 \leq c_{\min, \text{dur}} \leq 55$$

La classe structurale de référence recommandée S4 sert de point de départ ; elle correspond à une durée d'utilisation de projet de 50 ans. Le Tableau 4.3N, modifié par l'annexe nationale en 4.3NF, donne les modifications de la classe structurale retenue pour le projet qui peut différer de la classe de référence en tenant compte des paramètres suivants :

- la classe d'exposition dans laquelle se trouve l'ouvrage (ou la partie d'ouvrage) ;
- la durée d'utilisation de projet conformément aux indications de l'Eurocode 0 ;
- la classe de résistance du béton ;
- la nature du liant ;
- la compacité de l'enrobage.



**Figure 2.18.** Classes d'exposition du caisson

La détermination des classes structurales de différentes parois est résumée dans le tableau

**Tableau 2.3.** Détermination de la classe d'exposition

<b>Classe structurale</b>	
<b>Critère</b>	<b>Classe d'exposition selon Tableau 4.1</b>
	Parois extérieures : XC4
<b>Durée d'utilisation de projet 100 ans</b>	Majoration de 2
<b>Classe de résistance C40/45</b>	$\geq C45/55$ $< C70/85$ minoration de 1 classe
<b>Elément assimilable a une dalle</b>	minoration de 1 classe
<b>Enrobage compact</b>	minoration de 1 classe
<b>Classe S</b>	<b>S3</b> <b>(4+2-1-1-1)</b>

On en déduit du tableau 4N de l'EN 1992-1-1 les enrobages minimums vis-à-vis de la durabilité pour les différentes parois :

$$c_{\min, \text{dur}} = 25 \text{ mm} ;$$

### 2.6.2. Enrobage nominal

Chaque paroi du caisson comporte des armatures passives supérieures et inférieures. Les armatures de précontrainte interne sont disposées dans le hourdis supérieur (câbles de fléau) et dans les goussets du hourdis inférieur (câbles de continuité intérieurs). L'enrobage nominal des câbles de précontrainte et des armatures passives, est défini ci-après.

Hourdis supérieur :

- câbles de fléau :  $c_{\min, b} = 90 \text{ mm} > c_{\min, \text{dur}} = 25 \text{ mm}$  :

$$c_{\text{nom}} = 90 \text{ mm}$$

- armatures passives supérieures de diamètre  $\phi_{ys}$  : l'enrobage des armatures transversales va dépendre du diamètre des armatures transversales qui sont les plus proches de la surface du béton et les armatures longitudinales disposées juste au-dessous des armatures transversales :

$$c_{\text{nom}} = 90 - \phi_{ys} - \phi_{xs} = 40 > 25 \text{ mm}$$

$\phi_{xs}$  est le diamètre des armatures passives longitudinales supérieures.

- armatures passives inférieures de diamètre  $\phi_{yi}$  :

- Hourdis inférieur :

- armatures passives transversales supérieures :

$$c_{nom} = 25 \text{ mm}$$

- armatures passives transversales inférieures :

$$c_{nom} = 25 \text{ mm}$$

- Goussets :

- armatures passives, côté paroi extérieure :

$$c_{nom} = 90 - \phi_{yG} - \phi_{xG} \geq 40 \text{ mm}$$

- armatures passives, côté paroi intérieure :

$$c_{nom} = 90 - \phi_{yG} - \phi_{xG} \geq 40 \text{ mm}$$

- câbles de continuité intérieurs :

$$c_{nom} = 90 \text{ mm}$$

$\phi_{yG}$  sont les aciers du gousset les plus proches de la paroi du béton ;

$\phi_{xG}$  sont les aciers du gousset les plus éloignés de la paroi du béton.

- Ames

- Parois extérieures :

$$c_{nom} = 40 \text{ mm}$$

- Parois intérieures :

$$c_{nom} = 40 \text{ mm}$$

**CHAPITRE 3**  
**ETUDE PRELIMINAIRE**

### 3.1. Introduction

Le contenu de ce chapitre consiste en premier lieu au dimensionnement préliminaire des différents éléments constitutifs de la section transversale des caissons admise constante sur toute la longueur de l'ouvrage étudié. Ensuite, à partir d'hypothèses simplifiées tenant compte de l'évolution des schémas statiques et des charges durant les différentes phases d'exécution des fléaux et de clavage, la section et le tracé des câbles fléau et de continuité éclisses seront estimés. Nous rappelons que dans ce projet les câbles de continuité extérieurs ne sont pas utilisés. Les résultats obtenus sont nécessaires à la préparation du modèle numérique qui sera exposé au chapitre 4 pour justifier les dimensions obtenus lors de l'étude préliminaire.

### 3.2. Pré dimensionnement de la section transversale du caisson

#### 3.2.1. Notations

La figure 3.1 précise les notations des éléments constitutifs de la section transversale utilisées

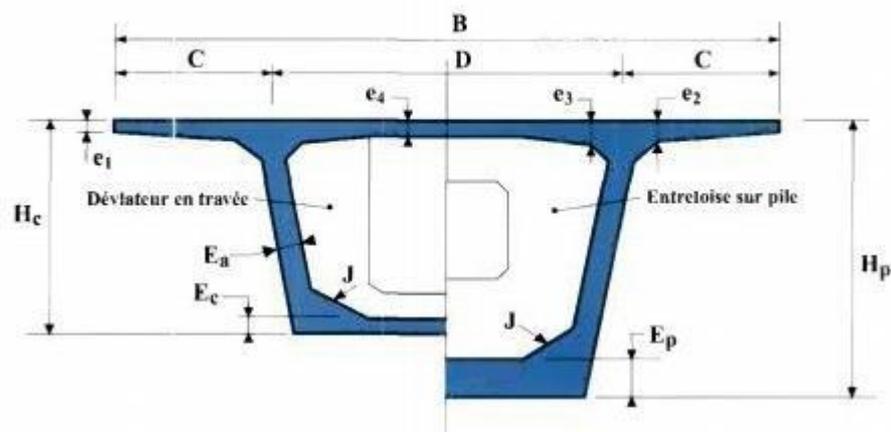


Figure 3.1. Notations utilisées

#### 3.2.2. Hauteur du caisson

Pour définir la hauteur des sections, on peut partir de ratios calculés sur la base des projets existants.

Dans ce qui suit, nous notons respectivement  $H_p$  la hauteur du tablier sur pile,  $H_c$  sa hauteur sur culée ou à la clé des travées et  $L$  la portée déterminante du tablier. Pour des tabliers de hauteur constante  $L/H_p = L/H_c = 20$  à  $22$  dans les cas courants.

En tout état de cause, la hauteur minimale des caissons doit être de l'ordre de  $2,30$  m afin de permettre la visite et l'entretien de l'ouvrage dans des conditions de confort et de sécurité acceptable.

Pour  $L = 50.4$  m, on adopte  $H_p = H_c = 2.3$  m

### 3.2.3. Hourdis supérieur

Le hourdis supérieur est essentiellement dimensionné par sa résistance à la flexion transversale et aux charges concentrées. En appelant toujours  $b$  sa portée entre axes des âmes, son épaisseur courante  $e_s$  est telle que  $b/e_s = 25$  à  $30$  lorsqu'il n'est pas nervuré.

L'épaisseur est souvent imposée par les dispositions constructives relatives aux dispositifs de retenue qui y sont fixés. En particulier le ferrailage d'ancrage d'une barrière métallique de type BN4 nécessite une épaisseur minimale de dalle de l'ordre de  $25$  cm.

Pour ce projet on a choisi des dispositifs de retenue type BN4.

pour  $B = 9$  m, on adopte :

$$D = 0.5 B = 4.50 \text{ m et } C = 0.25 B = 2.25 \text{ m}$$

Le choix de  $C$  peut dépendre des superstructures prévues pour l'ouvrage, et notamment des dispositifs d'évacuation des eaux. Son épaisseur en extrémité  $e_1$  dépend du dispositif de retenue choisi :

En cas de barrière normale BN4,  $e_1 \geq 24$  cm, on adopte  $e_1 = 27$  cm ;

$$e_2 = \left( \frac{1}{7} \div \frac{1}{8} \right) C, \text{ on adopte } e_2 = 33 \text{ cm}$$

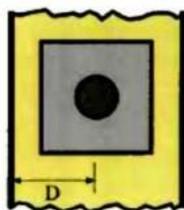
$$e_3 = 0.1 + \frac{D}{25}, \text{ on adopte } e_3 = 45 \text{ cm}$$

Les goussets du hourdis supérieur doivent être dimensionnés de telle sorte qu'ils permettent au premier lieu le logement des câbles de fléaux, ainsi la facilité de la mise en place du béton et l'amélioration de l'encastrement du hourdis sur les âmes [10].

### 3.2.4. Épaisseur des âmes

L'épaisseur des âmes est conditionnée à la fois par le type de câblage adopté et par les conditions de résistance à l'effort tranchant.

Pour notre projet le câblage est entièrement intérieur au béton, les câbles sont ancrés dans les âmes. Indépendamment des problèmes de résistance à l'effort tranchant, leur épaisseur minimale est conditionnée par les possibilités de mise en place des organes d'ancrage.



**Figure 3.2.** Epaisseur des âmes

Pour  $L = 50.4$  m, on adopte  $E_a = 52$  Cm

### 3.2.5. Epaisseur du hourdis inférieur

L'épaisseur du hourdis inférieur est déterminée Par les conditions de résistance en flexion transversale, Dans les ponts à câblage traditionnel, nous avons dit que les câbles de continuité étaient normalement placés dans des goussets à la partie inférieure des âmes. Mais, pour limiter le volume de ces goussets, quelques câbles peuvent être disposés dans le plan du feuillet moyen du hourdis. C'est pourquoi, ce dernier doit posséder une épaisseur  $e_i$  supérieure à la plus contraignante des conditions suivantes :

$$e_i = \text{Max} \left\{ 18\text{cm}; 3\varnothing, \frac{a}{3} \right\}$$

$\varnothing$  étant le diamètre d'encombrement des conduits et  $e_a$  l'épaisseur des âmes. La dernière condition vise à donner au hourdis inférieur une rigidité qui ne soit pas trop faible Par rapport à celle des âmes afin que la section transversale du caisson puisse être valablement considérée comme étant indéformable

On adopte  $e_i = 30$  Cm

### 3.2.6. Dimensionnement des goussets supérieurs :

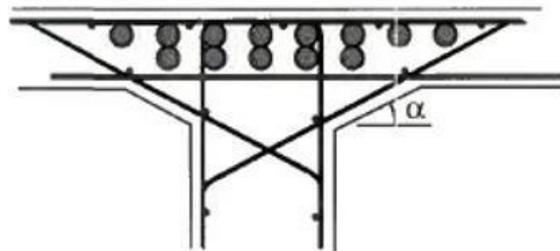
Les goussets supérieurs doivent remplir plusieurs fonctions qui, en général, conditionnent leurs dimensions :

- Ils épaississent le hourdis dans des zones où les efforts transversaux sont importants
- Leur forme d'entonnoir facilite le bétonnage des âmes
- Ils abritent les câbles de fléaux et assurent leur enrobage
- Ils permettent les déviations des câbles de fléaux qui précèdent leur ancrage
- Ils engraisent les nœuds âmes/hourdis supérieur pour que ceux-ci puissent encaisser

Les efforts dus à la diffusion des câbles de fléaux, maintenant presque toujours ancrés dans ces nœuds

Compte tenu de ce qui précède, les goussets sont dessinés et pris en compte de manière empirique dans les calculs de dégrossissage et ne sont fixés précisément qu'après détermination précise du câblage de fléau et du ferrailage transversal.

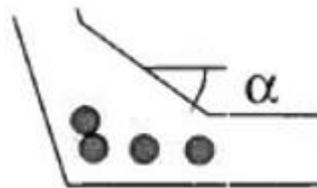
Pour conclure, il faut noter que le contour intérieur des goussets est toujours rectiligne et présente un angle  $\alpha$  compris entre 30 et 45° pour faciliter le bétonnage. Par contre, leur contour extérieur est assez souvent circulaire, pour des raisons purement esthétiques.



**Figure 3.3.** Détail des goussets supérieurs

### 3.2.6. Dimensionnement des goussets inférieurs

Outre leur rôle mécanique de transition entre les âmes et le hourdis inférieur, les goussets inférieurs doivent loger les câbles de continuité intérieure



**Figure 3.4.** Détail des goussets inférieurs

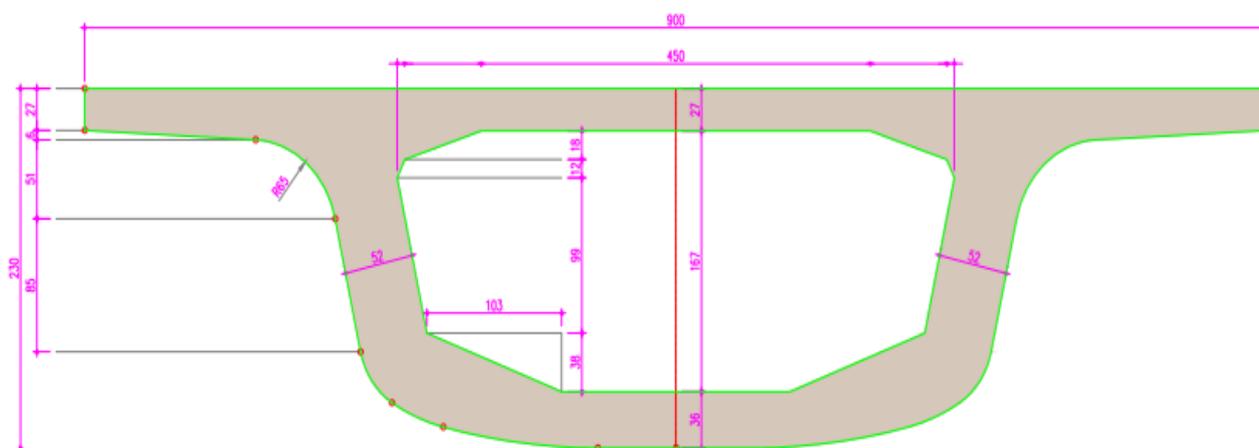
Les goussets inférieurs sont normalement coffrés par la partie inférieure du noyau central du coffrage du voussoir. Leur pente est alors comprise entre 40 et 45° pour favoriser l'écoulement du béton et

Éviter la formation de nids de cailloux ou de défauts de bétonnage. Quand le hourdis inférieur est large, la pente des goussets par rapport à l'horizontale peut descendre à 15 voire 10°, pour permettre une bonne reprise des efforts de flexion transversale. Dans ce cas, les goussets ne sont pas coffrés, mais simplement talochés pendant le bétonnage. Les câbles de continuité intérieurs ou câbles éclisses sont ancrés dans des bossages en excroissance, situés à la liaison entre les âmes et le hourdis inférieurs, ces bossages présentent une longueur en général un peu inférieur à celle des voussoirs courants. Ils sont exécutés en même temps que le reste du voussoir. [10]



**Figure 3.5.** Bossage d'ancrage des câbles de continuité inférieurs

Finalement, nous avons adopté la forme de la section transversale du caisson retenue dans le projet et les dimensions définies ci-dessus.



**Figure 3.6.** Caractéristiques géométriques du voussoir

### 3.3. Détermination des câbles de fléaux et de continuité

#### 3.3.1. Introduction

La justification des sections transversales et la détermination de la section des câbles de précontrainte doit être effectuées en tenant du phasage de réalisation et des conditions d'exploitation de l'ouvrage :

- Calcul de la précontrainte des fléaux P1 et P2 qui sont similaires ;
- Calcul des câbles éclisses de C1-P1 après passage sur appuis définitifs de P1 et démontage du cintre ;
- Calcul des câbles éclisses de P1-P2 après passage sur appuis définitifs de P2 ;
- Calcul des câbles éclisses P2-C2 et démontage du cintre ;
- Justifications après pose du revêtement et mise en service.

Les calculs des sollicitations, des contraintes et des déplacements sont effectués en utilisant le principe de superposition des états d'équilibre, des effets et des forces. Ce principe n'est valable que si :

- Le corps est fixé rigidement de telle sorte que les déplacements de ses points ne soient dus qu'aux déformations ;
- Les contraintes sont proportionnelles aux déformations (loi de Hooke) ;
- L'effet des forces est indépendant des déplacements (pas d'effet du 2ème ordre significatif).

### 3.4. Calcul de la précontrainte des câbles de fléau

Le fléau complet est représenté sur la figure 3.7. Les calculs, sont effectués sur un demi-fléau de portée 24.05 m en supposant que le tablier est encasté dans l'axe de la pile. Le moment résultant de cette hypothèse étant légèrement supérieur à celui que nous aurions trouvé si nous avons considéré l'encastrement au droit des palés de stabilité provisoire. Pour déterminer la portée d'un demi-fléau, il suffit donc d'adopter les longueurs des parties coulées sur cintre et du clavage de clavage de P1-P2. Dans le cas du présent projet, le voussoir de clavage est coulé en place, contrairement au clavages de C1-P1 et de P2-C2 qui se résument à de simples joints.

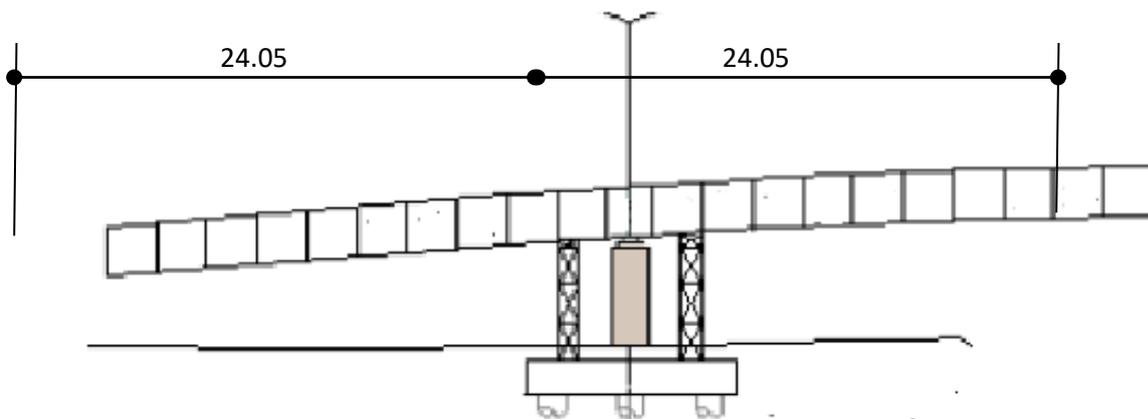


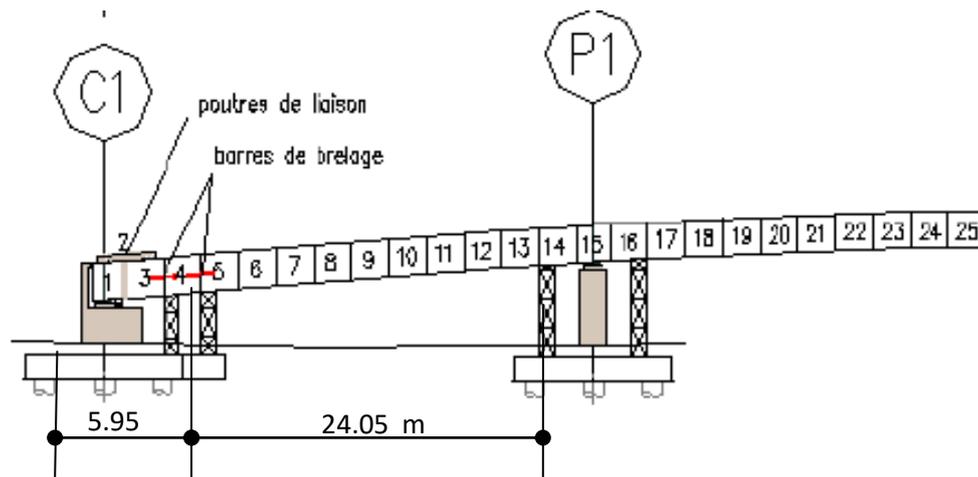
Figure 3.7. Fléau P1

Pour le voussoir de clavage, une longueur  $l_{vc} = 2.3$  m a été adoptée, la portée d'un demi-fléau vaut :

$$L_f = \frac{50.4 - 2.3}{2} = 24.05 \text{ m}$$

Le fléau doit être symétrique, on en déduit la distance entre l'axe d'appui et l'extrémité de la partie coulée sur cintre :

$$L_{cintre} = 30 - 24.05 = 5.95 \text{ m}$$



**Figure 3.8.**Tronçon au droit de C1 posé sur cintre

La partie coulée sur cintre comprend un voussoir de longueur 1.65 m, deux voussoirs de longueur 2.3 m et un joint d'épaisseur 0.3 m.

### 3.4.1. Caractéristiques mécaniques de la section transversale des voussoirs

Le tablier est à hauteur constante. Les caractéristiques mécaniques de la section transversale du caisson ont été calculées en utilisant les logiciels Autocad et Midas civil. Celles-ci sont récapitulées dans le Tableau 3.1.

**Tableau 3.1.** Caractéristiques mécaniques de la section transversale des caissons

B: Aire totale (m <sup>2</sup> )	6.179326
v: Distance CDG /fibre sup (m)	0.912960
v': Distance CDG/ fibre inf (m)	1.387040
I: Inertie (m <sup>4</sup> )	4.0336689
$\rho = I/AVV'$	0.515487

### 3.4.2. Sollicitations sur pile après le bétonnage du dernier voussoir courant

Les fléaux sont soumis au poids propre des voussoirs et des charges de construction définies au §2 (2.2.2.1).

- **Poids propre des voussoirs**

Avec une masse volumique du béton armé  $\gamma = 2.5 \text{ kN/m}^3$ , le moment fléchissant sur pile sous le poids propre du voussoir vaut :

$$M_G(24) = -\frac{25 \times 10^{-3} \times 6.179 \times 24.05^2}{2} = -44.674 \text{ MN.m}$$

L'effort tranchant sur pile vaut :

$$T_G(24) = 25 \times 10^{-3} \times 6.179 \times 24.05 = 3.7151 \text{ MN}$$

- **Charge de construction**

- Charges surfaciques uniformément réparties :

$$q_{ca,k} + q_{cb,k} + q_{cc,k} = 1.7 \text{ KN/m}^2 = 0.0017 \text{ MN/m}^2$$

$$M_{q_{ca}+q_{cb}+q_{cc},k}(24) = -\frac{0.0017 \times 9 \times 24.05^2}{2} = -4.4247 \text{ MN.m}$$

L'effort tranchant sur pile a pour valeur :

$$T_{q_{ca}+q_{cb}}(24) = 0.0017 \times 9 \times 24.05 = 0.3679 \text{ MN}$$

- Charge concentrée  $F_{cb,k} = 100 \text{ KN}$  appliquée en bout de fléau au début du dernier voussoir en cours de bétonnage. La longueur du voussoir  $l_v$  n'est en principe pas connue à ce stade du projet. La longueur des voussoirs courants est généralement constante et varie de 2,50 à 4 m. En se référant aux plans du projet qui nous ont été fournies par la direction de Travaux Publics de Constantine, on adopte  $l_v = 2,30 \text{ m}$ . On pourra ainsi calculer le moment  $M_{Q_{cb}}$  dû à la charge concentrée par la formule :

$$M_{Q_{cb}}(24) = -0.1 \times (24.05 - 2.3) = -2.175 \text{ MN.m}$$

L'effort tranchant sur pile a pour valeur :

$$T_{Q_{cb}}(24) = 0.1 \text{ MN}$$

Les sollicitations à prendre en compte dans les calculs sont :

$$M_{ELS}(24) = -4.4247 - 2.175 - 44.674 = -51.2737 \text{ MN.m}$$

$$T_{ELS}(24) = 37151 + 0.3679 + 0.1 = 4.183 \text{ MN}$$

### 3.4.3. Détermination du nombre de câbles et le nombre de voussoirs

La précontrainte doit reprendre les moments négatifs créés au niveau de la pile dus aux charges de construction ainsi que le poids propre de l'ouvrage.

Par simplification, alors que l'EC2 ne le prévoit pas, le dimensionnement du câblage va se faire à l'ELS.

Dans la zone d'enrobage des câbles (ce qui est le cas de la fibre supérieure sur pile), et en utilisant la valeur caractéristique minimum de la précontrainte, en fin de construction du fléau, on vérifie que les contraintes admissibles sur la fibre supérieure ne soient pas dépassées :

$$\sigma_{tlim} = -0,5 \times f_{ctm}$$

Le voussoir sur pile sera âgé de plus de 28 jours lors de l'achèvement de la construction du fléau donc  $f_{ctm}(t) = f_{ctm} = -3.8 \text{ MPa}$ , nous aurons :

$$\sigma_{tlim} = -1.9 \text{ MPa.}$$

La force de précontrainte nécessaire  $P_k$  sera calculée tel que la contrainte de traction sur la fibre supérieure à l'ELS ne soit pas dépassée :

$$\sigma_{\text{sup}} = \frac{N}{B} + \frac{(M_{\text{ELS}} + Ne_0)}{I} v \geq \sigma_{\text{tlim}} = -1.9 \text{ MPa}$$

Où  $N$  est l'effort normal égal à la force  $P_k$  de précontrainte des câbles de fléau ;

$B$  et  $I$  sont respectivement l'aire et l'inertie de la section brute du béton (section non fissurée).

$N.e_0$  est le moment isostatique de précontrainte des câbles de fléau et  $e_0$  est l'excentricité des câbles.

En supposant une répartition sur un seul lit et un enrobage égal au diamètre de la gaine excentricité des câbles de fléau, vaut :

$$e_0 = v - \phi_g - \frac{\phi_g}{2} = v - \frac{3}{2} \phi_g = 0.7779 \text{ m}$$

On en déduit alors la force  $F$  à partir de l'expression :

$$P_k \geq \frac{\sigma_{\text{tlim}} - \frac{M_{\text{ELS}} \cdot v}{I}}{\frac{1}{B} + \frac{e_0 \cdot v}{I}} = 28.7215 \text{ MN}$$

Les câbles sont constitués de câbles 12T15S enfilés dans des gaines de 9 cm de diamètre. Ces câbles comprennent 15 torons de diamètre 15.7 mm et de section de  $12 \times 150 = 1800 \text{ mm}^2$  chacun. La contrainte maximale autorisée dans les câbles  $\sigma_{p,\text{max}}$  est déterminée à partir de la formule :

$$f_{pk} = 1860 \text{ MPa} \quad f_{pk,0.1} = 1640 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{p,\text{max}} = \min(0,80 f_{pk} = 1488 \text{ MPa} ; 0,90 f_{0,1k} = 1476 \text{ MPa}) = 1476 \text{ MPa}$$

La force appliquée à l'armature de précontrainte  $P_{\text{max}}$  :

$$P_{\text{max}} = A_p \times \sigma_{p,\text{max}} = 2656,8 \text{ MPa}$$

La contrainte dans l'armature immédiatement après la mise en tension ou le transfert vaut :

$$\sigma_{p,m0}(x) = \min(0,75 f_{pk} = 1395 \text{ MPa} ; 0,85 f_{0,1k} = 1394 \text{ MPa}) = 1394 \text{ MPa}$$

La valeur de la force de précontrainte initiale  $P_{m0}(x)$  à ne pas dépasser

$$A_p \times \sigma_{p,m0}(x) = 2.509 \text{ MN}$$

En première approximation, on considère des pertes que l'on peut estimer à 12 % de pertes instantanées et 6 % de pertes différées jusqu'à la fin de la construction du fléau.

La force de précontrainte dans un câble 12T15S après pertes instantanées :

$$P_{m0}(x) = 2656.8 \times 0.88 = 2338 \text{ MPa} < P_{m0}(x) = 2509.2 \text{ MPa}$$

La valeur probable de la force de précontrainte  $P_{m,t}(x)$  à l'instant  $t > t_0$

$$P_m(x) = 2656.8 \times 0.82 = 2.178 \text{ MN}$$

Les valeurs maximale et minimale de la précontrainte pour un câble 12T15S :

$$P_{k,inf}(x) = 0.9 \times P_{m,t}(x) = 1.96 \text{ MN}$$

$$P_{k,sup}(x) = 1.1 \times P_{m,t}(x) = 2.396 \text{ MN}$$

En considérant la valeur caractéristique minimale de la précontrainte, on obtient le nombre minimum de câbles par la formule :

$$n_{câbles} \geq \frac{P_k}{P_{k,inf}} \approx 16$$

On adopte 16 câbles auxquels nous ajoutons deux câbles de précontrainte pour la dernière paire de voussoir courant, soit :

$$n_{câbles} = 18$$

ce qui nous conduit à découper le fléau en  $2 \times 9$  voussoirs courants de 2.54 m de longueur. Dans le projet réel, 10 voussoirs de 2.3 m ont été adoptés, solution que nous avons retenue.

Par ailleurs, dans le cas de voussoirs préfabriqués, pour assurer la continuité entre deux voussoirs contigus, on doit vérifier la non décompression du béton : pour toutes les phases de calcul.

$$\begin{aligned} \sigma_c &= \frac{P_{k,inf}}{B} + \frac{(M_G + M_Q + P_{k,inf}e_0)v'}{I} = 13.9 \text{ MPa} > 0 \\ \sigma_c &= \frac{1.960 \times 18}{6.179} + \frac{(44.674 + 4.4247 + 2.175 - (1.960 \times 18 \times 0.7779)) \times 1.387}{4.03366} \\ &= 13.9 \text{ MPa} > 0 \text{ Condition vérifiée} \end{aligned}$$

On doit aussi vérifier les contraintes de compression aux ELS :

$$\begin{aligned} \sigma_c &= \frac{P_{k,sup}}{B} + \frac{(M_G + M_Q + P_{k,sup}e_0)v'}{I} \leq 0.6 f_{ck}(t) = 27 \text{ MPa} \\ &= \frac{2.396 \times 18}{6.179} + \frac{(44.674 + 4.4247 + 2.175 - (2.396 \times 18 \times 0.7779)) \times 1.387}{4.03366} \\ &= 13.07 \text{ MPa} < 0.6 f_{ck}(t) = 27 \text{ MPa} \text{ Condition vérifiée} \end{aligned}$$

$$c = \frac{P_{k,sup}}{B} + \frac{(M_G - P_{k,sup}e_0)v'}{I} \leq 0.45f_{ck}(t) = 20.25 \text{ MPa}$$

$$c = \frac{2.396 \times 18}{6.179} + \frac{(44.674 - (2.396 \times 18 \times 0.7779)) \times 1.387}{4.03366}$$

$$= 10.80 \text{ MPa} < 0.45f_{ck}(t) = 20.25 \text{ MPa} \text{ Condition vérifié}$$

### 3.5. Calcul de la précontrainte de clavage

#### 3.5.1. Clavage entre C1 et P1

Avant le clavage entre C0 et P1, le fléau est parfaitement équilibré et ne s'appuie pas sur le cintre. Le poids des voussoirs sur cintre n'engendre aucun effort sur le fléau. Lorsqu'on libère le cintre, cette partie sera liée à l'extrémité du fléau et s'appuie sur les appareils d'appui disposés sur le sommier de la culée. La libération du cintre correspond à l'application d'une charge uniformément répartie sur la partie préalablement posée sur cintre. Après démontage des palées de stabilité au droit de la pile P1, donc libération de l'encastrement, le tablier est simplement appuyé sur pile P1. Les moments positifs calculés avec une poutre simplement appuyée et une console soumise à une charge uniformément répartie résultant du poids propre des voussoirs 1, 3 et 4 seront cumulé avec les moments négatifs obtenus durant la phase de fléau comme il est représenté sur la figure 3.3.

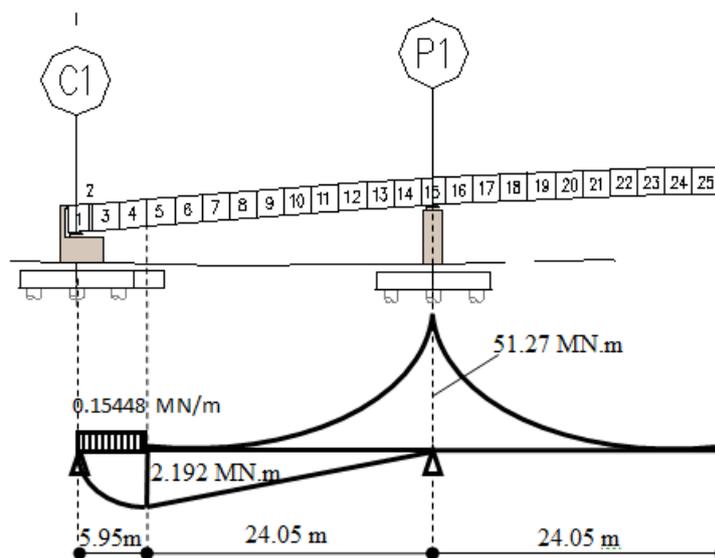


Figure 3.9. Détermination des efforts dus au clavage côté C1

Le moment de fléau ne changera pas car cette charge déjà appliquée est symétrique, le fléau restant toujours parfaitement encasturé.

La structure étudiée étant isostatique, nous pouvons calculer simplement les réactions d'appui et le moment de flexion longitudinale par les équations de la statique.

Le poids propre des voussoirs par mètre linéaire est égale à  $Q = 6.179326 \times 0,025 = 0,15448 \text{ MN/m}$ .

$$R = \frac{0.15448 \times 5.95(5.95/2 + 24.05)}{30} = 0.828 \text{ MN}$$

$$M(5.95) = 0.828 \times 5.95 - \frac{0.15448 \times 5.95^2}{2} = 2.192 \text{ MN.m}$$

L'effort  $N$  développé par les câbles éclisses au droit du clavage doit satisfaire la condition suivante :

$$N \geq \frac{-\sigma_t + \frac{M.V'}{I}}{\frac{1}{B} + \frac{e_0.V'}{I}} = -1.93 < 0$$

En principe, aucun câble n'est nécessaire. Afin de prévenir toute fissuration liée à des phénomènes parasites (retrait gêné, etc.), nous prévoyons cependant une paires de câbles 12T15S.

### 3.5.2. Clavage entre P1 et P2

Après la réalisation du fléau P2, on procède au clavage entre P1 et P2. Les câbles éclisses de la travée P1-P2 doivent reprendre le poids propre du voussoir de clavage coulé en place, l'effet de l'enlèvement de l'équipage mobile et l'effet du gradient thermique. Contrairement aux câbles éclisses au droit du clavage C1-P1, ils développent à la fois des moments isostatiques et des moments hyperstatiques. La figure représente la structure au moment du clavage P1-P2.

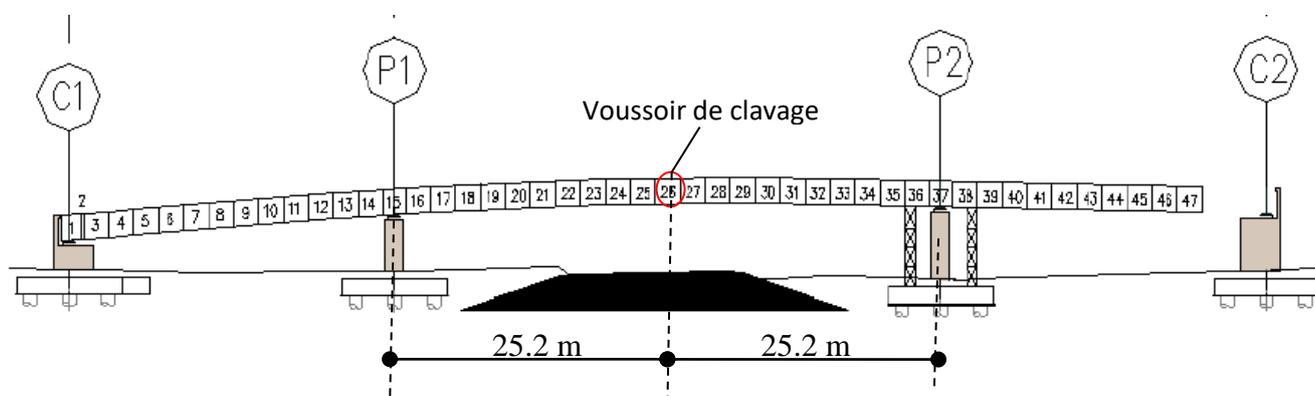


Figure 3.10. Représente la structure au moment du clavage P1-P2

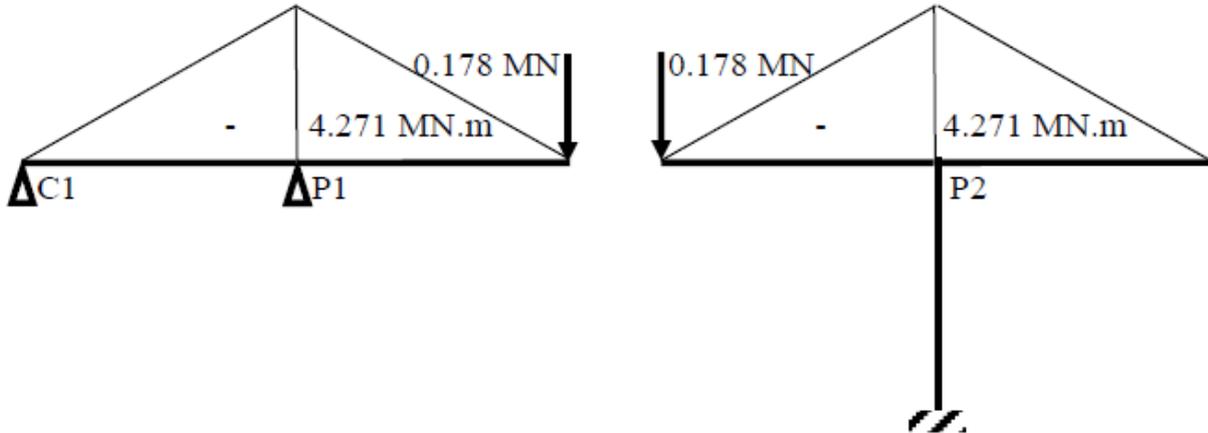
#### 3.5.2.1. Vérification pendant le bétonnage

##### Phase 1

À ce stade du calcul, il est bon de s'assurer que les câbles de fléau sont suffisants pour reprendre le poids du tablier pendant la construction du clavage central. Pour cela, on applique une forces verticales orientées vers le bas à chaque extrémité des fléaux (Figure 3.11), force qui représente l'effet du poids de béton de clavage encore mou. Cette force s'exerce sur deux structures indépendantes et isostatiques, puisque, à ce stade, les deux moitiés du pont ne sont pas encore liées.

Le poids du voussoir de clavage  $V_c = 6.179326 \times 0,025 \times 2.3 = 0.3553 \text{ MN}$

$$\text{D'où } \frac{V_c}{2} = 0.1776 \text{ MN}$$



**Figure 3.11.** Diagramme des moments de flexion dus aux poids de voussoir de clavage

Durant cette phase, la contrainte en fibre supérieure dans l'axe des piles doit vérifier les conditions suivantes :

$$\sigma_c = \frac{1.96 \times 18}{6.179} + \frac{(44.674 + 4.2712 - (1.96 \times 18 \times 0.7779)) \times 0.912960}{4.03366} = 10.57 \text{ MPa} > 0 \text{ Condition vérifiée}$$

$$\sigma_c = \frac{2.396 \times 18}{6.179} + \frac{(44.674 + 4.2712 - (2.396 \times 18 \times 0.7779)) \times 0.912960}{4.03366} \leq 0.6 f_{ck}(t) = 27 \text{ MPa}$$

$$= 10.46 \text{ MPa} < 0.6 f_{ck}(t) = 27 \text{ MPa} \text{ Condition vérifiée}$$

$$\sigma_c = \frac{2.396 \times 18}{6.179} + \frac{(44.674 - (2.396 \times 18 \times 0.7779)) \times 0.912960}{4.03366} \leq 0.45 f_{ck}(t) = 20.25 \text{ MPa}$$

$$9.49 \text{ MPa} < 0.45 f_{ck}(t) = 20.25 \text{ MPa} \text{ Condition vérifiée}$$

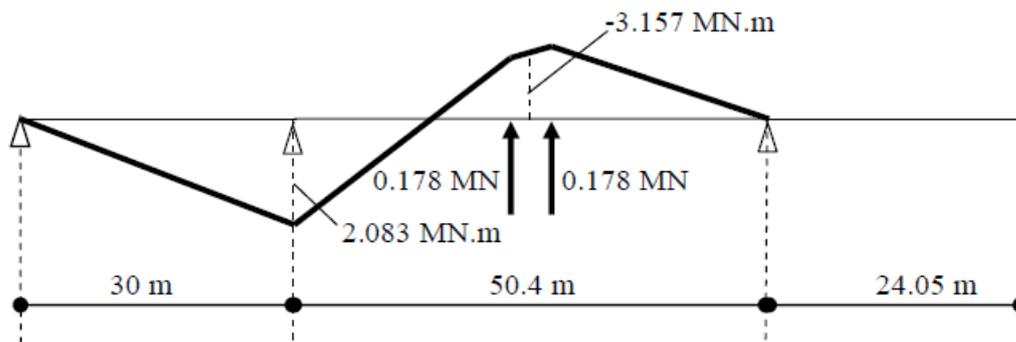
$$\sigma_c = \frac{1.96 \times 18}{6.179} + \frac{(44.674 - (1.96 \times 18 \times 0.7779)) \times 0.912960}{4.03366} \leq 0.45 f_{ck}(t) = 20.25 \text{ MPa}$$

$$9.60 \text{ MPa} \leq 0.45 f_{ck}(t) = 20.25 \text{ MPa} \text{ Condition vérifiée}$$

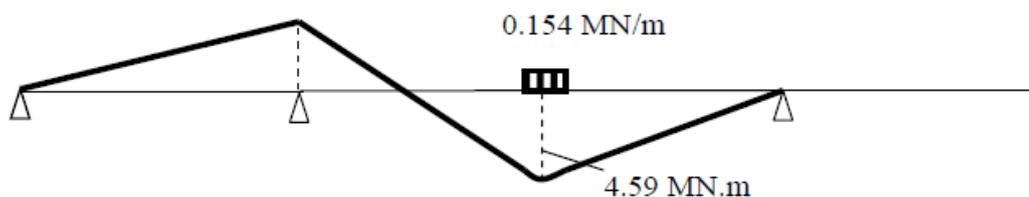
La section du béton et celle des câbles de précontrainte sont bien dimensionnées.

## Phase 2

Cette phase peut être décomposée en deux parties. En premier lieu, on applique la force verticale orientée vers le haut à chaque extrémité des fléaux (Figure 3.6). Cette force représente l'effet de l'enlèvement de la travée de liaison et le béton de clavage (béton mou) que nous remplacerons dans un deuxième temps par une charge uniformément répartie orientée vers le bas représentant le béton durci (Figure 3.7). Dans cette phase, la structure est hyperstatique.



**Figure 3.12.** Diagramme des moments dus à l'enlèvement de la travée de liaison



**Figure 3.13.** Diagramme des moments dus à l'enlèvement de la travée de liaison

Au terme de ces deux dernières étapes, le moment à considérer pour le calcul des câbles éclisses de la travée P1-P2 est égale à :  $4.59 - 3.157 = 1.433$  MN.m.

### 3.5.2.2. Vérification après clavage

#### ● Effet du gradient thermique

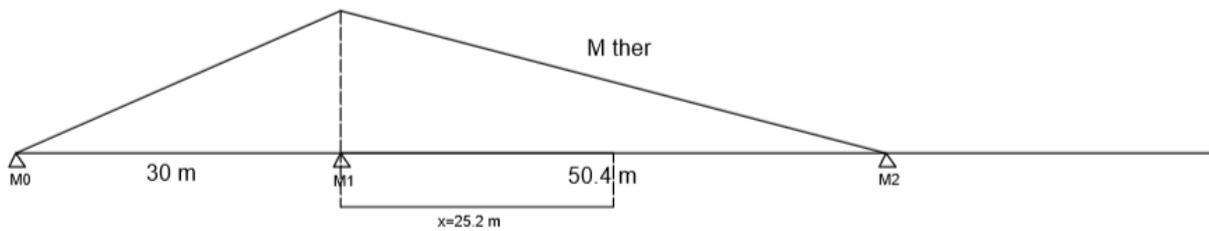
Le gradient thermique est une différence de température entre la fibre supérieure et la fibre inférieure du tablier (notée  $\Delta\theta$ ). La déformation ainsi créée engendre des efforts dans une structure hyperstatique [7].

Les contraintes normales dans l'ouvrage doivent être vérifiées dans le cas suivant :

- à vide avec un gradient thermique de  $+7$  ou  $-7$  ° C (y compris pendant la construction)

Le théorème des trois moments permet le calcul des moments correspondants à partir des rotations isostatiques données ci-dessous. Le calcul est fait avec le module instantané du béton  $E_{cm}$ .

Sous gradient thermique positif (fibre supérieure plus chaude que la fibre inférieure) le moment dû au gradient thermique  $M_{th}$  est positif et crée donc une traction en fibre inférieure à la clé.



**Figure 3.14.**..Moment dû au gradient thermique dans le cas du trois travées symétriques

A ce stade, la poutre est une fois hyperstatique. L'inconnue hyperstatique est le moment sur appui  $M_1$  qu'on détermine à l'aide de la méthode des trois moments. La poutre étant à inertie constante, les coefficients de souplesse et les rotations isostatiques de chaque travée sont calculés à partir des formules suivantes :

$$a = c = \frac{l}{3EI}; b = \frac{L}{6EI}$$

d'où on obtient :

$$a_1 = c_1 = \frac{30}{3EI} = \frac{10}{EI} \quad a_2 = c_2 = \frac{50.4}{3EI} = \frac{16.8}{EI}$$

$$b_1 = \frac{30}{6EI} = \frac{5}{EI} \quad b_2 = \frac{50.4}{6EI} = \frac{8.4}{EI}$$

$E = 36000 \text{ MPa}$  et  $I = 4.033 \text{ m}^4$ .

Les rotations isostatiques de chaque travée lorsque celles-ci soumise à un gradient de température  $\Delta\theta$  sont déterminées à l'aide de la formule suivante :

$$w' = -w'' = \frac{\lambda \cdot \Delta\theta}{h} \times \frac{L}{2}$$

$\lambda$  est le coefficient de dilatation thermique du béton pris égale à  $10^{-5}$  ;

$h$  est la hauteur totale de la poutre.

Dans le cadre de ce projet, on adopte  $\Delta\theta = 14^\circ$ .

D'où l'obtient :

$$w'_1 = -w''_1 = \frac{10^{-5} \cdot 14}{2.3} \times \frac{30}{2} = 0.00091304 \text{ rd}$$

$$w'_2 = -w''_2 = \frac{10^{-5} \cdot 14}{2.3} \times \frac{50.4}{2} = -0.0015339 \text{ rd}$$

Pour une poutre symétrique à deux travées le moment  $M_1$  est déterminé à l'aide de l'équation suivante :

$$(c_1 + a_2)M_1 = w'_2 - w''_1$$

d'où :

$$M_1 = \frac{w'_2 - w''_1}{(c_1 + a_2)} = 13256 \text{ KN} \cdot \text{m} = 13.256 \text{ MN} \cdot \text{m}$$

A la clé, le moment fléchissant a pour valeur :

$$M_{ther}(2, 25.2) = \frac{M_1}{2} = 6.627 \text{ MN} \cdot \text{m}$$

### ● Moment isostatique des câbles de continuité de P1-P2

Le moment isostatique est une inconnue. Celui-ci est en effet proportionnel à la précontrainte mise en œuvre. Le moment isostatique se calcule de la manière suivante :

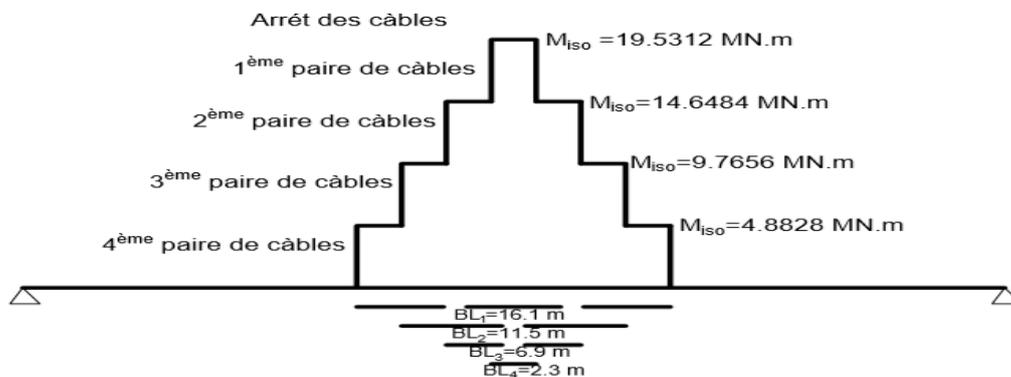
$M_{iso} = N \cdot e_0$  avec  $N$  = effort normal dans la section dû aux câbles et  $e_0$  = excentricité des câbles éclisses. [8]

$$M_{iso} = -N \times e_0$$

$$e_0 = (v' - 1,5\phi_g) = (1,387040 - 1,5 \times 0,09) = 1,25204 \text{ m}$$

$$N = 1,95 \times n_{câble}$$

En première approximation, on adopte 8 paires de câbles implantés dans 3 voussoirs de part et d'autre du voussoir de clavage, soit au total 7 voussoirs comme il est représenté sur la figure 3.9.



**Figure. 3.15.** Diagramme des moments isostatiques dus à l'excentricité des câbles de continuité

### ● Moment hyperstatique des câbles éclisses de P1-P2

La structure étant hyperstatique au moment de leur mise en tension, les câbles éclisses développent dans la travée centrale un moment hyperstatique de signe contraire à celui du moment isostatique ( $Ne_0$ ) qu'ils développent. Ce moment hyperstatique est une inconnue qui dépend de l'intensité et de la

distribution de la précontrainte dans la travée (tracé, longueur des câbles) mais aussi des caractéristiques de la structure étudiée.

Dans le cas présent, l'excentricité des câbles et l'inertie de la poutre sont constants, les rotations isostatiques de la deuxième travée, en appliquant le principe de superposition des effets, ont pour valeurs :

$$\omega'_2 = -w''_2 = \frac{N \cdot e_0 \cdot (\beta \cdot L_1 + \beta \cdot L_2 + \beta \cdot L_3 + \beta \cdot L_4)}{2}$$

$$\omega'_2 = \frac{3.9 \cdot 1.252 \cdot (16.1 + 11.5 + 6.9 + 2.3)}{2} = 89.84 \text{ rd}$$

L'effort normal dû à une paire de câble vaut :

$$N = 1,95 \times 2 = 3.9 \text{ MN}$$

Le moment hyperstatique au milieu de la deuxième travée se calcule à l'aide de la formule :

$$M_{hyper}(2, 25.2) = M_1 = M_2 = \frac{\omega'_2}{(c_1 + a_2)} = \frac{89.84}{26.8} = 3.352 \text{ MN} \cdot \text{m}$$

### ● Vérification des contraintes

Dans cette nouvelle phase, les contraintes en fibre inférieure doivent vérifier les conditions suivantes :

$$-\frac{N}{B} - \frac{M_g \cdot v'}{I} + \frac{N \cdot e_0 \cdot v'}{I} - \frac{M_{ther} \cdot v'}{I} - \frac{M_{hyper} \cdot v'}{I} \geq \sigma_t$$

$$B = 6,179326 \text{ m}^2$$

$$I = 4.0336689 \text{ m}^4$$

$$v' = 1.387040 \text{ m}$$

$$e_0 = 1,252 \text{ m}$$

$$M_g = 0.1544 \text{ MN} \cdot \text{m}$$

$$N = 3.9 \text{ MN}$$

$$M_{hyper} = 3.352 \text{ MN} \cdot \text{m}$$

$$M_{ther} = 6.627 \text{ MN} \cdot \text{m}$$

$$\frac{N}{B} - \frac{M_g \cdot v'}{I} + \frac{N \cdot e_0 \cdot v'}{I} - \frac{M_{ther} \cdot v'}{I} - \frac{M_{hyper} \cdot v'}{I} \geq \sigma_t$$

$$\frac{3.9}{6.179} - \frac{0.1544 \cdot 1.387}{4.033} + \frac{3.9 \cdot 1.252 \cdot 1.387}{4.033} - \frac{6.627 \cdot 1.387}{4.033} - \frac{3.352 \cdot 1.387}{4.033} \geq \sigma_t = -1.9 \text{ MPa}$$

$$= 0.63117 - 0.0531 + 1.679257 - 2.27911 - 1.15279$$

$$= -1.17 \text{ MPa} > \sigma_t = -1.9 \text{ MPa} \quad \text{Condition vérifiée}$$

En fibre supérieure la contrainte de compression doit être inférieure à  $0.45 f_{ck}$  sous combinaison quasi permanente.

$$\frac{N}{B} + \frac{M_g \cdot v}{I} - \frac{N \cdot e_0 \cdot v}{I} + \frac{M_{ther} \cdot v}{I} + \frac{M_{hyper} \cdot v}{I} \leq 0.45 f_{ck}(t) = 20.25 \text{ MPa}$$

$$\frac{3.9}{6.179} + \frac{0.1544 \cdot 0.9129}{4.033} - \frac{3.9 \cdot 1.252 \cdot 0.9129}{4.033} + \frac{6.627 \cdot 0.9129}{4.033} + \frac{3.352 \cdot 0.9129}{4.033}$$

$$= 0.63117 + 0.035 - 1.1053 + 1.5 + 0.7587$$

$$= 1.820 < 0.45 f_{ck}(t) = 20.25 \text{ MPa} \quad \text{Condition vérifiée}$$

La section du béton et celle des câbles de précontrainte sont bien dimensionnées.

### 3.5.3. Vérification pendant le bétonnage du clavage P2-C2

A ce stade de calculs préliminaires et pour conserver la symétrie, on adopte la même section de câble adoptée pour le clavage P1-C1, soit une paires de câbles 12T15S. Cette section sera justifiée durant la phase de mise en service en utilisant un modèle numérique conduisant à des résultats plus précis que ceux proposés ci-dessus.

**CHAPITRE 4 :**  
**Modélisation et vérification de la sécurité structurale**  
**du pont**

## 4.1. Introduction

Dans ce chapitre, les calculs réalisés dans le chapitre 3 sont affinées en effectuant une analyse linéaire du tablier étudié avec le logiciel de calcul Midas Civil en tenant compte :

- De la durée des différentes phases de construction ;
- Des effets à long terme après la mise en service de l'ouvrage (fluage et retrait) ;
- De l'effet des poids de la superstructure et des équipements ;
- De l'effet des actions du trafic ;
- Du tracé et de l'excentrement des câbles de précontrainte adopté (voir Annexe) ;
- Des pertes réelles de précontrainte.

Une fois les diagrammes des sollicitations sous les combinaisons d'action et les courbes enveloppes obtenus, le Logiciel Midas permet de procéder, pour différentes sections du tablier au cours des différentes phases de construction, aux justifications de l'Eurocode suivantes :

Aux ELS :

- Contraintes sous l'action des charges de construction ;
- Contraintes sous l'action des charges de service ;
- Contraintes principales sous l'action des charges de construction ;
- Contraintes principales sous l'action des charges de service
- Epaisseur des fissures sous l'action des charges de service.

Aux ELU :

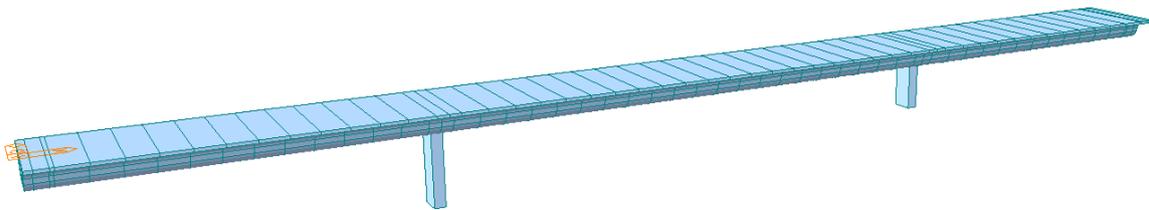
- résistance au moment de flexion ;
- résistance à l'effort tranchant ;
- résistance à l'effort tranchant + torsion.

Les valeurs des déplacements, des sollicitations et des contraintes sont déterminés à l'aide du modèle numérique disponible dans le logiciel de calcul par éléments finis Midas Civil, version 19. Les différentes étapes nécessaires à l'introduction des données du modèle numérique sont résumées ci-après.

## 4.2. Présentation du logiciel de calcul MIDAS

MIDAS CIVIL est un logiciel d'analyse par éléments finis développé par MIDAS IT dont le

siège est basé en Corée du sud. MIDAS CIVIL fournit les outils nécessaires à la modélisation, l'analyse et la conception avancées pour l'ingénieur de ponts. Il s'agit d'un logiciel avancé de modélisation des structures qui concurrence le marché d'autres logiciels majeurs commerciaux tels que LARSA, LUSAS, Bentley RM BRIDGE et CSI BRIDGE (SAP 2000 dédié à la modélisation de ponts). MIDAS CIVIL est dédié au calcul et la conception de différents types de ponts. Il remplace le logiciel SAP2000 qui a montré des insuffisances dans certains domaines de conception et de vérification selon certaines normes, MIDAS possède de nombreuses options de modélisation de ponts: FEA, analyse et conception des poutres, analyse en 3D des tabliers des ponts, analyse des fondations des ponts, analyse des pieux, analyse intégrale de piliers, analyse complète des ponts en 3D (superstructure + infrastructure), analyse thermique et analyse sismique.



**Figure 4.1.** Modèle globale de type « beam »

### 4.3. Introduction des données

**1<sup>ère</sup> étape :** On introduit les caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés :

Material ID	2	Name	Y177057(15.7mm)
Elasticity Data			
Type of Design	Steel	Steel	
		Standard	EN05-PS(S)
		DB	Y177057(15.7mm)
Type of Material			
	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Isotropic	Orthotropic	
Steel			
Modulus of Elasticity :	1.9500e+008	kN/m <sup>2</sup>	
Poisson's Ratio :	0.3		
Thermal Coefficient :	1.2000e-005	1/[C]	
Weight Density :	76.98	kN/m <sup>3</sup>	
<input type="checkbox"/> Use Mass Density:	7.85	kN/m <sup>3</sup> /g	

**Figure 4.2.** Caractéristiques mécaniques des torons

**Figure 4.3.** Caractéristiques mécaniques du béton

**2<sup>ème</sup> étape :** On introduit les paramètres liés au comportement du béton à long terme

**Figure 4.4.** Paramètres liés au retrait et au fluage

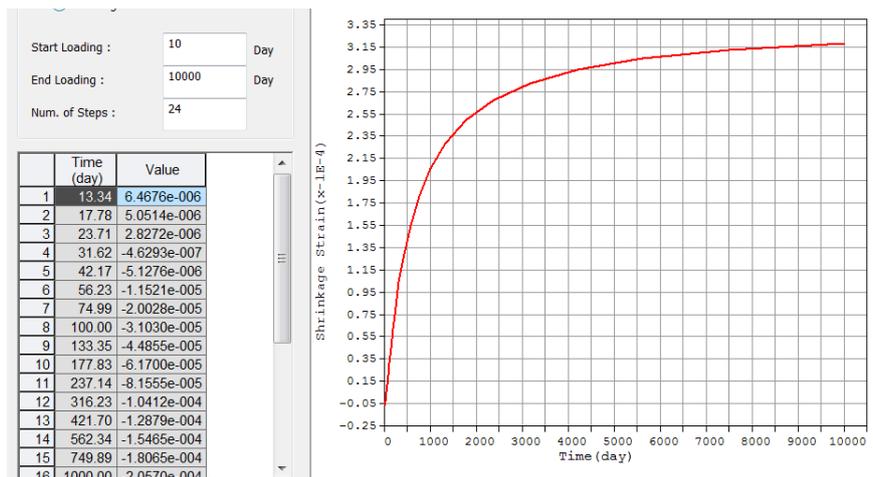


Figure 4.5. Variation des déformations du retrait en fonction du temps pour un béton C45/55

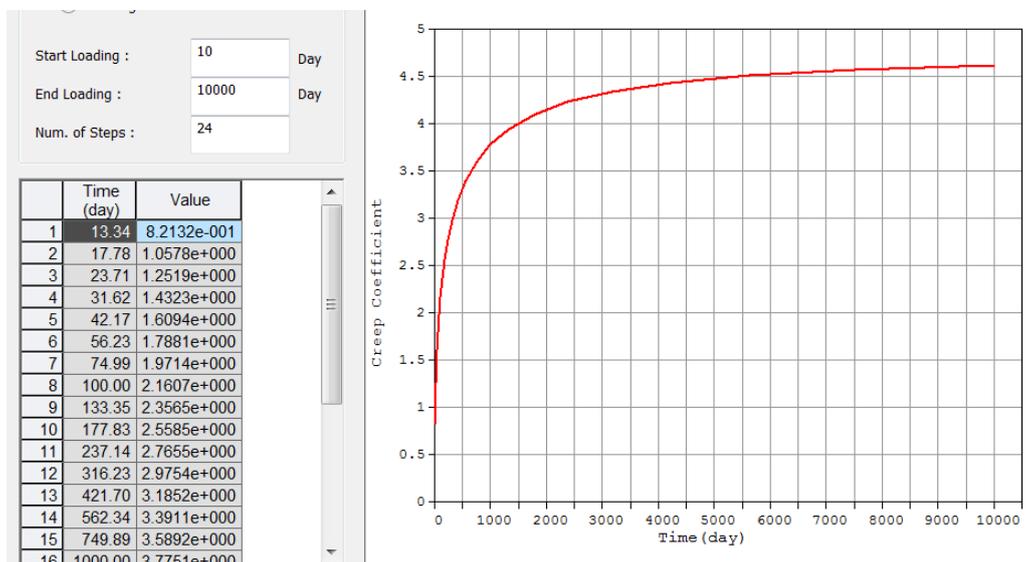


Figure 4.6. Variation du coefficient de fluage en fonction du temps pour un béton C45/55

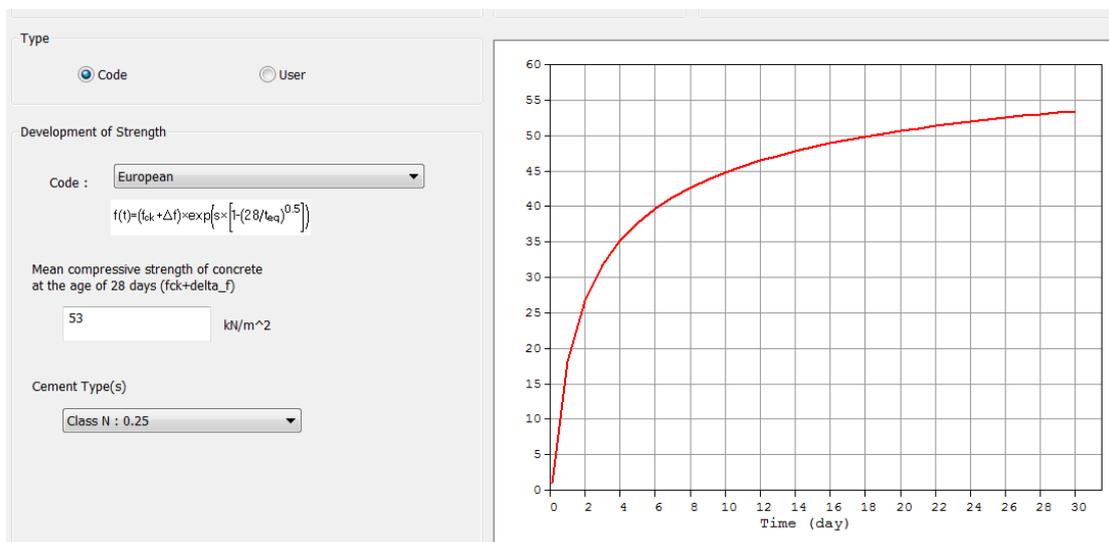
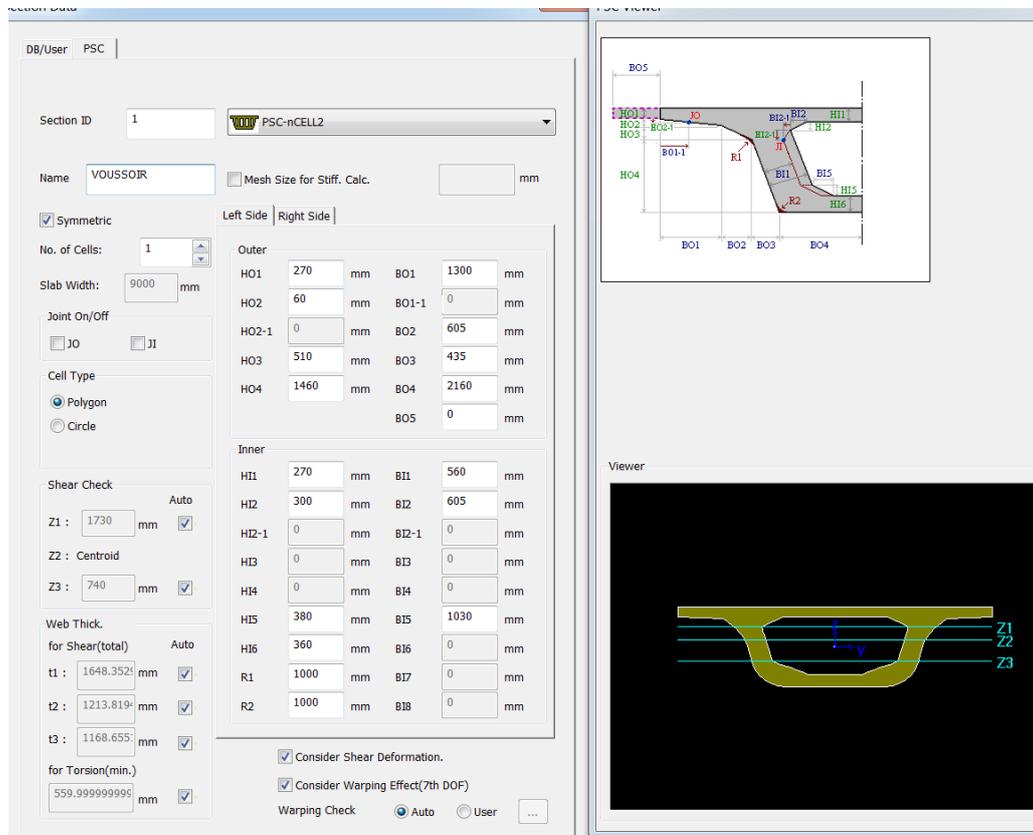


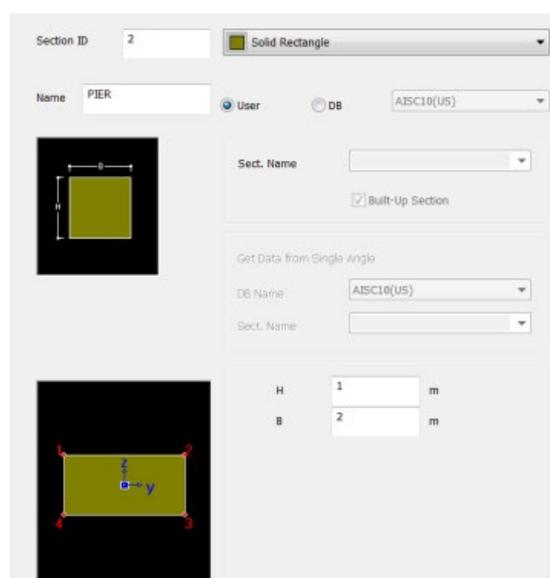
Figure 4.7. Evolution de la résistance à la compression du béton en fonction du temps

**3<sup>ème</sup> étape :** Après avoir définie le type de caisson PSC-nCELL2, on introduit les dimensions de la section transversale du caisson pour obtenir les caractéristiques géométriques de la section transversale.



**Figure 4.8.** Dimensions de la section transversale du caisson

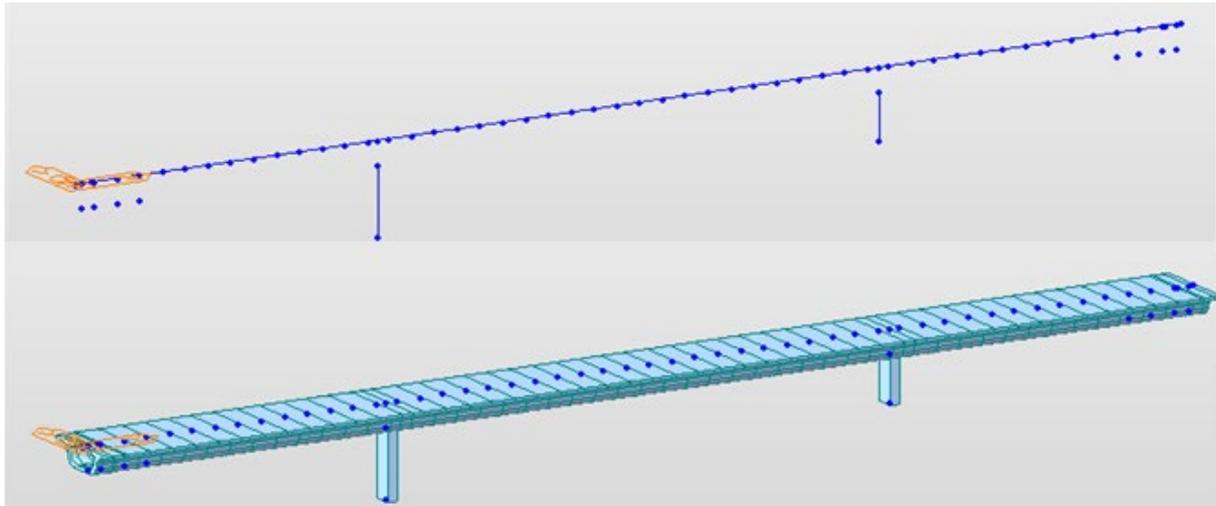
**4<sup>ème</sup> étape :** On défini la section transversale des piles. Pour simplifier nous avons choisi une section de forme rectangulaire



**Figure 4.9.** Section transversale des piles

**5<sup>ème</sup> étape :** Discrétisation de la géométrie longitudinale du pont.

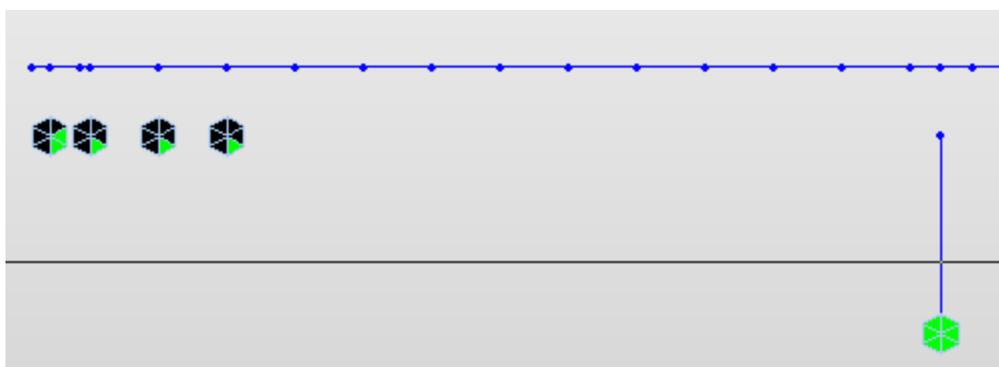
1. On définit l'axe longitudinale du pont à partir de deux points. L'axe est discrétisé en éléments ayant une longueur égale à 2.3 m en travée courante, 2.1m sur pile et 1.65 au droit des culées.
2. On attribue à chaque élément les caractéristiques géométriques et les matériaux préalablement définis.



**Figure 4.10.** Géométrie et discrétisation du pont

**6<sup>ème</sup> étape :** On introduit les conditions d'appui.

- Les piles sont encastrées à la base (tous les degrés de liberté sont bloqués).
- Les culées sont remplacées par des appuis simples pour le tablier.
- Durant toutes les phases de construction, les déplacements verticaux sont bloqués sur toute la partie coulée sur cintre.
- On définit la liaison entre le tablier et les piles. Une liaison de type rigide a été adoptée.



**Figure 4.11.** Définition des conditions d'appui

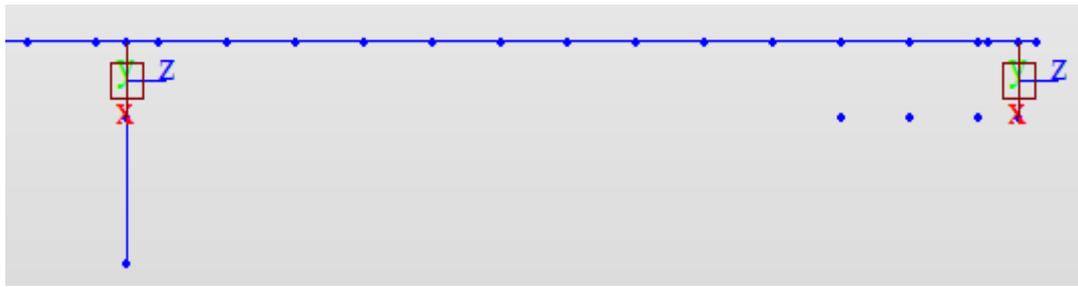


Figure 4.12. Liaison pôle tablier de type rigide

### 7<sup>ème</sup> étape: Introduction des câbles de précontrainte

1. On introduit les paramètres des câbles de précontrainte (diamètre de la gaine, nombre de torons, coefficient de relaxation, contrainte ultime), leur tracé et leur position en plan et en élévation.

Les câbles de fléau sont disposés au niveau du hourdis supérieur, leurs tracés en plan et en élévation comportent un tronçon rectiligne et un tronçon courbe avant leur ancrage. Le rayon de courbure en plan  $R = 16^\circ$  et en élévation  $R = 10^\circ$ .

Les câbles de continuité ou éclissés sont disposés au niveau du hourdis inférieur. Ils comportent un tracé horizontal et sont ancrés dans des bossages. Dans cette étude, les bossages n'ont pas été considérés dans le modèle numérique.

Le tracé détaillé du câblage est représenté dans l'annexe J.

**Tendon Name:** TENDON

**Tendon Type:** Internal(Post-Tension)

**Material:** 4: Y1770S7(15.7mm)

**Total Tendon Area:** 1800 mm<sup>2</sup>

**Duct Diameter:** 90 mm

Relaxation Coefficient: European Ordinary

**Name:**

**Ultimate Strength:** 1860 N/mm<sup>2</sup>

**Yield Strength:** 1600 N/mm<sup>2</sup>

**Curvature Friction Factor( $\mu$ ):** 0.3

Wobble Friction Factor( $K = \mu \times k$ ): 1.5e-006 1/mm

Unintentional Angular Displacement( $k$ ): 5e-006 rad/mm

**External Cable Moment Magnifier:** 0 N/mm<sup>2</sup>

**Anchorage Slip(Draw in):** Begin: 5 mm, End: 5 mm

**Bond Type:**  Bonded,  Unbonded

**Tendon Name:** S10R, **Group:** P1 R

**Tendon Property:** TENDON

**Assigned Elements:** 7to28

**Input Type:**  2-D,  3-D

**Curve Type:**  Spline,  Round

**Straight Length of Tendon:** Begin: 0 mm, End: 0 mm

Typical Tendon, **No. of Tendons:** 1

**Transfer\_Length:** User defined Length, Begin: 0 mm, End: 0 mm

**Profile:** Reference Axis:  Straight,  Curve,  Element

	x(mm)	y(mm)	R(m)	Add	A(deg)	h(mm)	r(mm)
1	0.000	-234	0.000	None	0.0000	0.000	0.000
2	2330	-379	1000	None	0.0000	0.000	0.000
3	4577	-379	1000	None	0.0000	0.000	0.000
4	4810	-234	0.000	None	0.0000	0.000	0.000
5							

	x(mm)	z(mm)	R(m)	Add	A(deg)	h(mm)	r(mm)	BO
1	0.000	-770	0.000	Non	0.000	0.000	0.000	<input type="checkbox"/>
2	2000	-155	1000	Non	0.000	0.000	0.000	<input type="checkbox"/>
3	4610	-155	1000	Non	0.000	0.000	0.000	<input type="checkbox"/>
4	4810	-770	0.000	Non	0.000	0.000	0.000	<input type="checkbox"/>
5								

Figure 4.13. Diamètre, propriétés mécaniques, position et tracé des câbles

2. On dispose les armatures passives en respectant les conditions d'enrobage et l'espacement entre les barres longitudinales et transversales.

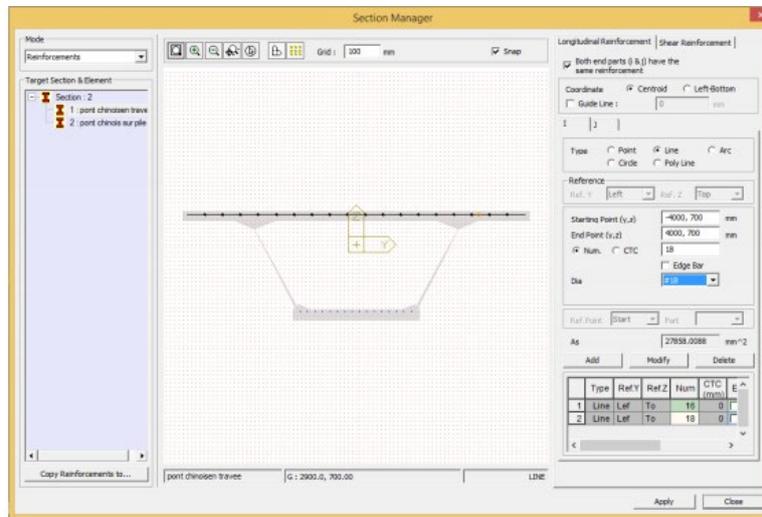


Figure 4.14. Disposition des armatures passives

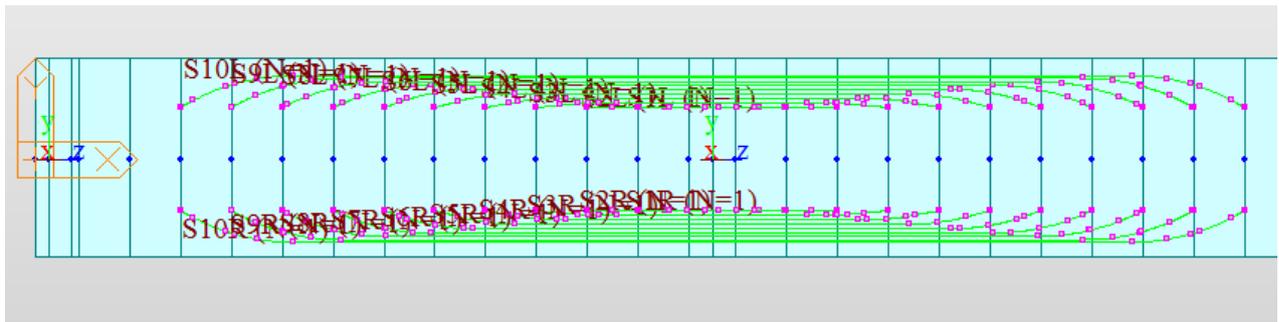


Figure 4.15. Vue en plan des câbles de fléau

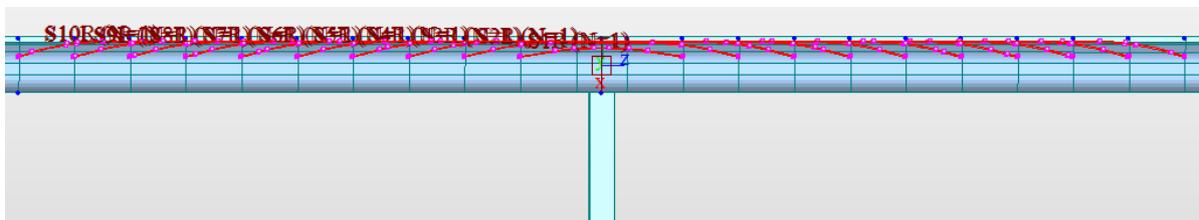


Figure 4.16. Vue en élévation des câbles de fléau

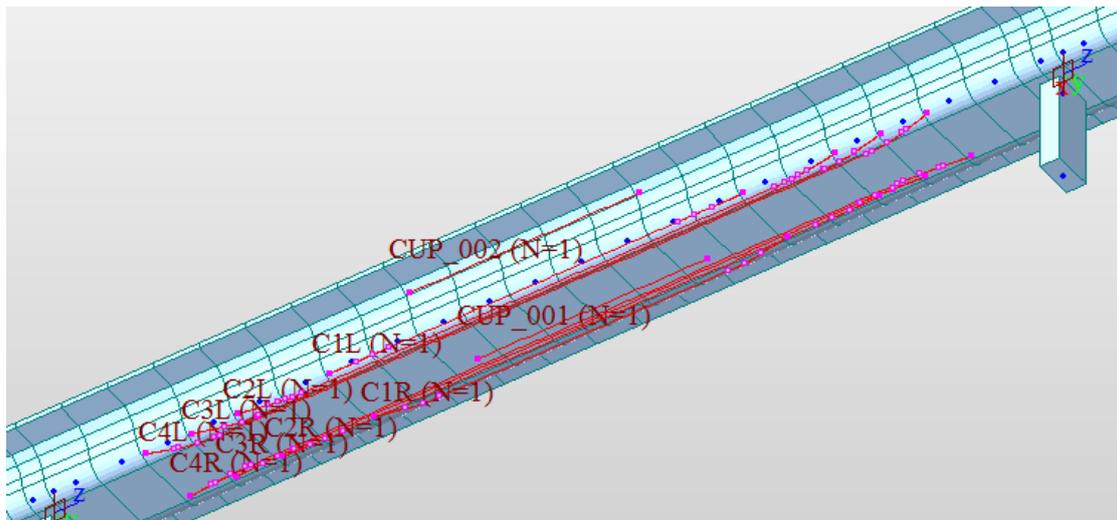


Figure 4.17. Tracé des câbles de continuités P1-P2

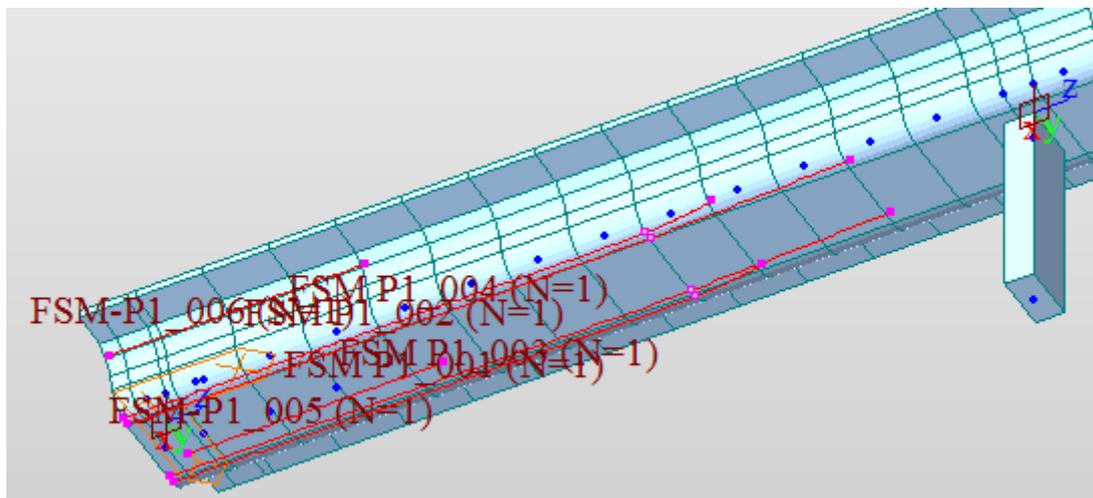


Figure 4.18. Tracé des câbles de continuité C1-P1

**8<sup>ème</sup> étape :** On introduit les différents types de charge ;

- Poids propre du caisson (Dead load).
- Charge de construction.
- Surcharges d'exploitation.
- Température et gradient thermique.

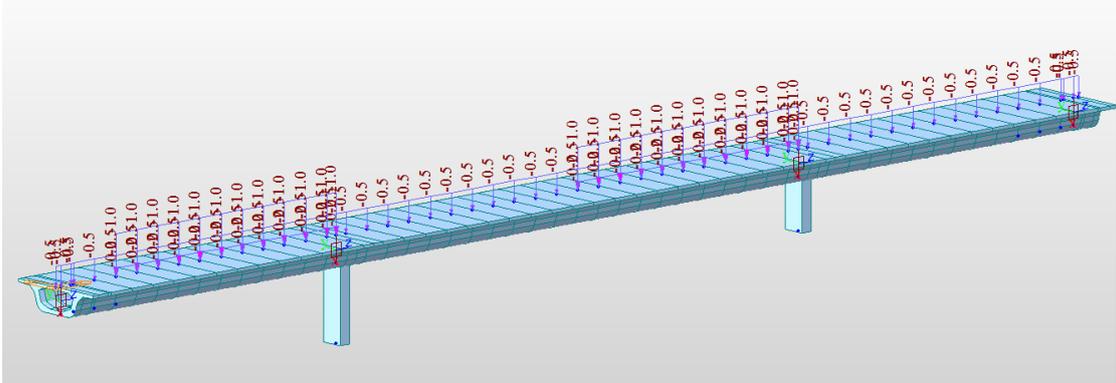


Figure 4.19. Charges de construction

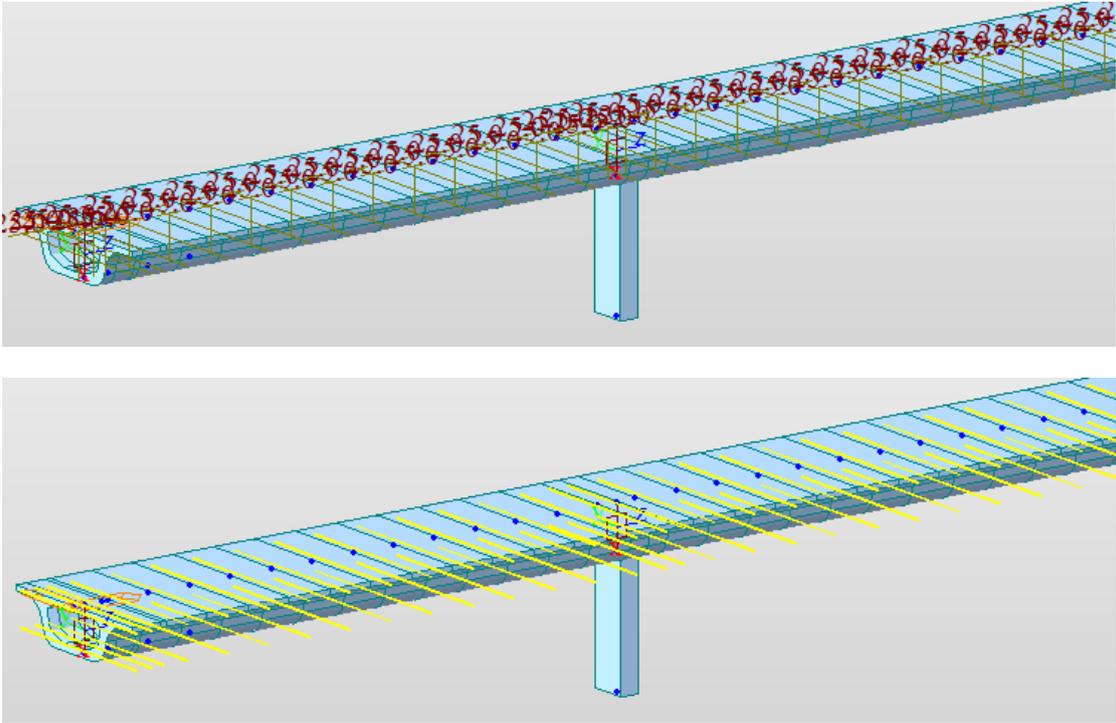
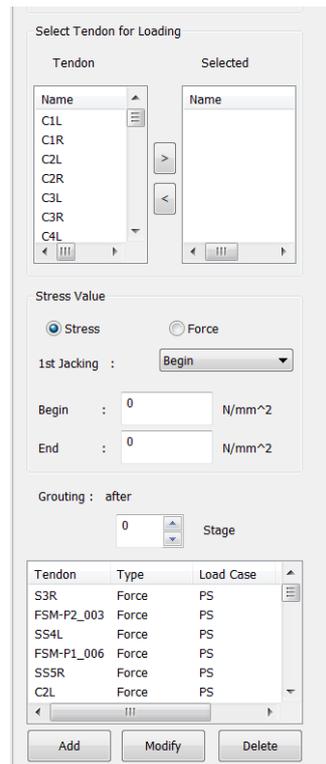


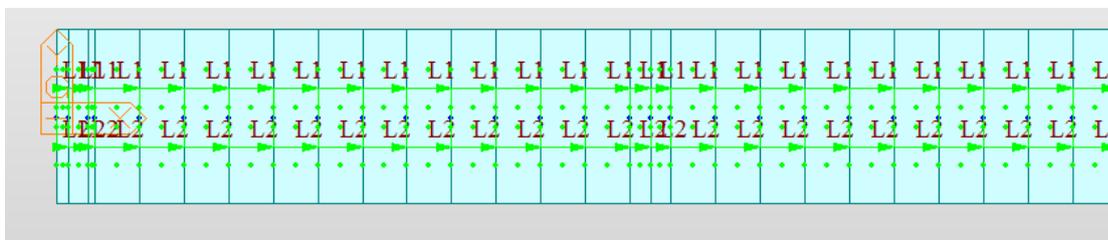
Figure 4.20. Température et gradient thermique



**Figure 4.21.** Introduction de la force de précontrainte

**10<sup>ème</sup> étape :** On introduit les surcharges d'exploitation. La charge type LM1 est modélisé par le logiciel de calcul MIDAS Civil comme "charge mobile" ou «Moving Load». Pour ce faire :

1. On choisi le règlement de calcul Eurocode.
2. On défini la position des roues du tandem sur les lignes de chargement (Traffic line lanes).
3. On choisi le groupe de chargement (LM1).



**Figure 4.22.** Lignes de chargement

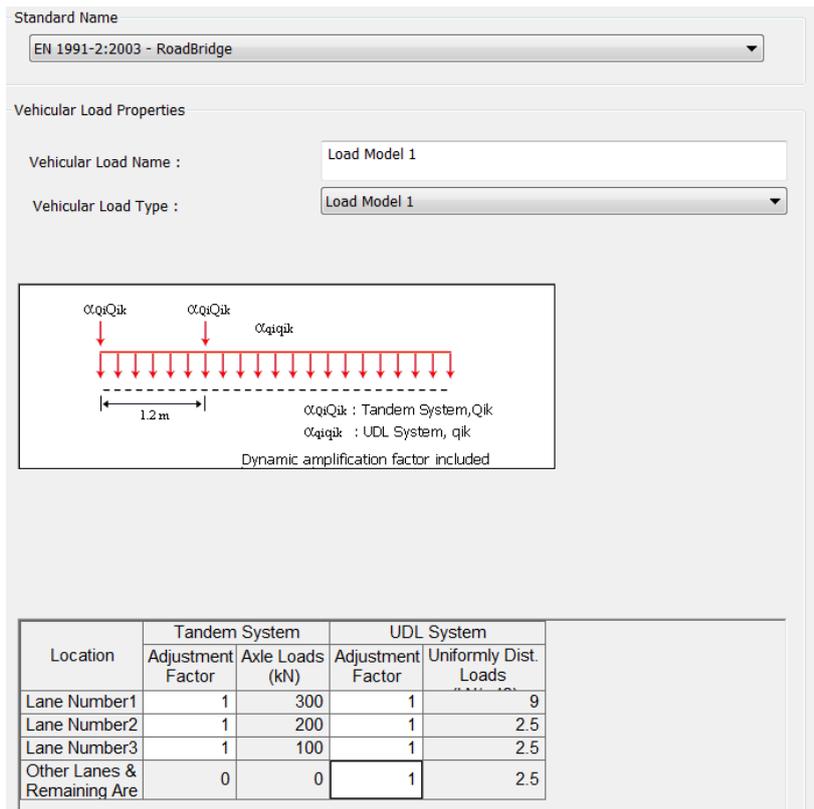


Figure 4.23. Configuration de la charge LM1

11<sup>ème</sup> étape : On introduit les phases de construction par :

1. les groupes d'éléments, conditions d'appuis et chargement.

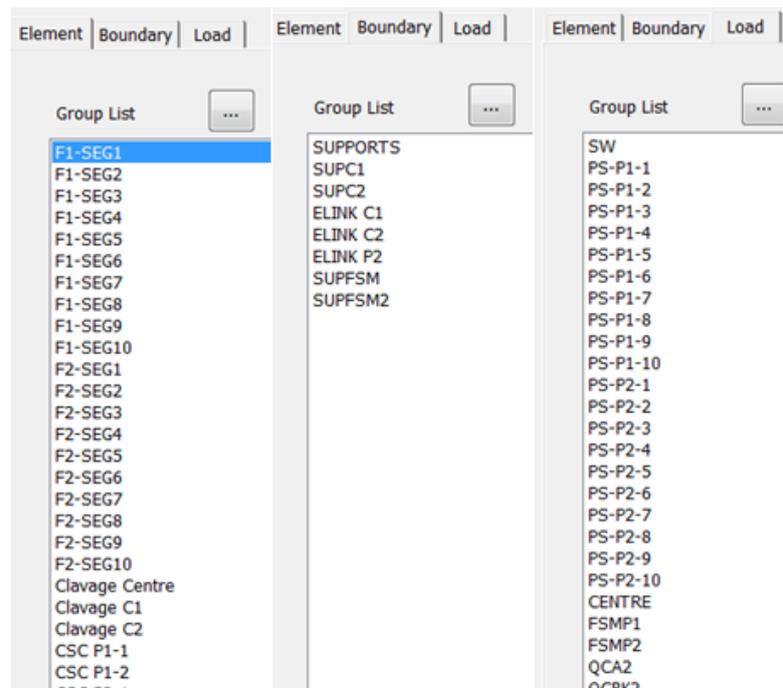


Figure 4.24. Liste des d'éléments, conditions d'appuis et chargement

2. On introduit les paramètres liés à chaque phase de construction. Le logiciel prend en compte la durée d'exécution de chaque phase ainsi que l'âge du béton.

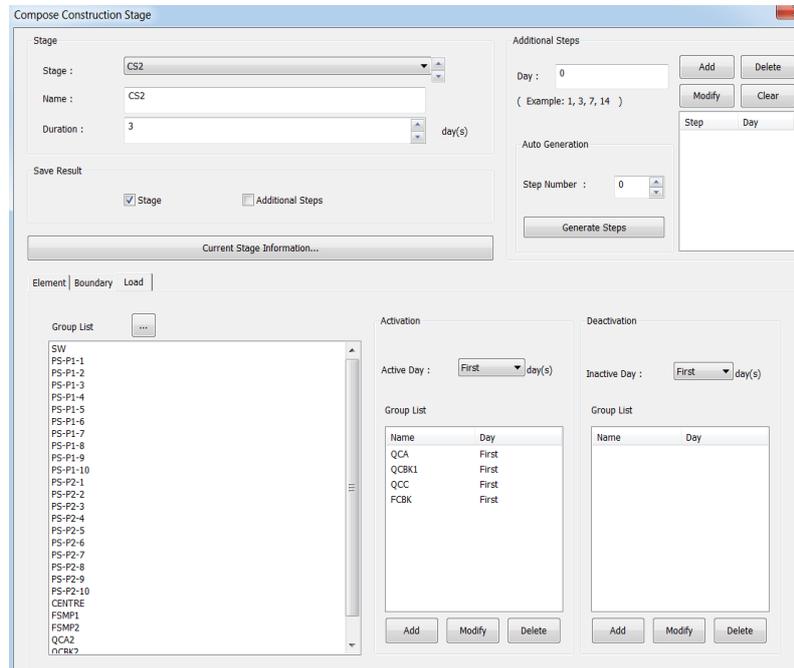


Figure 4.25. Paramètres pour les différentes phases de construction

12<sup>ème</sup> étape : On introduit les combinaisons d'actions

Load Combinations

General | Steel Design | Concrete Design | SRC Design | Composite Steel Girder Design

Load Combination List

No	Name	Active	Type	Description
1	cLCB1	Stren	Add	1.35M[1]+1.5T[1]+1.0(cD)+1.0(cPS)
2	cLCB2	Stren	Add	1.35M[1]-1.5T[1]+1.0(cD)+1.0(cPS)
3	cLCB3	Stren	Add	1.5T[1]+1.0(cD)+1.0(cPS)
4	cLCB4	Stren	Add	-1.5T[1]+1.0(cD)+1.0(cPS)
5	cLCB5	Servi	Add	Ch: 1.0M[1]+1.0T[1]+1.0(cD)+1.0(c
6	cLCB6	Servi	Envelo	Ch: 1.0M[1]-1.0T[1]+1.0(cD)+1.0(c
7	cLCB7	Servi	Add	Ch: 1.0T[1]+1.0(cD)+1.0(cPS)+1.0
8	cLCB8	Servi	Add	Ch: -1.0T[1]+1.0(cD)+1.0(cPS)+1.
9	cLCB9	Servi	Add	Fr: 0.6T[1]+1.0(cD)+1.0(cPS)+1.0(c
10	cLCB1	Servi	Add	Fr: -0.6T[1]+1.0(cD)+1.0(cPS)+1.0
11	cLCB1	Servi	Add	QP: 0.5T[1]+1.0(cD)+1.0(cPS)+1.0
12	cLCB1	Servi	Add	QP: -0.5T[1]+1.0(cD)+1.0(cPS)+1.
13	cLCB1	Servi	Add	QP: 1.0(cD)+1.0(cPS)+1.0(cTP)
*				

Figure 4.26. Combinaisons d'actions

#### 4.4. Comparaison entre les résultats et les contraintes de l'étude préliminaire et Midas civil

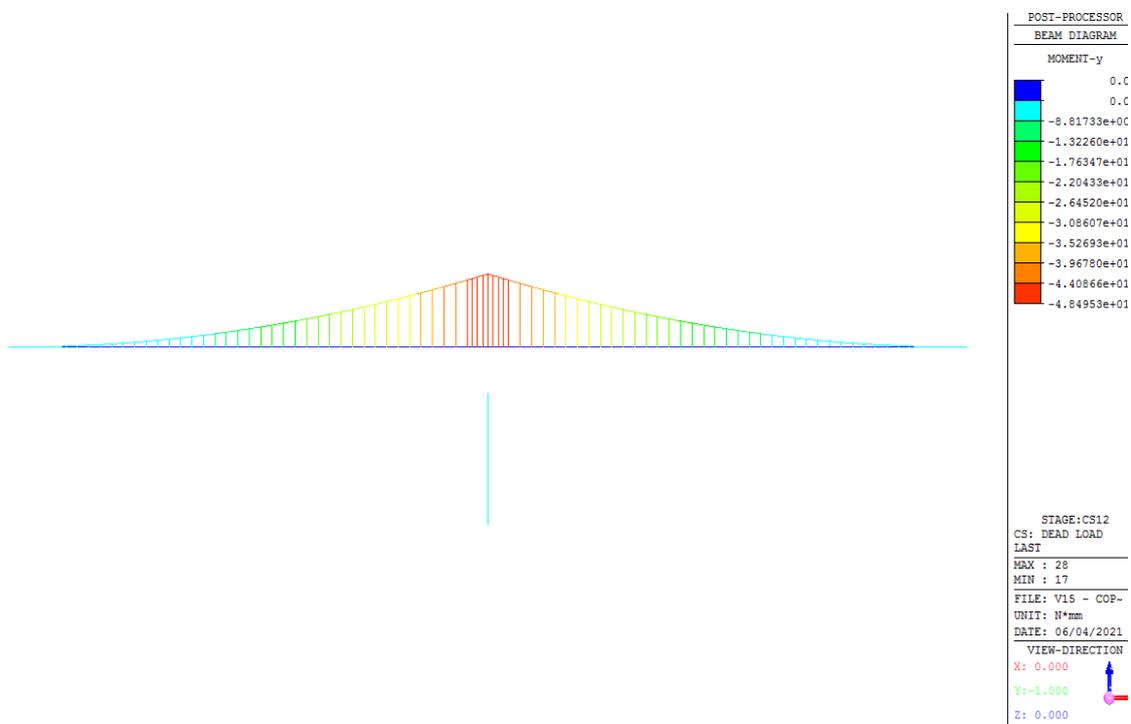
**Tableau 4.1.** Comparaison entre les moments sur pile de l'étude préliminaire et ceux de Midas Civil

Phase	Action	Moment sur pile	
		Etude préliminaire	MIDAS
Fléau	Poids propre + précontrainte		
Clavage C1-P1	Poids propre + précontrainte	51.27 MN.m	59.8 MN.m
Clavage P1-P2	Poids propre	3.85 MN.m	4.12 MN.m
Clavage P1-P2	Gradient thermique	13.245 MN.m	10.2 MN.m
Clavage P1-P2	Toutes les charges	26.259 MN.m	30.259 MN.m

La comparaison des résultats issus des deux analyses montrent que la méthode proposée par le SETRA, malgré le fait qu'elle ne tient pas compte de tous les paramètres, donne des résultats très proches de ceux obtenus par le logiciel. La méthode adoptée pour l'analyse préliminaire constitue une bonne base de départ pour le dimensionnement des tabliers de ponts à poutres caissons en béton précontraint.

#### 4.5. Diagrammes des sollicitations à la fin de la construction du fléau P1

##### 4.5.1. Diagrammes des sollicitations sous l'effet du poids propre



**Figure 4.27.** Diagramme des moments

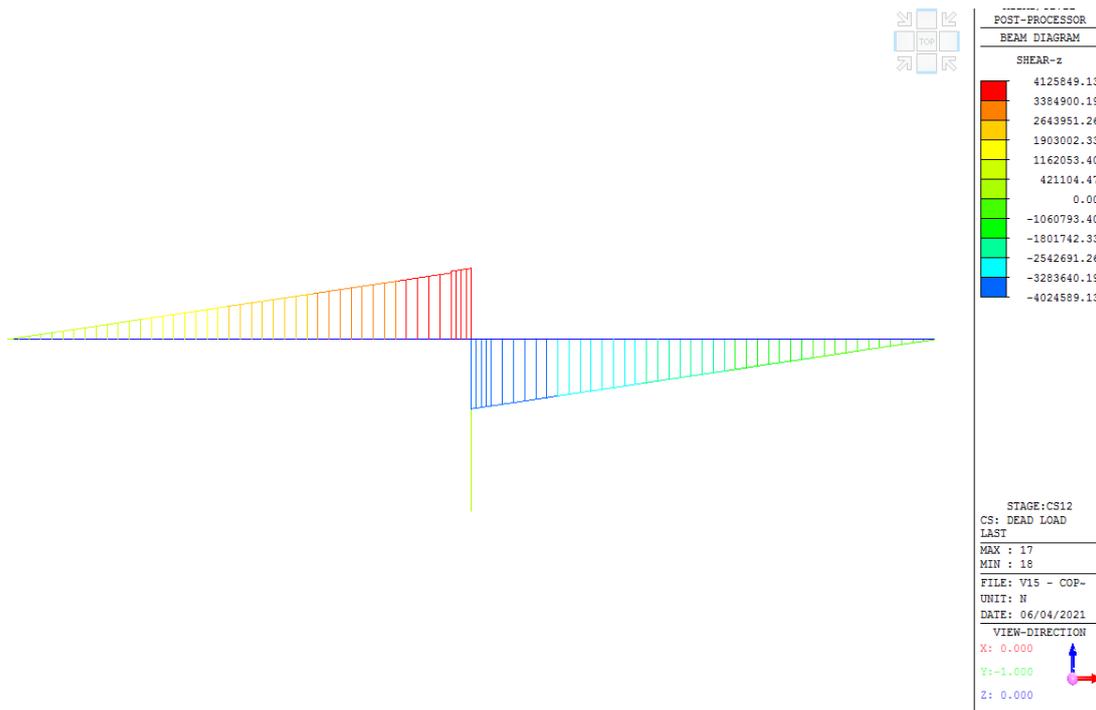


Figure 4.28. Diagramme des efforts tranchants

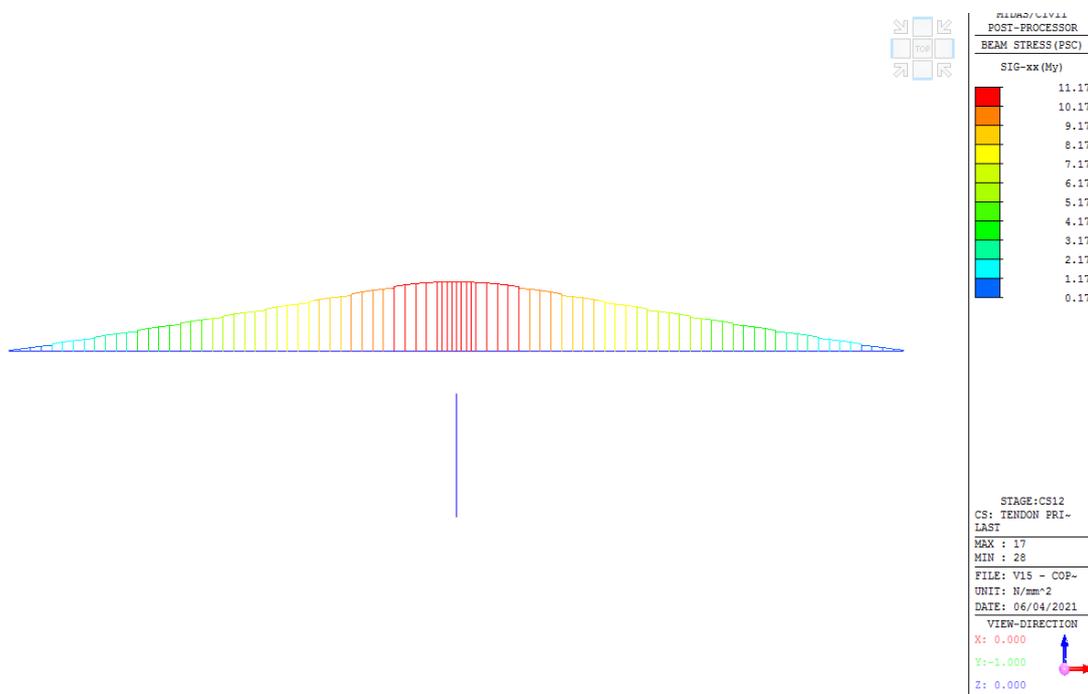


Figure 4.29. Diagramme des contraintes normales de traction sur la fibre supérieure

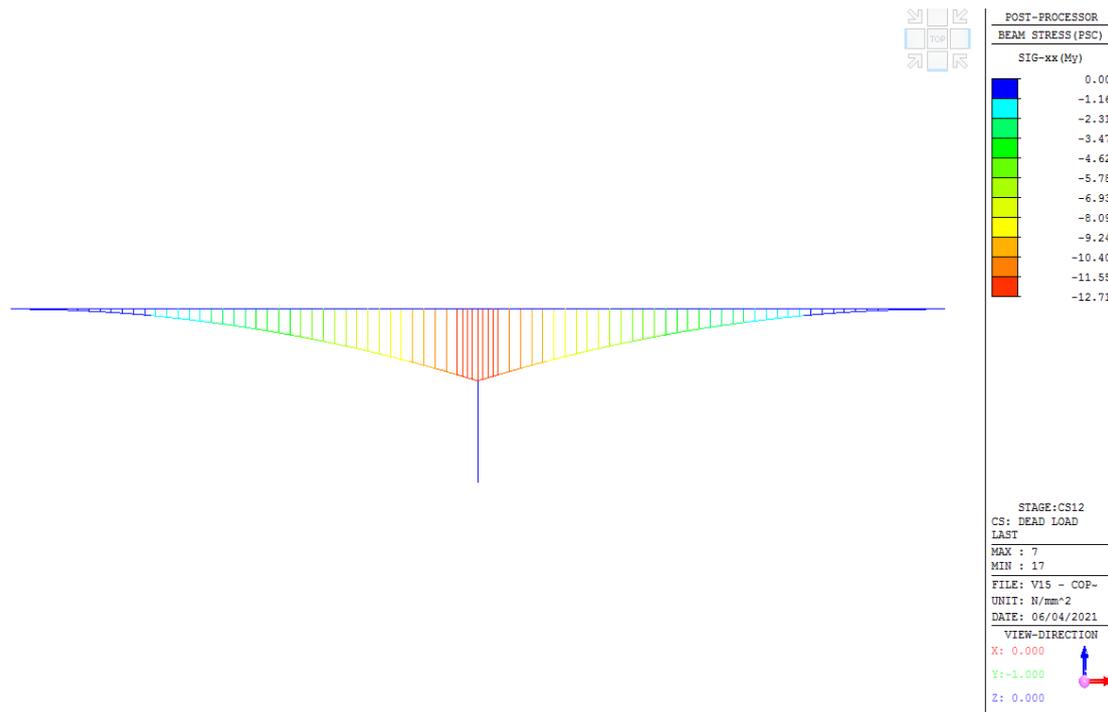


Figure 4.30. Diagramme des contraintes normales de compression sur la fibre inférieure

#### 4.5.2. Diagrammes des sollicitations dus aux effets de la précontrainte

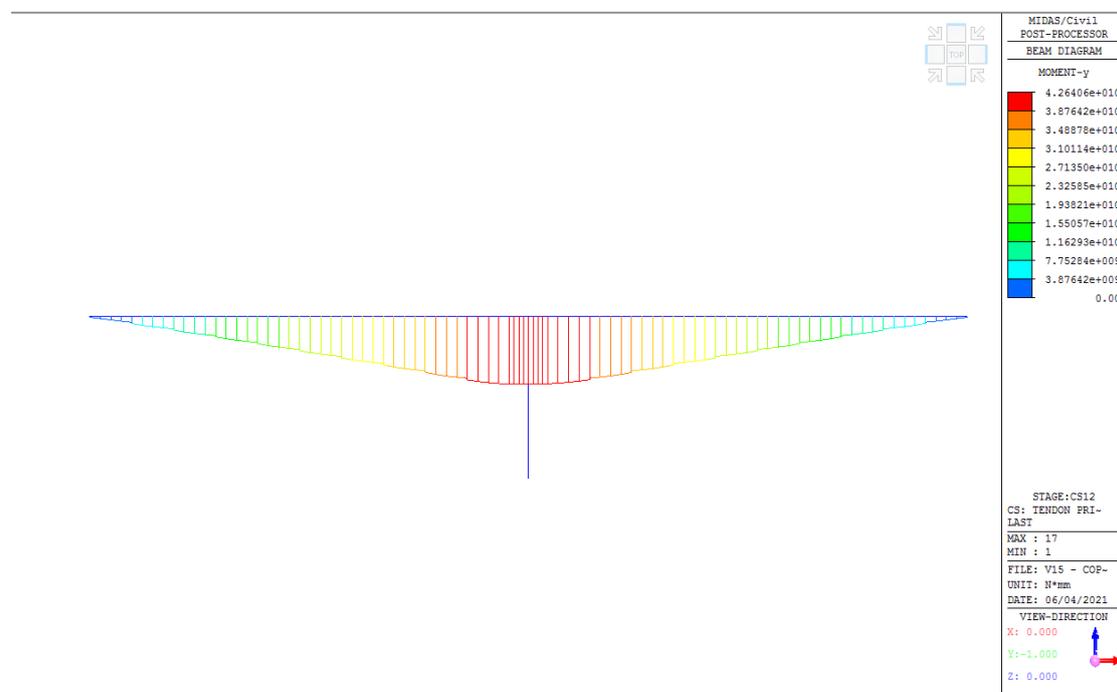


Figure 4.31. Diagramme des moments fléchissants

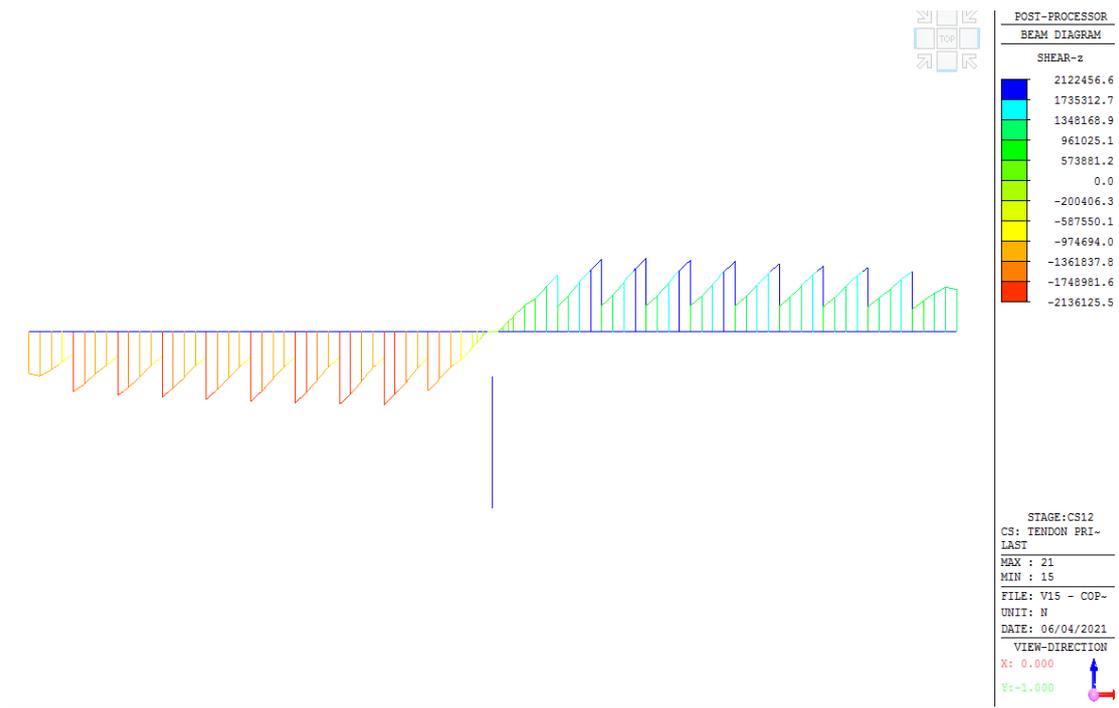


Figure 4.32. Diagramme des efforts tranchants

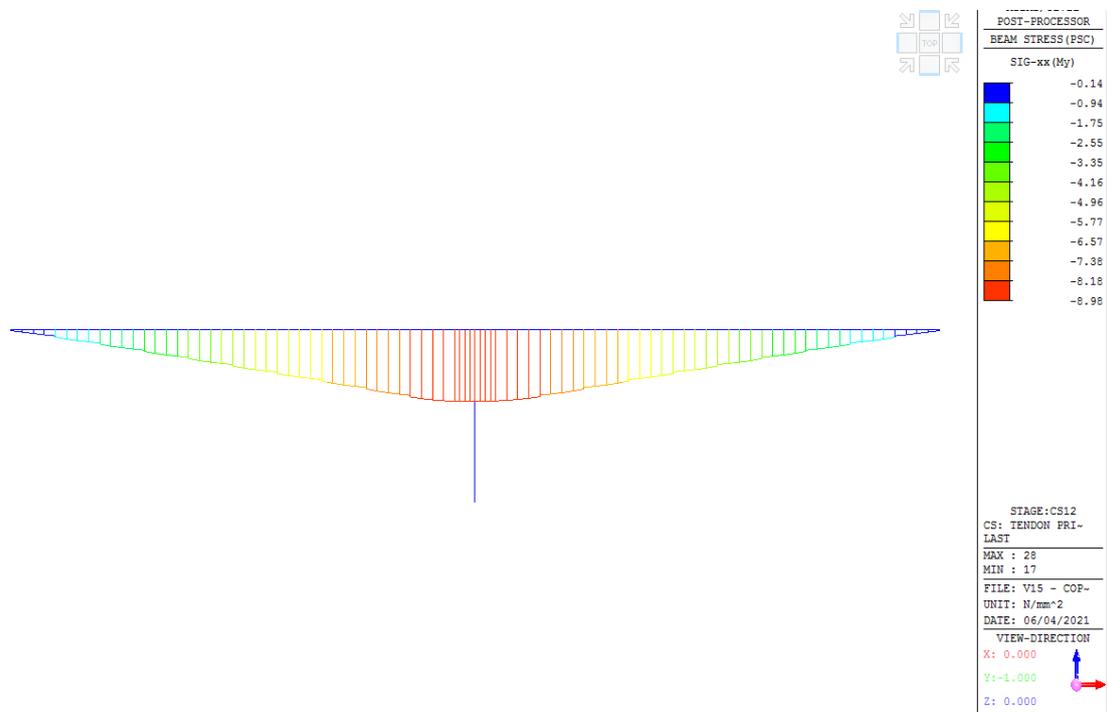
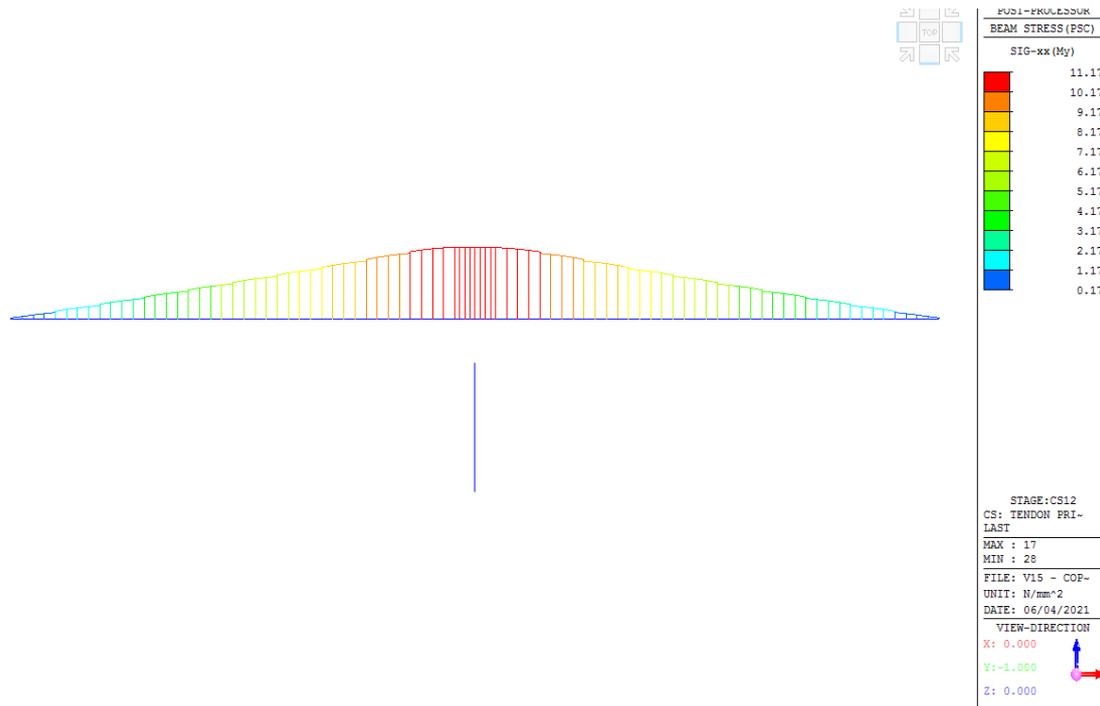
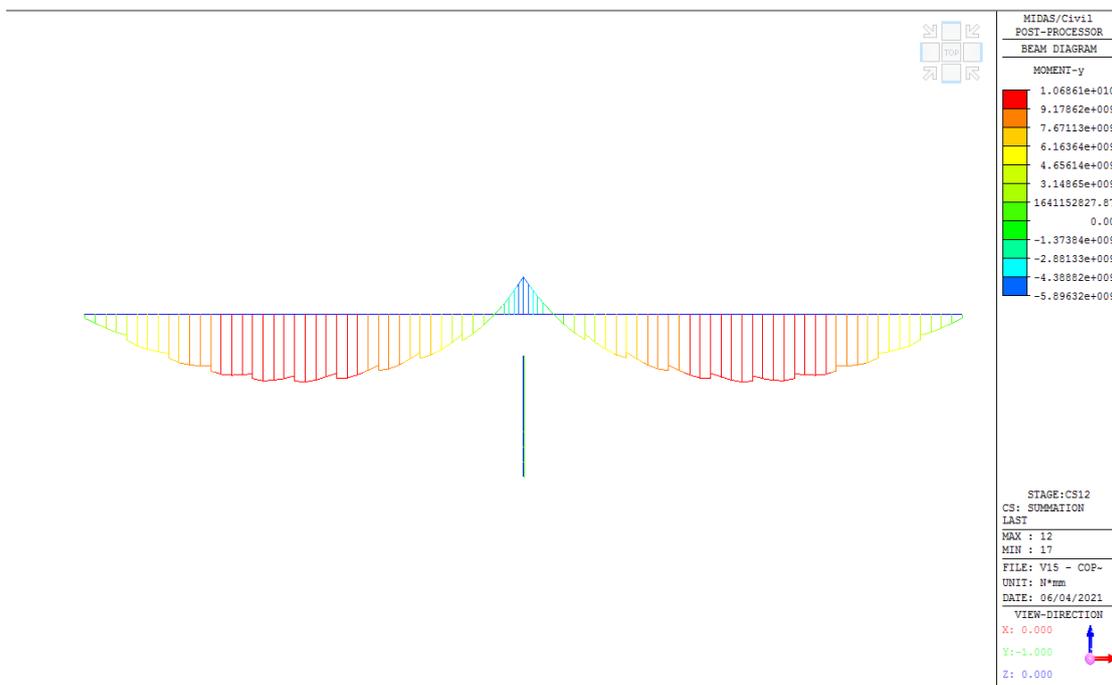


Figure 4.33. Diagramme des contraintes normales sur la fibre supérieure du fléau P1



### 4.5.3. Diagramme des moments dus à l'ensemble des charges à la fin de la phase de la construction du fléau P1



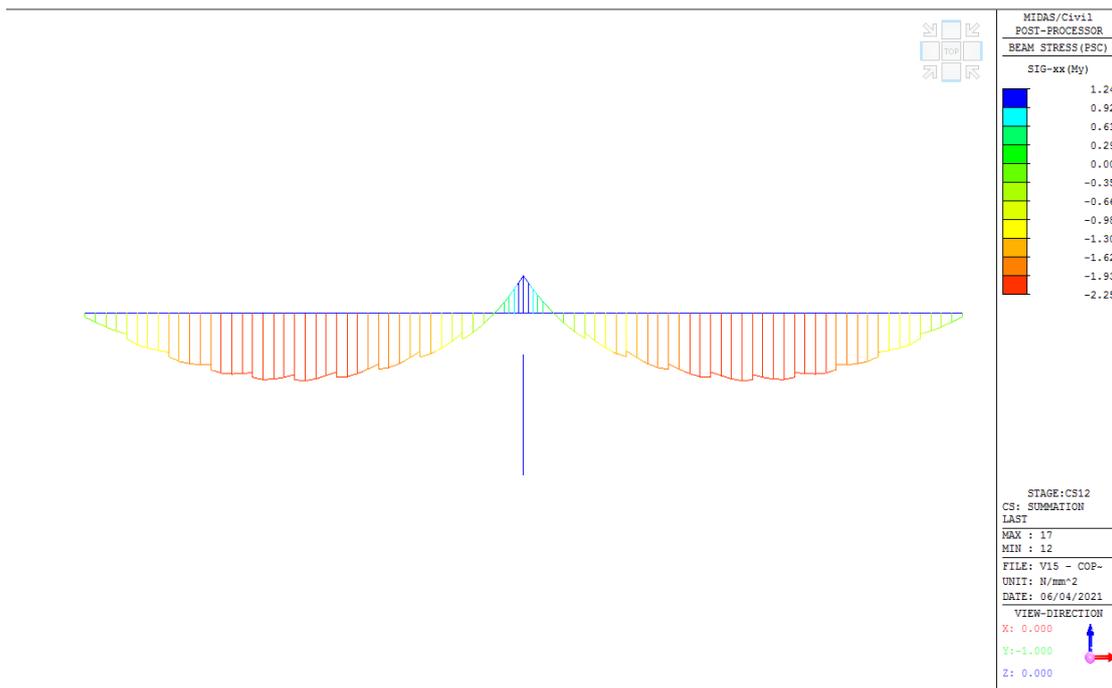


Figure 4.36. Diagramme des contraintes sur la fibre supérieure

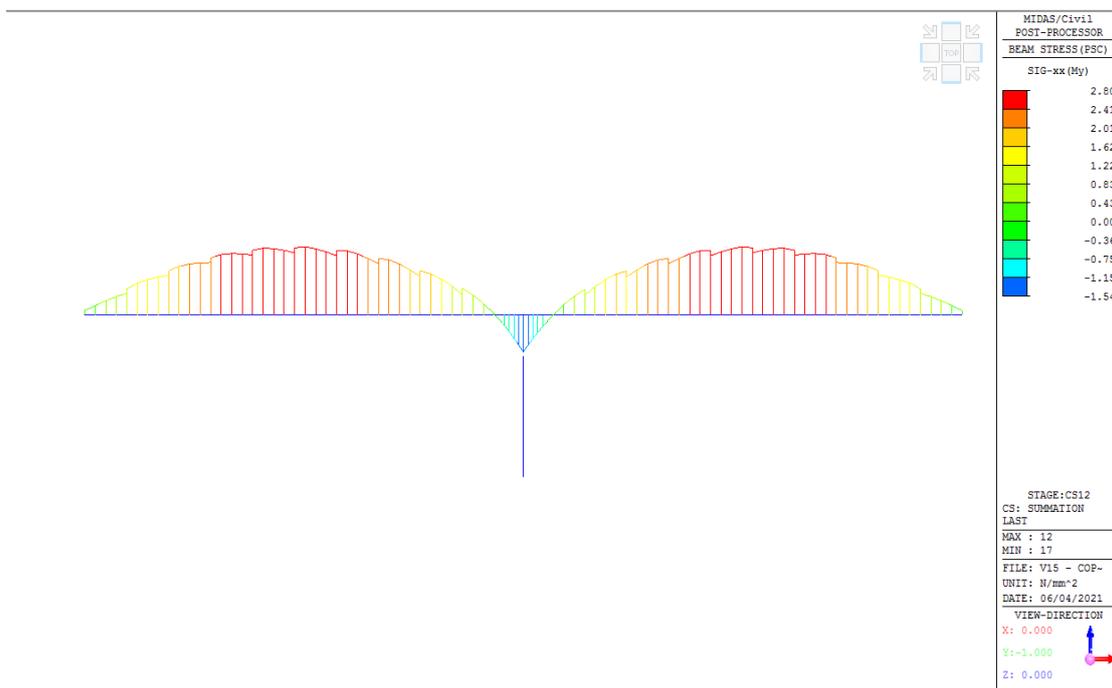


Figure 4.37. Diagramme des contraintes sur la fibre inférieure

#### 4.6. Diagramme des sollicitations après clavage ente P1 et C1 dues à l'ensemble des charges à la fin de la phase de construction

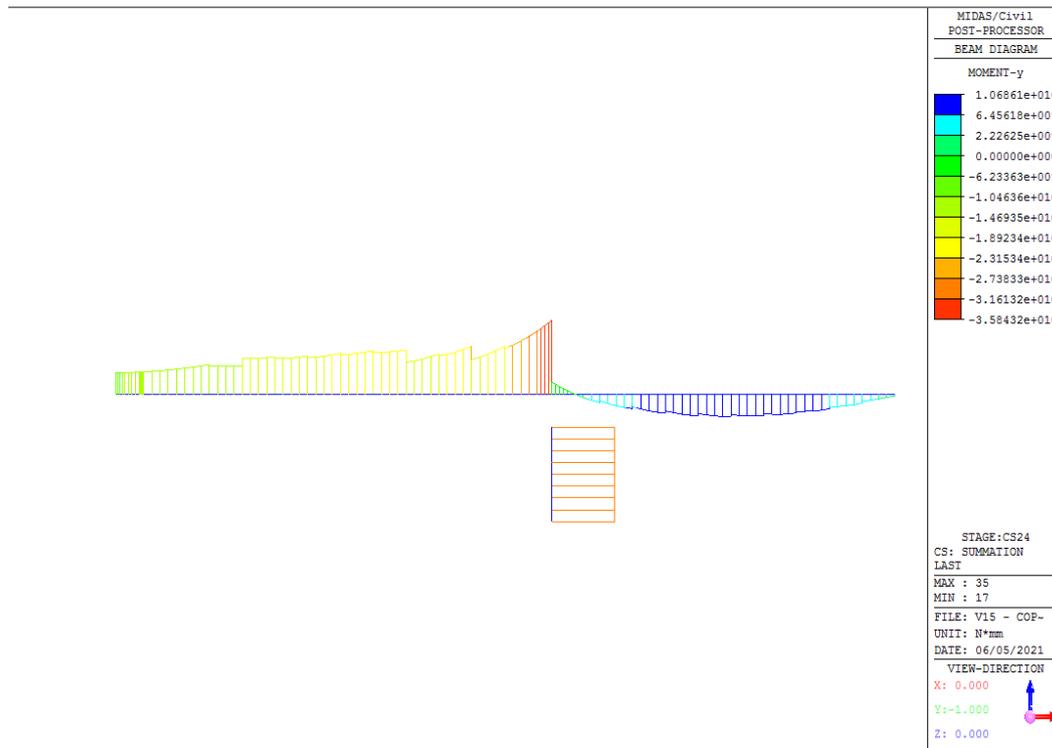


Figure 4.38. Diagramme des moments fléchissants

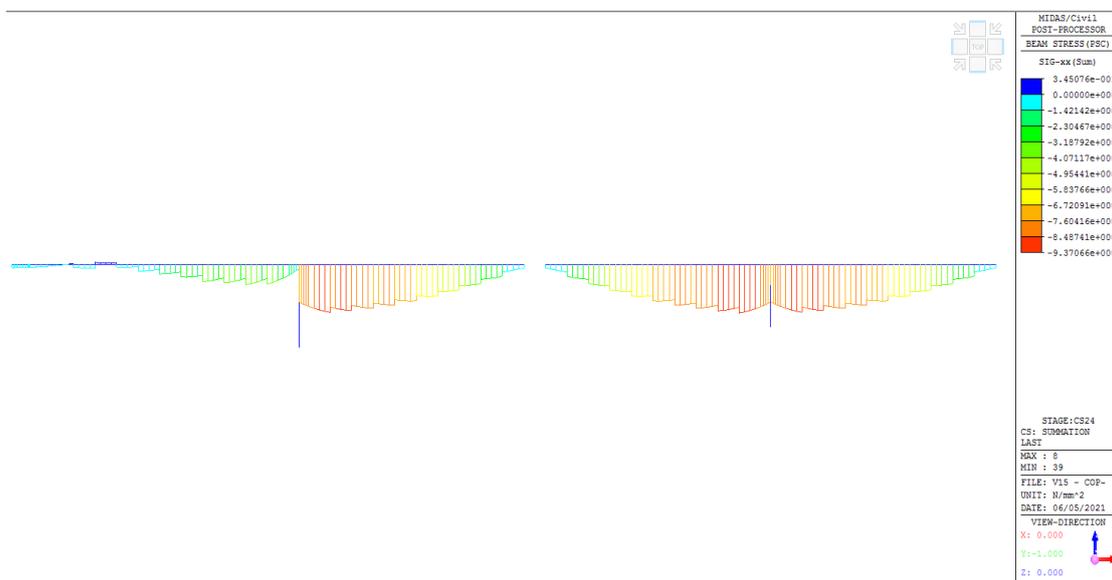


Figure 4.39. Diagramme des contraintes sur la fibre supérieure

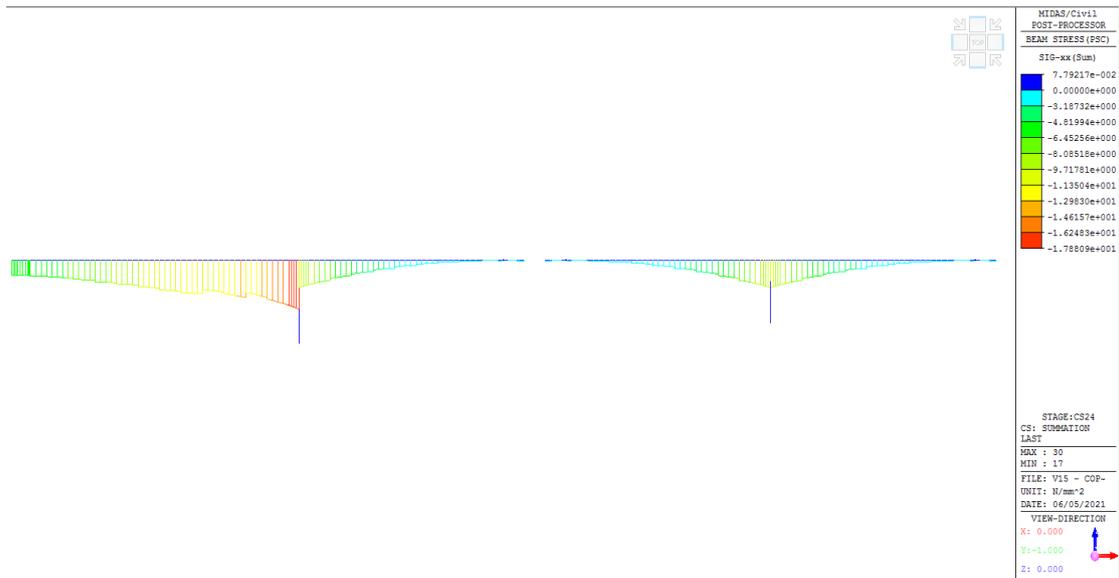


Figure 4.40. Diagramme des contraintes sur la fibre inférieure

#### 4.7. Diagramme des sollicitations après clavage ente P1 et P2

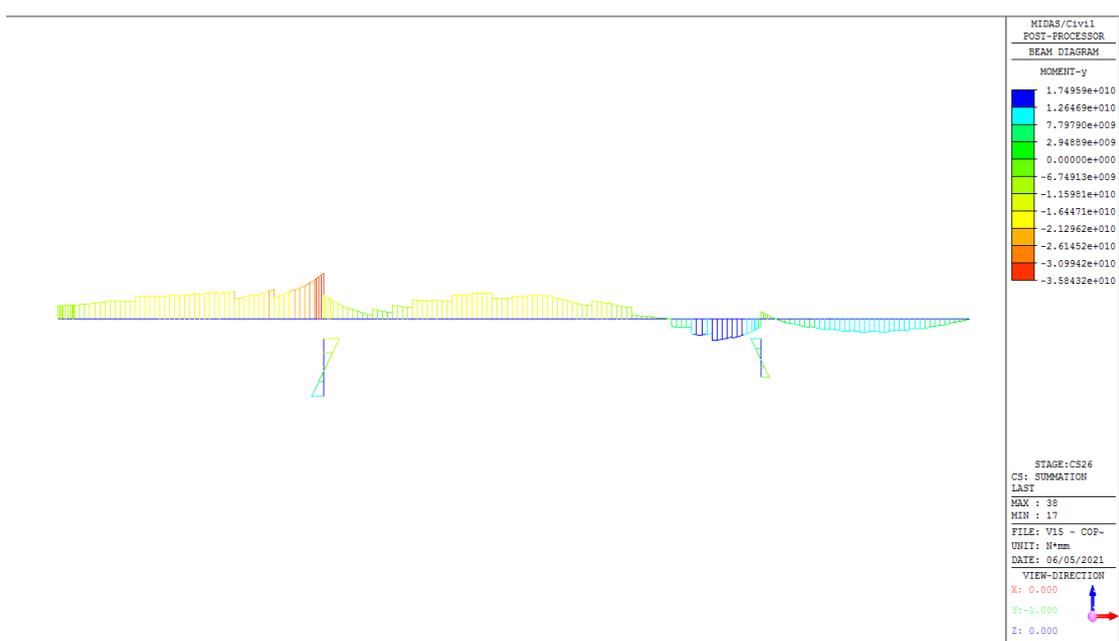
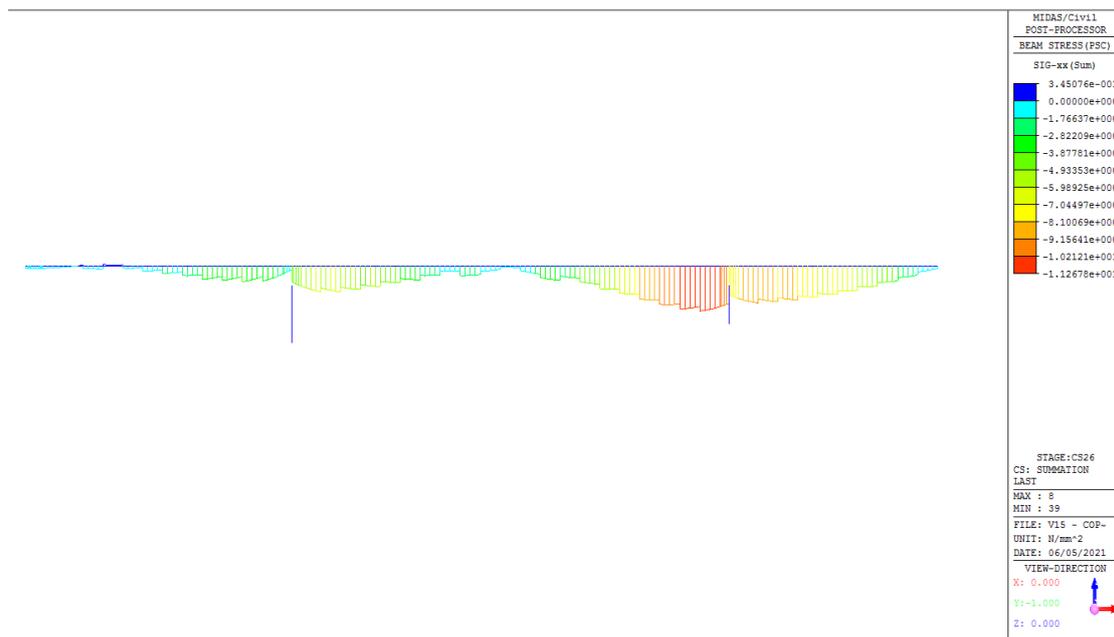
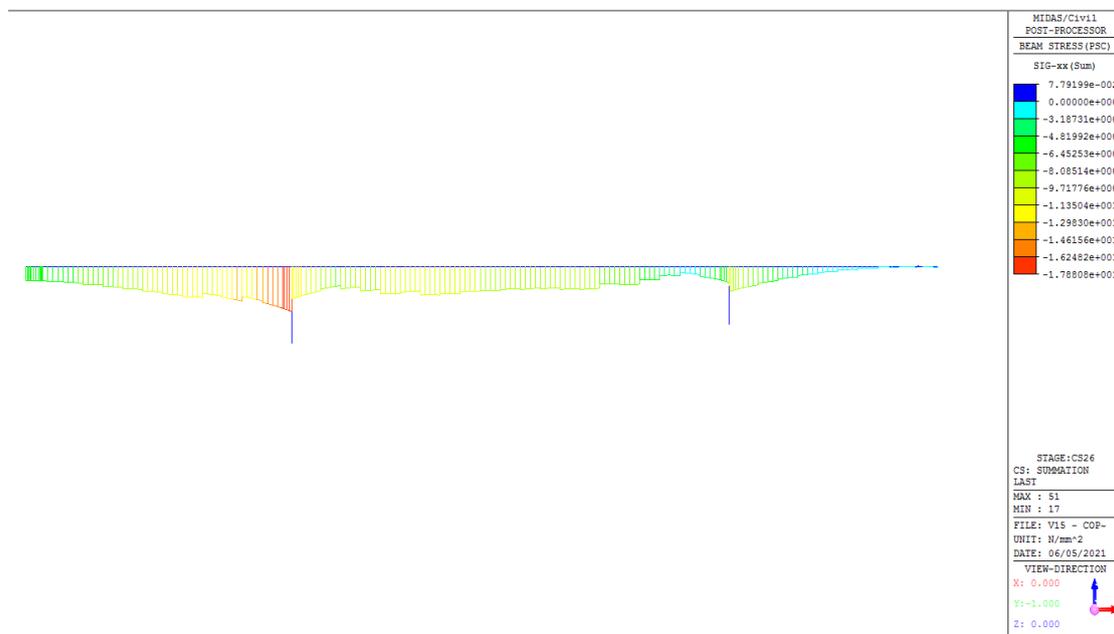


Figure 4.41. Diagramme des contraintes sur la fibre supérieure dues à l'ensemble des charges



**Figure 4.42.** Diagramme des contraintes sur la fibre inférieure dues à l'ensemble des charges après clavage entre P1 et C1



**Figure 4.43.** Diagramme somme des contraintes après clavage à la fibre inférieure

#### 4.8. Diagramme des sollicitations après clavage ente P2 et C27

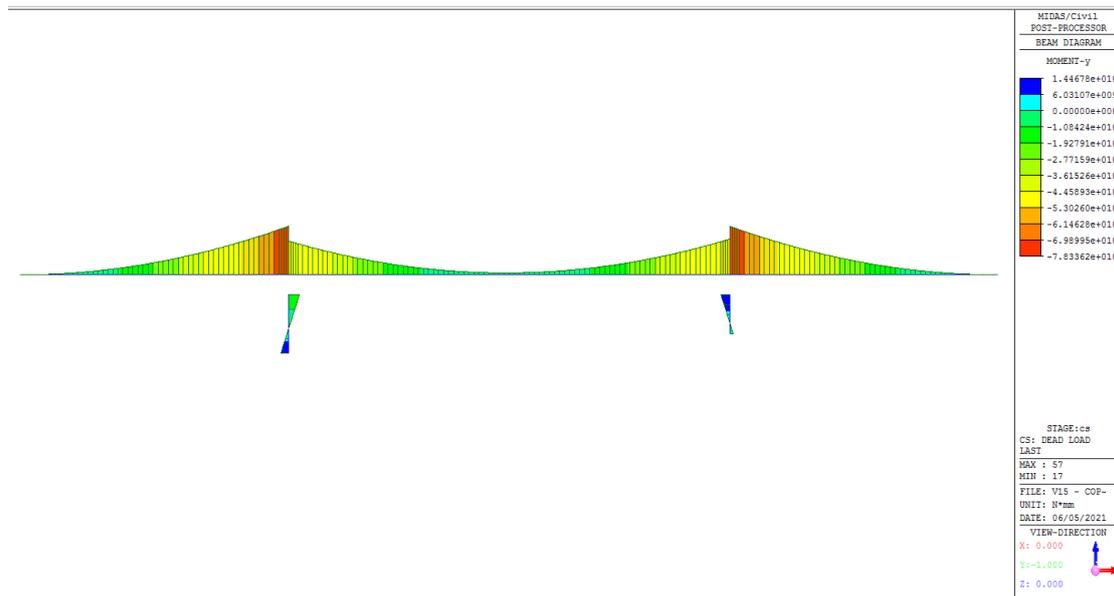


Figure 4.44. Diagramme des moments fléchissants dus au poids propre

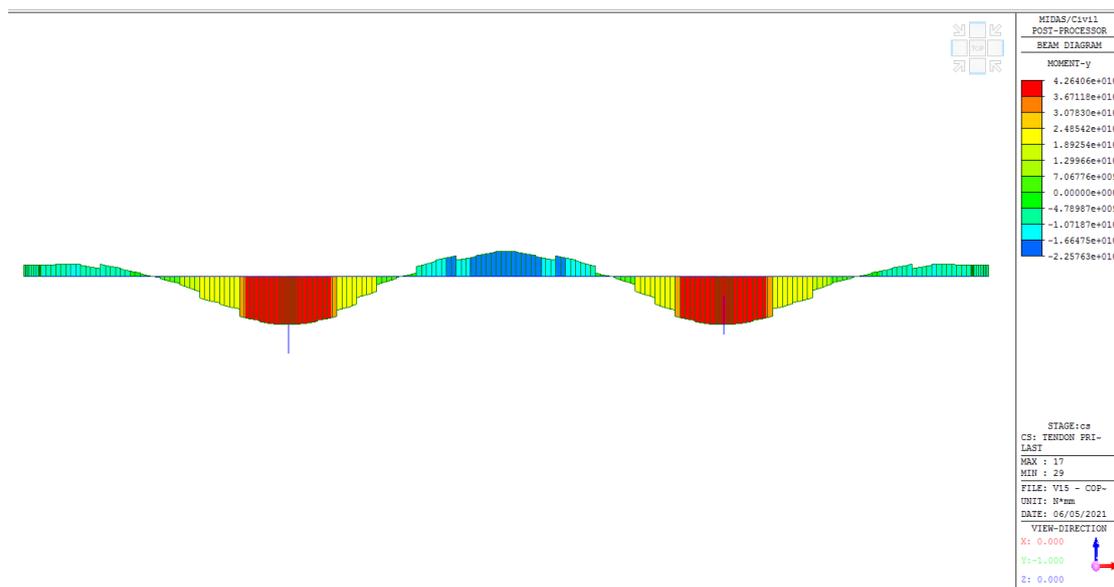
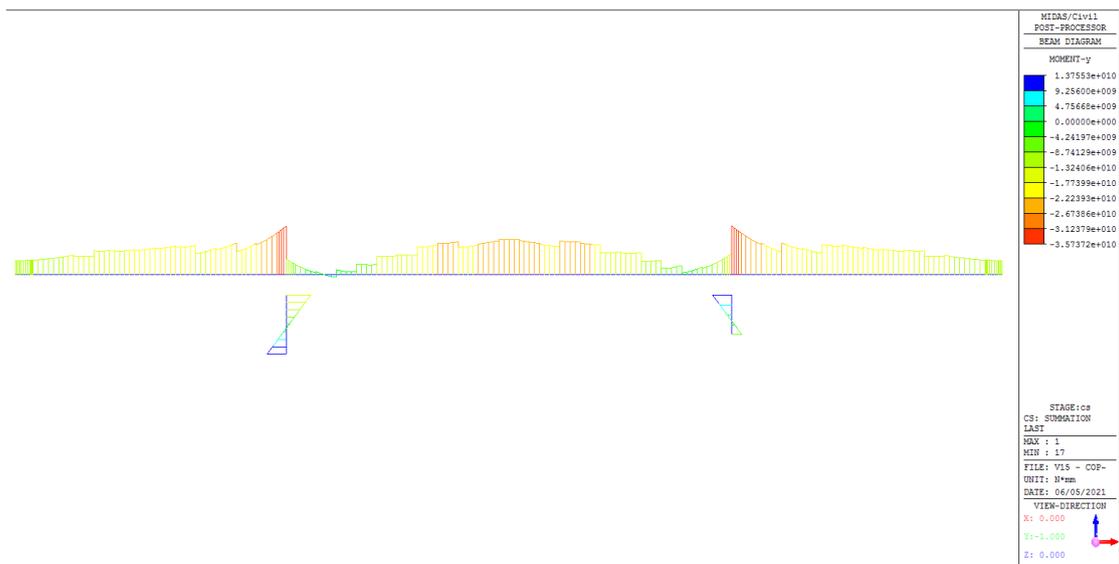
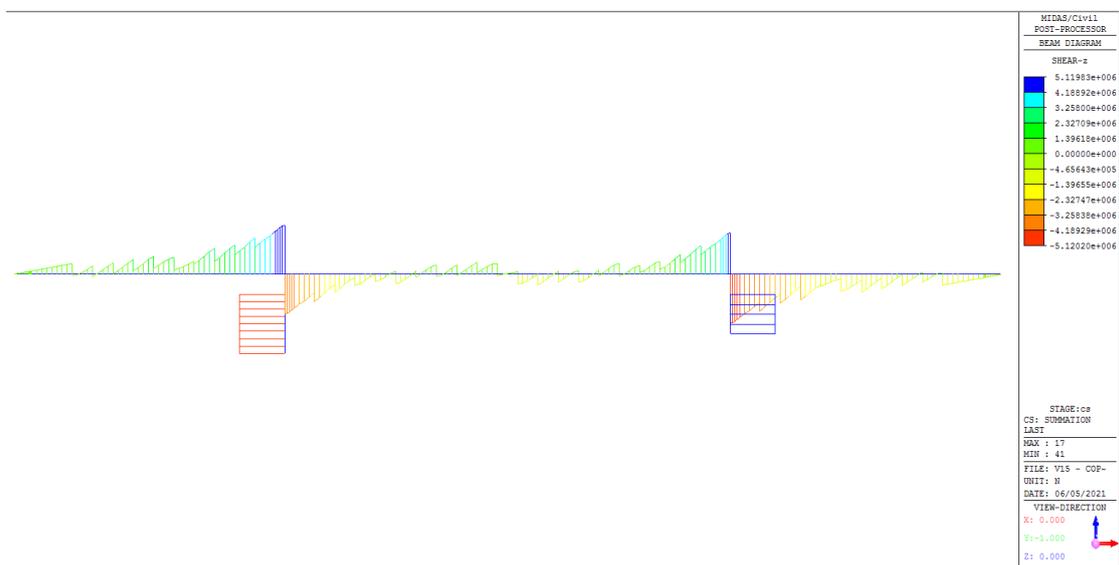


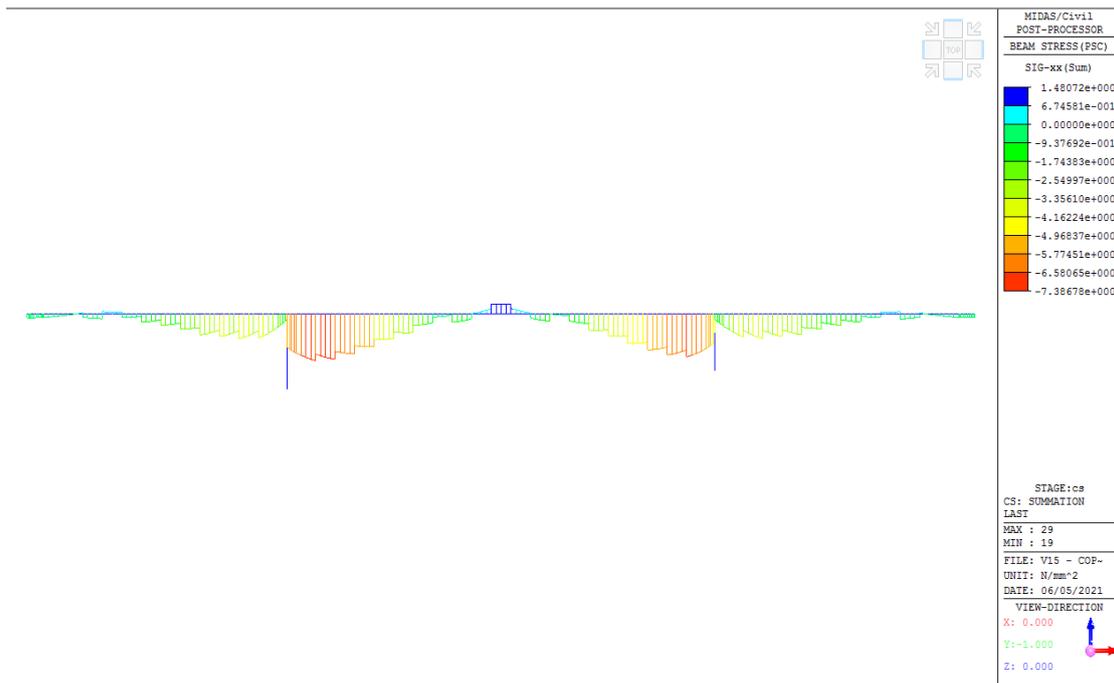
Figure 4.45. Diagramme des moments fléchissants dus aux effets des câbles de précontrainte



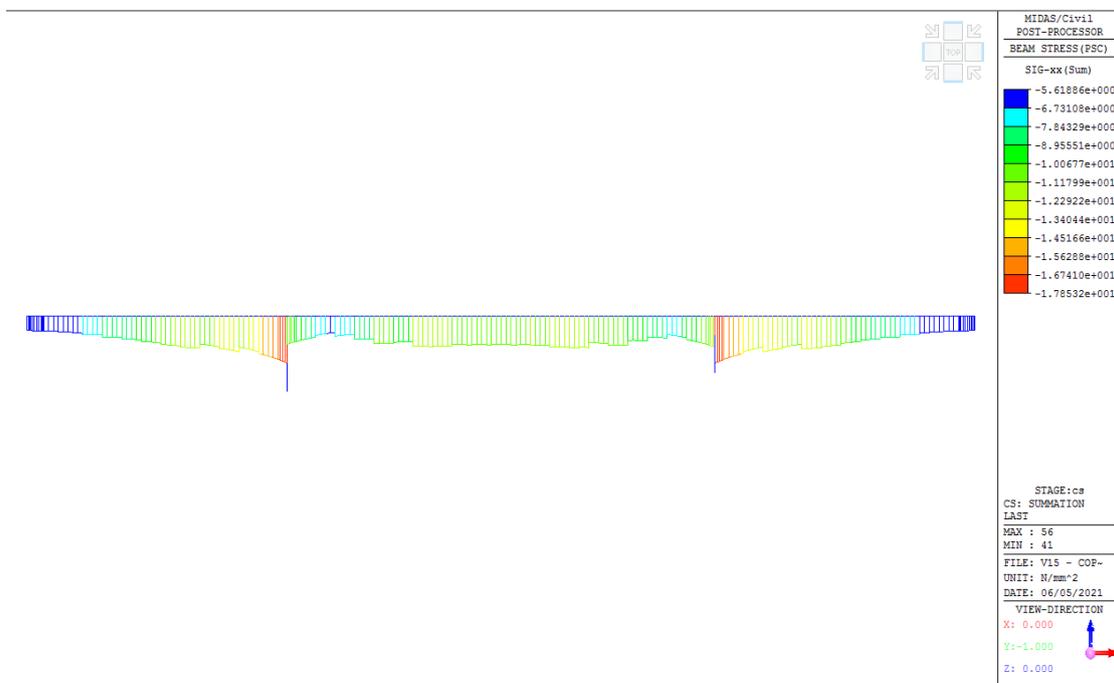
**Figure 4.46.** Diagramme des moments fléchissants dus à l'ensemble des charges après clavage P2-C2



**Figure 4.47.** Diagramme des efforts tranchants dus à l'ensemble des charges après clavage P2-C2



**Figure 4.48.** Diagramme des contraintes sur la fibre supérieure dues à l'ensemble des charges



**Figure 4.49.** Diagramme des contraintes sur la fibre inférieure dues à l'ensemble des charges

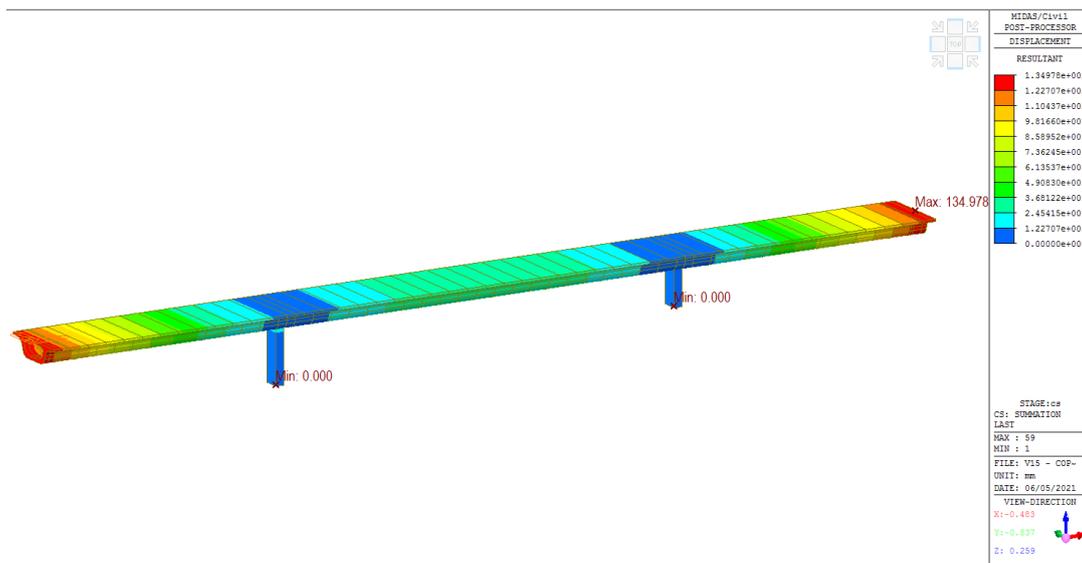


Figure 4.50. Déplacements verticaux du tablier

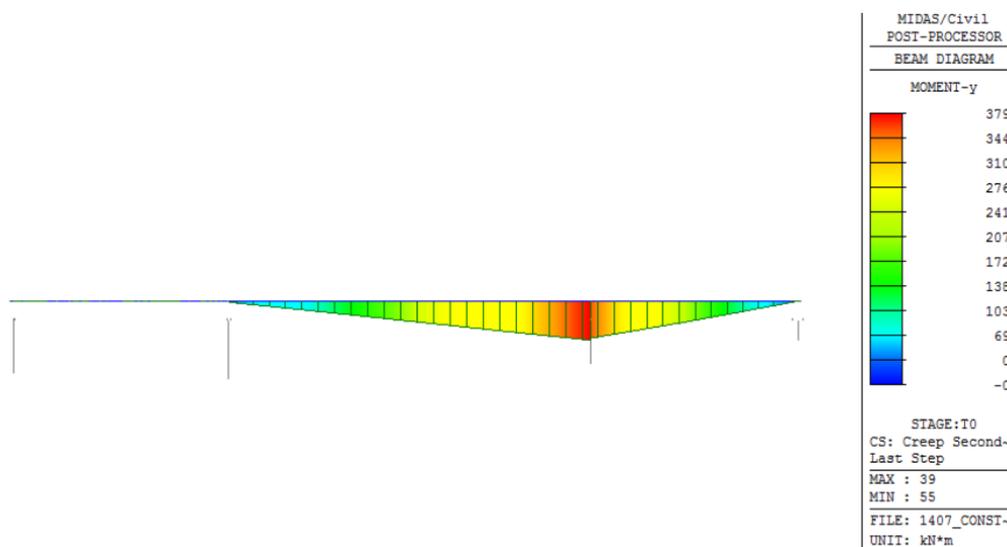
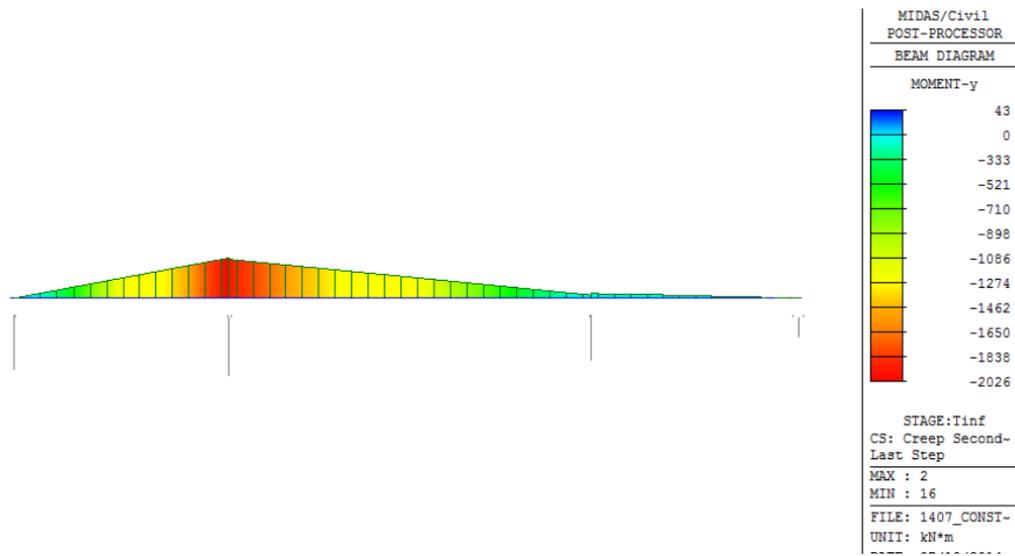
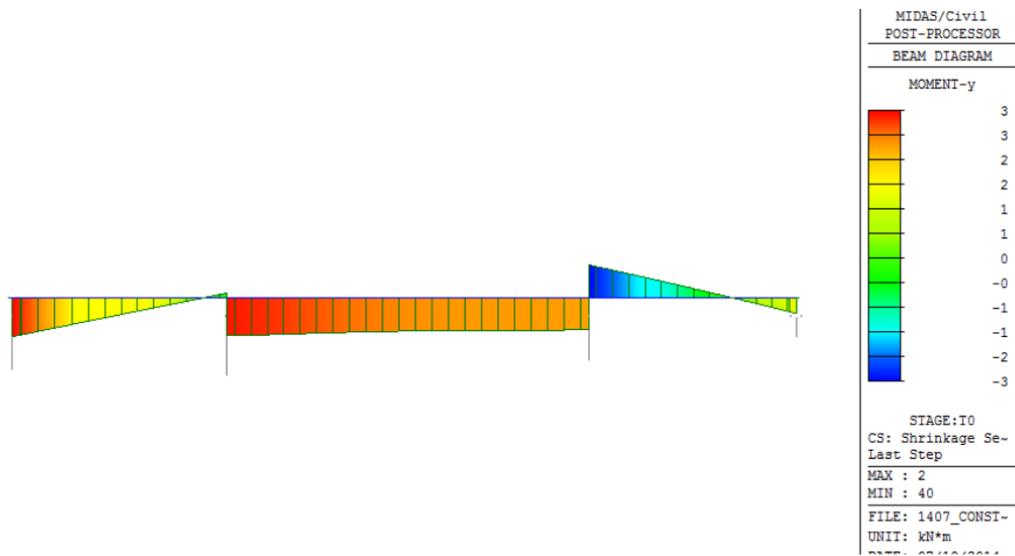


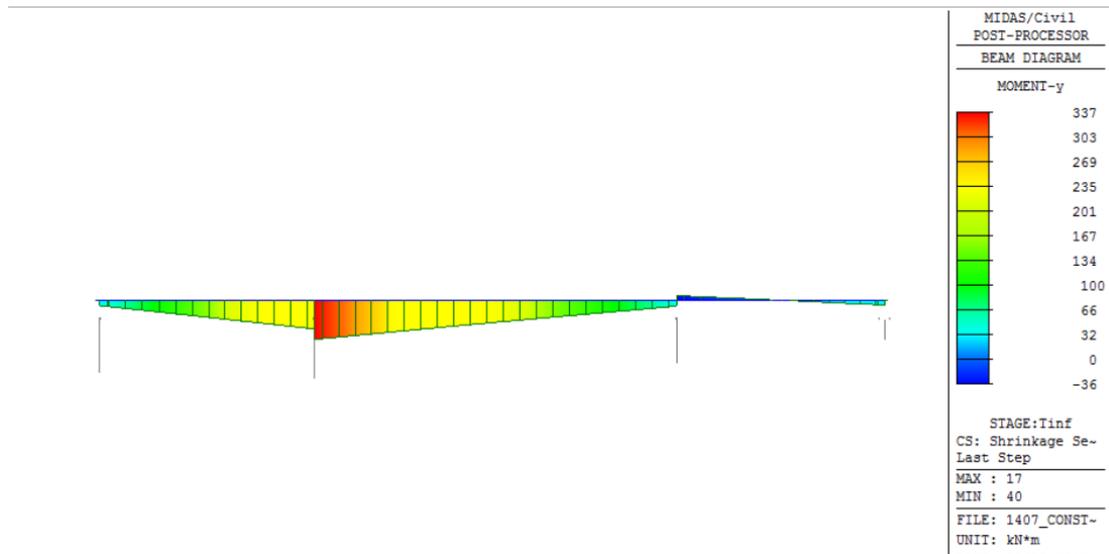
Figure 4.51. Diagramme des moments fléchissants dus aux effets du fluage en phase de construction



**Figure 4.52.** Diagramme des moments fléchissants dus aux effets du fluage à un temps infini (T=10000jours)



**Figure 4.53.** . Diagramme des moments fléchissants dus aux effets du retrait en phase de construction



**Figure 4.54.** Diagramme des moments fléchissants dus aux effets du retrait au temps  $t = 10000$  jours

#### 4.9. Justification du tablier

Les diagrammes représentés ci-dessous vont servir aux vérifications des états limites ultimes et de service du caisson suivant les Eurocodes. Ces vérifications sont effectuées aux interfaces entre les voussoirs durant les différentes phases de construction et après la mise en service du pont automatiquement par le logiciel. Ceci permet un gain de temps considérable pour les concepteurs de ponts. Les résultats de ces calculs sont présentés sous forme de tableaux dans les annexes A-I et montrent que le tablier de pont est bien dimensionné vis-à-vis les états limites ultimes et de service durant les différentes phases de construction et durant toute la durée de mise en service du pont.

## Conclusion Générale

Lors de cette étude même limitée nous avons pu nous rendre compte de la complexité du calcul de tels types de ponts car en plus de la nécessité d'avoir des connaissances approfondies dans plusieurs domaines de l'analyse des structures, il est indispensable d'avoir toutes les données concernant la construction de l'ouvrage. Il est par exemple nécessaire de connaître le poids des outils utilisés et notamment le calendrier de l'avancement des travaux qui a une influence sur les caractéristiques mécaniques du béton, la force de précontrainte dans les câbles et les schémas statiques utilisés pour chaque phase de construction. Ces données sont difficiles à recueillir car il peut y arriver que les plannings d'avancement des travaux ne puissent pas être respectés. Dans notre cas la direction des travaux publics de Constantine nous a fourni des informations très utiles concernant le phasage des travaux sans en avoir la durée de chacune d'elle. La recherche bibliographique que nous avons effectué nous a permis de proposer un calendrier d'avancement des travaux qui est certainement un peu différent de celui du projet réel.

Cette étude nous a aussi permis de prendre connaissance des nouveaux concepts introduits par les Eurocodes concernant la justification des structures en béton par rapports aux règlements du BAEL 91 et BPEL 91 qui sont toujours en vigueur en Algérie. La limitation de la fissuration et la détermination des enrobages en fonction des données environnementales relatives au site du projet sont parmi les nouveautés majeures apportées par les Eurocodes.

Pour de tels projets, l'utilisation d'un logiciel est nécessaire que ce soit pour la détermination des sollicitations, des contraintes ou pour les justifications qui doivent être effectuées dans plusieurs sections pour les différentes phases de construction. Dans cette étude nous avons utilisé le logiciel MIDAS, qui malgré le temps considérable qui nous a été nécessaire pour le maîtriser, nous a permis d'effectuer toutes les justifications requises par l'EC2 et vérifier que le câblage longitudinal évalué par une étude préliminaire est bien dimensionnée.

Par manque de temps, d'autres calculs concernant les ponts caissons en béton précontraint n'ont pas pu être réalisés et que nous recommandons pour des travaux de mémoires futurs et notamment :

- l'analyse transversale du tablier qui sert à déterminer la section des armatures passives ;
- justification de la diffusion de la précontrainte ;
- dimensionnement des clefs multiples assurant la transmission de l'effort tranchant dans les ouvrages préfabriqués ;
- dimensionnement des bossages et des entretoises etc.

## REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

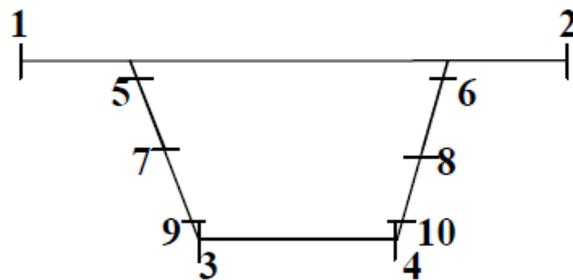
[1]	EN 1990/A1 : Eurocode : Bases de calcul des structures – Application pour les ponts, Décembre 2005.
[2]	EN 1991-2 : Eurocode 1 : Actions sur les structures - Partie 2 : actions sur les ponts, dues au trafic, Septembre 2003.
[3]	EN 1991-1-5 : Eurocode 1 : Actions sur les structures - Partie 1-5 : actions générales – Actions thermiques, Novembre 2003.
[4]	EN 1991-1-6 : Eurocode 1 : Actions sur les structures - Partie 1-6 : actions générales - Actions en cours d'exécution, Juin 2005.
[5]	EN 1992-1-1 : Eurocode 2, Calcul des structures en béton. Partie 1-1, Règles générales et règles pour les bâtiments. Octobre 2005.
[6]	EN 1992-2: Eurocode 2, Calcul des structures en béton. Partie 2, Ponts en béton, Calcul des dispositions constructives. Mai 2006
[7]	Gilles LACOSTE, Aude PETEL, Jean-Michel LACOMBE" Projet de pont partie 1/3 Etude préliminaire" Ecole Spéciale des Travaux Publics, Août (2012) .
[8]	Gilles LACOSTE, Aude PETEL, Mohamed CHAABOUNI "Projet de pont partie 2/3 POA pont en encorbellement " Ecole Spéciale des Travaux Publics, Août (2015) .
[9]	Béton précontraint aux Eurocodes – Auteur : Patrick Le Delliou – Editeur : Pul – Collection : ENTPE
[10]	Anne BERNARD-GELY, Jean-Armand CALGARO "conception des Ponts " presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussée, (1994).
[11]	Badla walid, Calcul d'un pont-caisson en béton précontraint aux Eurocodes Rapport de PFE, université de Tebessa.
[12]	Gilles CAUSSE, Emmanuel BOUCHON, Pascal CHARLES" Béton précontrainte " support de cours de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussée, Décembre (2007).
[13]	Patrick Guiraud, Les ponts en béton précontraint construits par encorbellements successifs <a href="https://www.infociments.fr/">https://www.infociments.fr/</a>
[14]	Emmanuel Bouchon, Ponts en béton précontraint construits par encorbellements successifs, JUIN (2003).
[15]	Mathivat, J, Récents développements des ponts à voussoirs préfabriqués, Janvier (1977)

## Annexe A

### Vérification des contraintes en phase de construction

**Tableau A.1.** Liste des symboles utilisés pour la vérification des contraintes en phase de construction

LCOM Name	Combinaison d'action
ALW	Contrainte admissible
Elm	Numéro d'élément
Part	Emplacement (I-end, J end)
FB	Contrainte normale sur la fibre inférieure
Comp/Tens	Compression, Traction
FTL	Contrainte exercée au point 1 en flexion composée oblique
FBL	Contrainte exercée au point 3 en flexion composée oblique
FTR	Contrainte exercée au point 2 en flexion composée oblique
FBR	Contrainte exercée au point 4 en flexion composée oblique
FT	Contrainte sur la fibre supérieure
FB	Contrainte sur la fibre inférieure



**Figure B.1.** Différent point de vérification du caisson

Tableau A.2. Vérification des contraintes en phase de construction

Elem	Part	Comp./Tens.	Stage	CHK	FT (N/mm <sup>2</sup> )	FB (N/mm <sup>2</sup> )	FTL (N/mm <sup>2</sup> )	FBL (N/mm <sup>2</sup> )	FTR (N/mm <sup>2</sup> )	FBR (N/mm <sup>2</sup> )	FMAX (N/mm <sup>2</sup> )	ALW (N/mm <sup>2</sup> )
2	I[4]	Compression	cs32	OK	0,6987	6,0899	0,6987	5,6252	0,6987	5,6252	6,0899	21,2356
2	J[5]	Compression	cs31	OK	0,686	6,1105	0,686	5,6429	0,686	5,6429	6,1105	21,2356
3	I[5]	Compression	CS24	OK	0,686	6,1105	0,686	5,6429	0,686	5,6429	6,1105	21,2356
3	J[6]	Compression	CS24	OK	0,6333	6,191	0,6333	5,7119	0,6333	5,7119	6,191	21,2356
4	I[6]	Compression	cs32	OK	0,6333	6,191	0,6333	5,7119	0,6333	5,7119	6,191	21,2356
4	J[7]	Compression	cs32	OK	0,6111	6,2245	0,6111	5,7406	0,6111	5,7406	6,2245	21,2356
5	I[7]	Compression	CS24	OK	0,6111	6,2245	0,6111	5,7406	0,6111	5,7406	6,2245	21,2356
5	J[8]	Compression	CS26	OK	0,3351	6,6345	0,3351	6,0915	0,3351	6,0915	6,6345	21,2356
6	I[8]	Compression	CS26	OK	0,3351	6,6345	0,3351	6,0915	0,3351	6,0915	6,6345	21,2356
6	J[9]	Compression	CS26	OK	-0,1272	7,313	-0,1272	6,6717	-0,1272	6,6717	7,313	21,2356
7	I[9]	Compression	CS26	OK	0,6041	7,7039	0,6041	7,0919	0,6041	7,0919	7,7039	21,2356
7	J[10]	Compression	cs32	OK	0,8209	7,8832	0,8209	7,2744	0,8209	7,2744	7,8832	21,2356
8	I[10]	Compression	cs31	OK	-0,3451	8,7803	-0,3451	7,9936	-0,3451	7,9936	8,7803	21,2356
8	J[11]	Compression	CS30	OK	-0,2493	9,1048	-0,2493	8,2985	-0,2493	8,2985	9,1048	21,2356
9	I[11]	Compression	cs32	OK	0,5493	9,5313	0,5493	8,757	0,5493	8,757	9,5313	21,2356
9	J[12]	Compression	CS30	OK	0,4486	10,0586	0,4486	9,2302	0,4486	9,2302	10,0586	21,2356
10	I[12]	Compression	cs32	OK	1,2759	10,5005	1,2759	9,7053	1,2759	9,7053	10,5005	21,2356
10	J[13]	Compression	CS30	OK	0,9884	11,2537	0,9884	10,3687	0,9884	10,3687	11,2537	21,2356
11	I[13]	Compression	cs31	OK	1,8542	11,7159	1,8542	10,8657	1,8542	10,8657	11,7159	21,2356
11	J[14]	Compression	cs31	OK	1,5082	12,391	1,5082	11,4529	1,5082	11,4529	12,391	21,2356
12	I[14]	Compression	cs32	OK	2,4063	12,8736	2,4063	11,9713	2,4063	11,9713	12,8736	21,2356
12	J[15]	Compression	cs31	OK	2,2284	13,276	2,2284	12,3237	2,2284	12,3237	13,276	21,2356
13	I[15]	Compression	cs32	OK	3,3422	11,3972	3,3422	10,7028	3,3422	10,7028	11,3972	21,2356
13	J[16]	Compression	cs32	OK	2,6222	12,6925	2,6222	11,8244	2,6222	11,8244	12,6925	21,2356
14	I[16]	Compression	cs31	OK	3,5772	13,2028	3,5772	12,373	3,5772	12,373	13,2028	21,2356
14	J[17]	Compression	cs31	OK	2,7057	14,7195	2,7057	13,6838	2,7057	13,6838	14,7195	21,2356
15	I[17]	Compression	cs32	OK	3,9482	12,6576	3,9482	11,9068	3,9482	11,9068	12,6576	21,2356
15	J[18]	Compression	cs32	OK	2,7154	14,6859	2,7154	13,654	2,7154	13,654	14,6859	21,2356
16	I[18]	Compression	CS30	OK	3,8349	15,2842	3,8349	14,2972	3,8349	14,2972	15,2842	21,2356
16	J[19]	Compression	cs31	OK	2,0977	17,8692	2,0977	16,5097	2,0977	16,5096	17,8692	21,2356
17	I[19]	Compression	CS30	OK	2,0979	17,8692	2,0979	16,5097	2,0978	16,5096	17,8692	21,2356
17	J[20]	Compression	CS30	OK	0,9376	19,4793	0,9376	17,881	0,9375	17,8808	19,4793	21,2356
18	I[20]	Compression	CS26	OK	4,0095	13,8213	4,0095	12,9756	4,0095	12,9754	13,8213	21,2356
18	J[21]	Compression	CS26	OK	4,9759	12,3742	4,9759	11,7364	4,9759	11,7364	12,3742	21,2356
19	I[21]	Compression	CS26	OK	4,9758	12,3742	4,9758	11,7364	4,9758	11,7364	12,3742	21,2356
19	J[22]	Compression	CS26	OK	6,4798	10,026	6,4798	9,7203	6,4798	9,7203	10,026	21,2356
20	I[22]	Compression	CS26	OK	5,4481	9,4746	5,4481	9,1275	5,4481	9,1275	9,4746	21,2356
20	J[23]	Compression	CS19	OK	8,9245	5,3581	8,9245	5,6655	8,9245	5,6655	8,9245	21,2356
21	I[23]	Compression	CS26	OK	5,3163	9,3518	5,3163	9,0039	5,3163	9,0039	9,3518	21,2356
21	J[24]	Compression	CS26	OK	5,8812	8,4361	5,8812	8,2158	5,8812	8,2158	8,4361	21,2356
22	I[24]	Compression	CS26	OK	4,7475	10,21	4,7475	9,7391	4,7475	9,7391	10,21	21,2356
22	J[25]	Compression	CS26	OK	5,0806	9,7254	5,0806	9,325	5,0805	9,3249	9,7254	21,2356
23	I[25]	Compression	CS26	OK	3,9638	11,6427	3,9644	10,981	3,9631	10,9804	11,6427	21,2356
23	J[26]	Compression	CS26	OK	4,1065	11,3583	4,0986	10,7184	4,1144	10,7479	11,3583	21,2356
24	I[26]	Compression	CS26	OK	3,2072	10,8822	3,1976	10,2051	3,2169	10,2361	10,8822	21,2356
24	J[27]	Compression	CS30	OK	2,9435	10,4819	2,9441	9,8325	2,9428	9,8316	10,4819	21,2356
25	I[27]	Compression	cs31	OK	1,8896	12,418	1,8902	11,5108	1,889	11,51	12,418	21,2356
25	J[28]	Compression	CS30	OK	1,4164	12,8721	1,417	11,8848	1,4158	11,8843	12,8721	21,2356
26	I[28]	Compression	CS30	OK	0,5863	12,4472	0,5869	11,425	0,5857	11,4245	12,4472	21,2356
26	J[29]	Compression	CS30	OK	0,1684	12,705	0,1689	11,6246	0,1678	11,6241	12,705	21,2356
27	I[29]	Compression	CS30	OK	1,3603	11,7789	1,3609	10,881	1,3598	10,8805	11,7789	21,2356
27	J[30]	Compression	CS30	OK	0,7725	12,1443	0,7731	11,1643	0,7719	11,1637	12,1443	21,2356
28	I[30]	Compression	CS30	OK	0,0033	11,7332	0,0039	10,7223	0,0027	10,7218	11,7332	21,2356
28	J[31]	Compression	CS30	OK	-0,7126	12,2479	-0,7116	11,1311	-0,7136	11,1302	12,2479	21,2356
29	I[31]	Compression	CS30	OK	-1,4439	11,8571	-1,4429	10,7109	-1,4449	10,71	11,8571	21,2356
29	J[32]	Compression	cs32	OK	-1,485	11,8947	-1,4807	10,7432	-1,4894	10,7393	11,8947	21,2356
30	I[32]	Compression	cs32	OK	-0,7537	12,2855	-0,7494	11,1634	-0,758	11,1595	12,2855	21,2356
30	J[33]	Compression	cs32	OK	-0,1221	11,8596	-0,1178	10,8286	-0,1264	10,8248	11,8596	21,2356
31	I[33]	Compression	cs32	OK	0,6472	12,2707	0,6515	11,2707	0,6429	11,2668	12,2707	21,2356
31	J[34]	Compression	cs32	OK	1,1506	11,9949	1,1549	11,062	1,1462	11,0581	11,9949	21,2356
32	I[34]	Compression	cs32	OK	-0,0057	12,9122	-0,0014	11,8005	-0,0101	11,7966	12,9122	21,2356
32	J[35]	Compression	cs32	OK	0,3388	12,7568	0,3432	11,6882	0,3345	11,6844	12,7568	21,2356
33	I[35]	Compression	cs32	OK	1,1527	13,2813	1,157	12,2377	1,1484	12,2339	13,2813	21,2356
33	J[36]	Compression	cs32	OK	1,5505	12,9994	1,5548	12,0141	1,5463	12,0107	12,9994	21,2356
34	I[36]	Compression	cs32	OK	2,6127	10,9571	2,617	10,2395	2,6085	10,236	10,9571	21,2356
34	J[37]	Compression	cs32	OK	2,5662	11,2747	2,5592	10,5066	2,5732	10,5415	11,2747	21,2356
35	I[37]	Compression	cs32	OK	3,4599	11,7845	3,4403	11,0438	3,4796	11,09	11,7845	21,2356
35	J[38]	Compression	cs32	OK	3,5249	11,7917	3,5001	11,0718	3,5497	11,0863	11,7917	21,2356
36	I[38]	Compression	cs32	OK	4,6456	9,8251	4,6473	9,3832	4,6439	9,374	9,8251	21,2356
36	J[39]	Compression	cs32	OK	4,5196	10,0082	4,5198	9,5356	4,5194	9,5346	10,0082	21,2356

**Tableau A.2. (Suite) Vérification des contraintes en phase de construction**

Elem	Part	Comp./Tens.	Stage	CHK	FT (N/mm <sup>2</sup> )	FB (N/mm <sup>2</sup> )	FTL (N/mm <sup>2</sup> )	FBL (N/mm <sup>2</sup> )	FTR (N/mm <sup>2</sup> )	FBR (N/mm <sup>2</sup> )	FMAX (N/mm <sup>2</sup> )	ALW (N/mm <sup>2</sup> )
37	I[39]	Compression	CS26	OK	9,563	3,0786	9,5632	3,638	9,5628	3,6371	9,5632	21,2356
37	J[40]	Compression	CS26	OK	9,4891	3,2799	9,4891	3,8152	9,489	3,8151	9,4891	21,2356
38	I[40]	Compression	CS26	OK	10,6979	1,6472	10,6979	2,4275	10,6978	2,4273	10,6979	21,2356
38	J[41]	Compression	CS26	OK	10,1484	2,681	10,1484	3,3248	10,1483	3,3247	10,1484	21,2356
39	I[41]	Compression	CS26	OK	11,2678	3,2794	11,2678	3,968	11,2678	3,968	11,2678	21,2356
39	J[42]	Compression	cs32	OK	5,4546	11,2628	5,4546	10,7621	5,4546	10,7622	11,2628	21,2356
40	I[42]	Compression	cs32	OK	5,4548	11,2628	5,4548	10,7621	5,4548	10,7622	11,2628	21,2356
40	J[43]	Compression	CS30	OK	4,4984	12,5759	4,4984	11,8795	4,4984	11,8797	12,5759	21,2356
41	I[43]	Compression	CS30	OK	0,9599	19,4468	0,9599	17,8531	0,9599	17,8532	19,4468	21,2356
41	J[44]	Compression	CS30	OK	2,0141	17,8719	2,0141	16,5049	2,0141	16,5049	17,8719	21,2356
42	I[44]	Compression	CS30	OK	2,0139	17,8719	2,0139	16,5048	2,014	16,5049	17,8719	21,2356
42	J[45]	Compression	CS30	OK	3,7104	15,2438	3,7104	14,2495	3,7104	14,2495	15,2438	21,2356
43	I[45]	Compression	CS30	OK	2,6787	14,6924	2,6787	13,6567	2,6787	13,6567	14,6924	21,2356
43	J[46]	Compression	CS30	OK	3,9198	12,6418	3,9198	11,8899	3,9198	11,8899	12,6418	21,2356
44	I[46]	Compression	cs31	OK	2,7013	14,7727	2,7013	13,7321	2,7013	13,7321	14,7727	21,2356
44	J[47]	Compression	cs31	OK	3,5491	13,2923	3,5491	12,4524	3,5491	12,4524	13,2923	21,2356
45	I[47]	Compression	cs31	OK	2,5945	12,7823	2,5945	11,904	2,5945	11,904	12,7823	21,2356
45	J[48]	Compression	cs32	OK	3,3034	11,5065	3,3034	10,7994	3,3034	10,7994	11,5065	21,2356
46	I[48]	Compression	cs31	OK	2,1754	13,567	2,1754	12,585	2,1754	12,585	13,567	21,2356
46	J[49]	Compression	cs31	OK	2,3324	13,1956	2,3324	12,2592	2,3324	12,2592	13,1956	21,2356
47	I[49]	Compression	cs31	OK	1,4335	12,7171	1,4335	11,7444	1,4335	11,7444	12,7171	21,2356
47	J[50]	Compression	cs32	OK	1,814	11,8952	1,814	11,0261	1,814	11,0261	11,8952	21,2356
48	I[50]	Compression	cs32	OK	0,9481	11,433	0,9481	10,5291	0,9481	10,5291	11,433	21,2356
48	J[51]	Compression	cs31	OK	1,2566	10,5976	1,2566	9,7923	1,2566	9,7923	10,5976	21,2356
49	I[51]	Compression	cs32	OK	0,4293	10,1556	0,4293	9,3172	0,4293	9,3172	10,1556	21,2356
49	J[52]	Compression	cs31	OK	0,5419	9,5741	0,5419	8,7954	0,5419	8,7954	9,5741	21,2356
50	I[52]	Compression	cs31	OK	-0,2567	9,1476	-0,2567	8,3369	-0,2567	8,3369	9,1476	21,2356
50	J[53]	Compression	cs32	OK	-0,3475	8,7958	-0,3475	8,0076	-0,3475	8,0076	8,7958	21,2356
51	I[53]	Compression	cs31	OK	0,8461	7,8919	0,8461	7,2846	0,8461	7,2846	7,8919	21,2356
51	J[54]	Compression	cs31	OK	0,6191	7,6937	0,6191	7,0838	0,6191	7,0838	7,6937	21,2356
52	I[54]	Compression	cs32	OK	-0,1122	7,3028	-0,1122	6,6636	-0,1122	6,6636	7,3028	21,2356
52	J[55]	Compression	cs32	OK	0,3364	6,6239	0,3364	6,0819	0,3364	6,0819	6,6239	21,2356
53	I[55]	Compression	cs32	OK	0,3364	6,6239	0,3364	6,0819	0,3364	6,0819	6,6239	21,2356
53	J[56]	Compression	cs31	OK	0,598	6,2172	0,598	5,7328	0,598	5,7328	6,2172	21,2356
54	I[56]	Compression	cs32	OK	0,598	6,2172	0,598	5,7328	0,598	5,7328	6,2172	21,2356
54	J[57]	Compression	cs32	OK	0,6183	6,1842	0,6183	5,7044	0,6183	5,7044	6,1842	21,2356
55	I[57]	Compression	cs32	OK	0,6183	6,1842	0,6183	5,7044	0,6183	5,7044	6,1842	21,2356
55	J[58]	Compression	cs31	OK	0,6645	6,1051	0,6645	5,6361	0,6645	5,6361	6,1051	21,2356
56	I[58]	Compression	cs32	OK	0,6645	6,1051	0,6645	5,6361	0,6645	5,6361	6,1051	21,2356
56	J[59]	Compression	cs31	OK	0,6734	6,0854	0,6734	5,6189	0,6734	5,6189	6,0854	21,2356

## Annexe B

### Vérification des contraintes principales en phase de construction

**Tableau B.1.** Liste des symboles utilisés pour la vérification des contraintes principales en phase de construction

Elem	Numéro d'élément
Part	Emplacement (I-end, J end)
Comp/Tens	Compression, Tension
Stage	Phase de construction
CHK	Vérification des contraintes pour les étapes de construction
Sig-P1	Contrainte principale exercée au point 1
Sig-P2	Contrainte principale exercée au point 2
Sig-P3	Contrainte principale exercée au point 3
Sig-P4	Contrainte principale exercée au point 4
Sig-P5	Contrainte principale exercée au point 5
Sig-P6	Contrainte principale exercée au point 6
Sig-P7	Contrainte principale exercée au point 7
Sig-P8	Contrainte principale exercée au point 8
Sig-P9	Contrainte principale exercée au point 9
Sig-P10	Contrainte principale exercée au point 10
Sig-MAX	contrainte principale maximale
Sig-AP	contrainte admissible

#### Formule de calcul

$$\sigma_{ps} = \frac{1}{2} \left[ (\sigma_x + \sigma_z) \pm \sqrt{(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4(\tau_s + \tau_i + \tau_p)^2} \right]$$

Tableau B.2. Vérification des contraintes principales en phase de construction

Elem	Part	Comp./Tens.	Stage	CHK	Sig. P1 (N/mm <sup>2</sup> )	Sig. P2 (N/mm <sup>2</sup> )	Sig. P3 (N/mm <sup>2</sup> )	Sig. P4 (N/mm <sup>2</sup> )	Sig. P5 (N/mm <sup>2</sup> )	Sig. P6 (N/mm <sup>2</sup> )	Sig. P7 (N/mm <sup>2</sup> )	Sig. P8 (N/mm <sup>2</sup> )	Sig. P9 (N/mm <sup>2</sup> )	Sig. P10 (N/mm <sup>2</sup> )	Sig. MAX (N/mm <sup>2</sup> )	Sig. AP (N/mm <sup>2</sup> )
2	J4	Tension	S24	OK	0	0	0	0	-0.009	-0.009	-0.001	-0.001	-0.007	-0.007	-0.001	3,1074
3	J5	Tension	S26	OK	0	0	0	0	-0.009	-0.009	-0.002	-0.002	-0.007	-0.007	-0.007	3,1074
3	J6	Tension	S26	OK	0	0	0	0	-0.004	-0.004	-0.006	-0.006	-0.004	-0.004	-0.006	3,1074
4	J6	Tension	S26	OK	0	0	0	0	-0.004	-0.004	-0.006	-0.006	-0.004	-0.004	-0.006	3,1074
4	J7	Tension	S26	OK	0	0	0	0	-0.007	-0.007	-0.003	-0.003	-0.005	-0.005	-0.003	3,1074
5	J7	Tension	S31	OK	0	0	0	0	-0.007	-0.007	-0.009	-0.009	-0.005	-0.005	-0.009	3,1074
5	J8	Tension	S31	OK	0	0	0	0	-0.007	-0.007	-0.002	-0.002	-0.028	-0.028	-0.040	3,1074
6	J8	Tension	S26	OK	0	0	0	0	-0.030	-0.030	-0.040	-0.040	-0.028	-0.028	-0.040	3,1074
6	J9	Tension	S26	OK	0	-0.1772	0	0	-0.066	-0.066	-0.091	-0.091	-0.049	-0.049	-0.1772	3,1074
7	J9	Tension	S18	OK	0	0	0	0	-0.1928	-0.1928	-0.349	-0.349	-0.342	-0.342	-0.349	3,1074
7	J10	Tension	S18	OK	0	0	0	0	-0.007	-0.007	-0.018	-0.018	-0.068	-0.068	-0.079	3,1074
8	J10	Tension	S30	OK	-0.3451	-0.3451	0	0	-0.002	-0.002	-0.003	-0.003	-0.001	-0.001	-0.3451	3,1074
8	J11	Tension	S30	OK	-0.2893	-0.2893	0	0	-0.070	-0.070	-0.082	-0.082	-0.043	-0.043	-0.2893	3,1074
9	J11	Tension	S11	OK	0	0	0	0	-0.1244	-0.1244	-0.274	-0.274	-0.341	-0.341	-0.341	3,1074
9	J12	Tension	S32	OK	0	0	0	0	-0.087	-0.087	-0.114	-0.114	-0.064	-0.064	-0.114	3,1074
10	J12	Tension	S10	OK	0	0	0	0	-0.1298	-0.1298	-0.285	-0.285	-0.357	-0.357	-0.357	3,1074
10	J13	Tension	S31	OK	0	0	0	0	-0.104	-0.104	-0.142	-0.142	-0.084	-0.084	-0.142	3,1074
11	J13	Tension	S59	OK	0	0	0	0	-0.137	-0.137	-0.304	-0.304	-0.372	-0.372	-0.372	3,1074
11	J14	Tension	S31	OK	0	0	0	0	-0.079	-0.079	-0.117	-0.117	-0.067	-0.067	-0.117	3,1074
12	J14	Tension	S38	OK	0	0	0	0	-0.146	-0.146	-0.314	-0.314	-0.397	-0.397	-0.397	3,1074
12	J15	Tension	S14	OK	0	0	0	0	-0.046	-0.046	-0.104	-0.104	-0.125	-0.125	-0.125	3,1074
13	J15	Tension	S7	OK	0	0	0	0	-0.148	-0.148	-0.324	-0.324	-0.395	-0.395	-0.395	3,1074
13	J16	Tension	S30	OK	0	0	0	0	-0.151	-0.151	-0.229	-0.229	-0.148	-0.148	-0.229	3,1074
14	J16	Tension	S56	OK	0	0	0	0	-0.158	-0.158	-0.338	-0.338	-0.403	-0.403	-0.403	3,1074
14	J17	Tension	S31	OK	0	0	0	0	-0.149	-0.149	-0.263	-0.263	-0.165	-0.165	-0.263	3,1074
15	J17	Tension	S5	OK	0	0	0	0	-0.159	-0.159	-0.323	-0.323	-0.403	-0.403	-0.403	3,1074
15	J18	Tension	S30	OK	0	0	0	0	-0.26	-0.26	-0.395	-0.395	-0.253	-0.253	-0.395	3,1074
16	J19	Tension	S4	OK	0	0	0	0	-0.086	-0.086	-0.194	-0.194	-0.245	-0.245	-0.245	3,1074
16	J19	Tension	S32	OK	0	0	0	0	-0.339	-0.339	-0.483	-0.483	-0.293	-0.293	-0.483	3,1074
17	J19	Tension	S31	OK	0	0	0	0	-0.36	-0.36	-0.509	-0.509	-0.317	-0.317	-0.509	3,1074
17	J20	Tension	S26	OK	0	0	0	0	-0.491	-0.491	-0.647	-0.647	-0.379	-0.379	-0.647	3,1074
18	J20	Tension	S26	OK	0	0	0	0	-0.364	-0.364	-0.544	-0.544	-0.395	-0.395	-0.544	3,1074
18	J21	Tension	S26	OK	0	0	0	0	-0.267	-0.267	-0.436	-0.436	-0.318	-0.318	-0.436	3,1074
19	J21	Tension	S26	OK	0	0	0	0	-0.295	-0.295	-0.449	-0.449	-0.317	-0.317	-0.449	3,1074
19	J22	Tension	S4	OK	0	0	0	0	-0.078	-0.078	-0.182	-0.182	-0.262	-0.262	-0.262	3,1074
20	J22	Tension	S26	OK	0	0	0	0	-0.191	-0.191	-0.344	-0.344	-0.274	-0.274	-0.344	3,1074
20	J23	Tension	S55	OK	0	0	0	0	-0.146	-0.146	-0.327	-0.327	-0.394	-0.394	-0.394	3,1074
21	J23	Tension	S26	OK	0	0	0	0	-0.109	-0.109	-0.184	-0.184	-0.148	-0.148	-0.184	3,1074
21	J24	Tension	S6	OK	0	0	0	0	-0.154	-0.154	-0.353	-0.353	-0.411	-0.411	-0.411	3,1074
22	J24	Tension	S15	OK	0	0	0	0	-0.062	-0.062	-0.137	-0.137	-0.156	-0.156	-0.156	3,1074
22	J25	Tension	S7	OK	0	0	0	0	-0.149	-0.149	-0.321	-0.321	-0.399	-0.399	-0.399	3,1074
23	J25	Tension	S24	OK	0	0	0	0	-0.046	-0.046	-0.104	-0.104	-0.125	-0.125	-0.125	3,1074
23	J26	Tension	S24	OK	0	0	0	0	-0.146	-0.146	-0.314	-0.314	-0.387	-0.387	-0.387	3,1074
24	J26	Tension	S58	OK	0	0	0	0	-0.038	-0.038	-0.098	-0.098	-0.061	-0.061	-0.098	3,1074
24	J27	Tension	S9	OK	0	0	0	0	-0.137	-0.137	-0.304	-0.304	-0.372	-0.372	-0.372	3,1074
25	J27	Tension	S24	OK	0	0	0	0	-0.017	-0.017	-0.042	-0.042	-0.062	-0.062	-0.062	3,1074
25	J28	Tension	S10	OK	0	0	0	0	-0.129	-0.129	-0.285	-0.285	-0.357	-0.357	-0.357	3,1074
26	J28	Tension	S10	OK	0	0	0	0	-0.016	-0.016	-0.030	-0.030	-0.054	-0.054	-0.054	3,1074
26	J29	Tension	S11	OK	0	0	0	0	-0.124	-0.124	-0.274	-0.274	-0.343	-0.343	-0.343	3,1074
27	J29	Tension	S11	OK	0	0	0	0	-0.013	-0.013	-0.029	-0.029	-0.054	-0.054	-0.057	3,1074
27	J30	Tension	S20	OK	0	0	0	0	-0.108	-0.108	-0.242	-0.242	-0.309	-0.309	-0.309	3,1074
28	J30	Tension	S24	OK	0	0	0	0	-0.077	-0.077	-0.185	-0.185	-0.068	-0.068	-0.077	3,1074
28	J31	Tension	S30	OK	-0.7116	-0.7116	0	0	-0.057	-0.057	-0.071	-0.071	-0.029	-0.029	-0.7116	3,1074
29	J31	Tension	S30	OK	-1.4429	-1.4429	0	0	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.004	-0.004	-1.4429	3,1074
29	J32	Tension	S32	OK	0	0	0	0	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.001	-0.001	-1.4894	3,1074
30	J32	Tension	S32	OK	-0.7494	-0.7494	0	0	-0.039	-0.039	-0.042	-0.042	-0.021	-0.021	-0.7494	3,1074
30	J33	Tension	S23	OK	-0.1178	-0.1178	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1178	3,1074
31	J33	Tension	S23	OK	0	0	0	0	-0.107	-0.107	-0.242	-0.242	-0.306	-0.306	-0.306	3,1074
31	J34	Tension	S22	OK	0	0	0	0	-0.013	-0.013	-0.029	-0.029	-0.054	-0.054	-0.057	3,1074
32	J34	Tension	S22	OK	0	0	0	0	-0.124	-0.124	-0.274	-0.274	-0.341	-0.341	-0.341	3,1074
32	J35	Tension	S21	OK	0	0	0	0	-0.016	-0.016	-0.030	-0.030	-0.054	-0.054	-0.058	3,1074
33	J35	Tension	S23	OK	0	0	0	0	-0.128	-0.128	-0.285	-0.285	-0.357	-0.357	-0.357	3,1074
33	J36	Tension	S23	OK	0	0	0	0	-0.017	-0.017	-0.042	-0.042	-0.062	-0.062	-0.062	3,1074
34	J36	Tension	S20	OK	0	0	0	0	-0.137	-0.137	-0.304	-0.304	-0.372	-0.372	-0.372	3,1074
34	J37	Tension	S24	OK	0	0	0	0	-0.038	-0.038	-0.072	-0.072	-0.096	-0.096	-0.096	3,1074

## Annexe C

### Vérification des contraintes a l'état limite service

**Tableau C.1.** Liste des symboles utilisés pour la vérification des contraintes des contraintes à l'ELS en phase d'exploitation

LCOM Name	Combinaison d'action
ALW	Contrainte admissible
Elm	Numéro d'élément
Part	Emplacement (I-end, J end)
FB	Contrainte normale sur la fibre inférieure
Comp/Tens	Compression, Traction
FTL	Contrainte exercée au point 1 en flexion composée oblique
FBL	Contrainte exercée au point 3 en flexion composée oblique
FTR	Contrainte exercée au point 2 en flexion composée oblique
FBR	Contrainte exercée au point 4 en flexion composée oblique
FT	Contrainte sur la fibre supérieure
FB	Contrainte sur la fibre inférieure

Tableau C.2. Vérification des contraintes à l'ELS en phase d'exploitation

Elem	Part	Comp./Tens.	LCom Name	CHK	FT (N/mm <sup>2</sup> )	FB (N/mm <sup>2</sup> )	FTL (N/mm <sup>2</sup> )	FBL (N/mm <sup>2</sup> )	FTR (N/mm <sup>2</sup> )	FBR (N/mm <sup>2</sup> )	FMAX (N/mm <sup>2</sup> )	ALW (N/mm <sup>2</sup> )
2	I[4]	Compression	cLCB7	OK	0,8188	6,1915	0,8188	5,7283	0,8188	5,7283	6,1915	27
2	J[5]	Compression	cLCB7	OK	0,8061	6,2121	0,8061	5,7461	0,8061	5,7461	6,2121	27
3	I[5]	Compression	cLCB7	OK	0,8061	6,2121	0,8061	5,7461	0,8061	5,7461	6,2121	27
3	J[6]	Compression	cLCB7	OK	0,7534	6,2926	0,7534	5,8151	0,7534	5,8151	6,2926	27
4	I[6]	Compression	cLCB7	OK	0,7534	6,2926	0,7534	5,8151	0,7534	5,8151	6,2926	27
4	J[7]	Compression	cLCB7	OK	0,7312	6,326	0,7312	5,8437	0,7312	5,8437	6,326	27
5	I[7]	Compression	cLCB7	OK	0,7312	6,326	0,7312	5,8437	0,7312	5,8437	6,326	27
5	J[8]	Compression	cLCB7	OK	0,4553	6,736	0,4553	6,1946	0,4553	6,1946	6,736	27
6	I[8]	Compression	cLCB7	OK	0,4553	6,736	0,4553	6,1946	0,4553	6,1946	6,736	27
6	J[9]	Compression	cLCB7	OK	-0,0071	7,4146	-0,0071	6,7748	-0,0071	6,7748	7,4146	27
7	I[9]	Compression	cLCB7	OK	0,7242	7,8055	0,7242	7,195	0,7242	7,195	7,8055	27
7	J[10]	Compression	cLCB7	OK	0,941	7,9848	0,941	7,3776	0,941	7,3776	7,9848	27
8	I[10]	Compression	cLCB7	OK	-0,225	8,8818	-0,225	8,0968	-0,225	8,0968	8,8818	27
8	J[11]	Compression	cLCB7	OK	-0,1292	9,2064	-0,1292	8,4016	-0,1292	8,4016	9,2064	27
9	I[11]	Compression	cLCB7	OK	0,6694	9,6328	0,6694	8,8601	0,6694	8,8601	9,6328	27
9	J[12]	Compression	cLCB5	OK	0,2877	10,2928	0,2877	9,4303	0,2877	9,4303	10,2928	27
10	I[12]	Compression	cLCB5	OK	1,115	10,7347	1,115	9,9055	1,115	9,9055	10,7347	27
10	J[13]	Compression	cLCB5	OK	0,6738	11,7114	0,6738	10,7599	0,6738	10,7599	11,7114	27
11	I[13]	Compression	cLCB5	OK	1,5397	12,1736	1,5397	11,2569	1,5397	11,2569	12,1736	27
11	J[14]	Compression	cLCB5	OK	0,9897	13,1456	0,9897	12,0977	0,9897	12,0977	13,1456	27
12	I[14]	Compression	cLCB5	OK	1,8879	13,6281	1,8879	12,6161	1,8879	12,6161	13,6281	27
12	J[15]	Compression	cLCB5	OK	1,4557	14,4006	1,4557	13,2847	1,4557	13,2847	14,4006	27
13	I[15]	Compression	cLCB5	OK	2,5695	12,5218	2,5695	11,6639	2,5695	11,6639	12,5218	27
13	J[16]	Compression	cLCB5	OK	1,5448	14,2605	1,5448	13,1644	1,5448	13,1644	14,2605	27
14	I[16]	Compression	cLCB5	OK	2,4998	14,7708	2,4998	13,713	2,4998	13,713	14,7708	27
14	J[17]	Compression	cLCB5	OK	1,2734	16,8041	1,2734	15,4653	1,2734	15,4653	16,8041	27
15	I[17]	Compression	cLCB5	OK	2,5158	14,7423	2,5158	13,6883	2,5158	13,6883	14,7423	27
15	J[18]	Compression	cLCB5	OK	0,8777	17,3604	0,8777	15,9396	0,8777	15,9396	17,3604	27
16	I[18]	Compression	cLCB5	OK	1,9972	17,9588	1,9972	16,5828	1,9972	16,5828	17,9588	27
16	J[19]	Compression	cLCB5	OK	-0,1957	21,207	-0,1957	19,362	-0,1957	19,362	21,207	27
17	I[19]	Compression	cLCB5	OK	-0,1956	21,207	-0,1956	19,362	-0,1956	19,362	21,207	27
17	J[20]	Compression	cLCB5	OK	-1,5643	23,1205	-1,5643	20,9925	-1,5643	20,9925	23,1205	27
18	I[20]	Compression	cLCB5	OK	3,0267	14,7419	3,0267	13,732	3,0267	13,732	14,7419	27
18	J[21]	Compression	cLCB5	OK	3,9786	13,3159	3,9786	12,511	3,9786	12,511	13,3159	27
19	I[21]	Compression	cLCB5	OK	3,9784	13,3159	3,9784	12,511	3,9784	12,511	13,3159	27
19	J[22]	Compression	cLCB8	OK	5,5017	11,3098	5,6015	10,8538	5,4018	10,7643	11,3098	27
20	I[22]	Compression	cLCB8	OK	4,47	10,7584	4,5698	10,261	4,3701	10,1715	10,7584	27
20	J[23]	Compression	cLCB8	OK	5,2483	9,3812	5,3503	9,0705	5,1464	8,9793	9,3812	27
21	I[23]	Compression	cLCB8	OK	4,0678	11,029	4,1697	10,4745	3,9658	10,3833	11,029	27
21	J[24]	Compression	cLCB8	OK	4,3623	10,5067	4,4664	10,0236	4,2582	9,9305	10,5067	27
22	I[24]	Compression	cLCB8	OK	3,2286	12,2807	3,3327	11,5469	3,1245	11,4538	12,2807	27
22	J[25]	Compression	cLCB8	OK	3,2914	12,1895	3,3976	11,47	3,1851	11,3749	12,1895	27
23	I[25]	Compression	cLCB8	OK	2,1746	14,1068	2,2814	13,126	2,0677	13,0303	14,1068	27
23	J[26]	Compression	cLCB8	OK	2,0469	14,2158	2,1474	13,2006	1,9465	13,1331	14,2158	27
24	I[26]	Compression	cLCB8	OK	1,1477	13,7398	1,2464	12,6872	1,049	12,6214	13,7398	27
24	J[27]	Compression	cLCB8	OK	1,1315	13,5131	1,2426	12,4955	1,0204	12,3959	13,5131	27
25	I[27]	Compression	cLCB8	OK	0,0776	15,4492	0,1887	14,1739	-0,0335	14,0743	15,4492	27
25	J[28]	Compression	cLCB8	OK	-0,3845	15,8872	-0,2714	14,5351	-0,4977	14,4339	15,8872	27
26	I[28]	Compression	cLCB8	OK	-1,2146	15,4623	-1,1015	14,0753	-1,3278	13,974	15,4623	27
26	J[29]	Compression	cLCB8	OK	-1,6215	15,704	-1,5063	14,262	-1,7368	14,159	15,704	27
27	I[29]	Compression	cLCB8	OK	-0,4296	14,7779	-0,3143	13,5185	-0,5448	13,4154	14,7779	27
27	J[30]	Compression	cLCB8	OK	-1,0064	15,1272	-0,889	13,7889	-1,1237	13,6839	15,1272	27
28	I[30]	Compression	cLCB8	OK	-1,7755	14,7161	-1,6581	13,347	-1,8929	13,242	14,7161	27
28	J[31]	Compression	cLCB8	OK	-2,4804	15,2148	-2,3605	13,743	-2,6003	13,6357	15,2148	27
29	I[31]	Compression	cLCB8	OK	-3,2117	14,8239	-3,0918	13,3228	-3,3316	13,2155	14,8239	27
29	J[32]	Compression	cLCB8	OK	-3,2405	14,8433	-3,1152	13,3405	-3,3659	13,2283	14,8433	27
30	I[32]	Compression	cLCB8	OK	-2,5092	15,2342	-2,3838	13,7607	-2,6346	13,6486	15,2342	27
30	J[33]	Compression	cLCB8	OK	-1,8646	14,7894	-1,7371	13,4107	-1,9921	13,2967	14,7894	27
31	I[33]	Compression	cLCB8	OK	-1,0953	15,2005	-0,9678	13,8528	-1,2228	13,7387	15,2005	27
31	J[34]	Compression	cLCB8	OK	-0,579	14,9058	-0,4494	13,6289	-0,7086	13,513	14,9058	27
32	I[34]	Compression	cLCB8	OK	-1,7353	15,8231	-1,6057	14,3674	-1,8649	14,2515	15,8231	27
32	J[35]	Compression	cLCB8	OK	-1,3778	15,6489	-1,246	14,24	-1,5095	14,1222	15,6489	27
33	I[35]	Compression	cLCB8	OK	-0,5639	16,1734	-0,4321	14,7895	-0,6956	14,6717	16,1734	27
33	J[36]	Compression	cLCB8	OK	-0,1531	15,8725	-0,0193	14,5507	-0,2869	14,4314	15,8725	27
34	I[36]	Compression	cLCB8	OK	0,9091	13,8303	1,0429	12,7761	0,7753	12,6568	13,8303	27
34	J[37]	Compression	cLCB8	OK	0,8755	14,1291	1,0001	13,028	0,7509	12,9451	14,1291	27
35	I[37]	Compression	cLCB8	OK	1,7693	14,6388	1,8813	13,5652	1,6573	13,4936	14,6388	27
35	J[38]	Compression	cLCB8	OK	1,8472	14,6271	1,9562	13,578	1,7382	13,4729	14,6271	27
36	I[38]	Compression	cLCB8	OK	2,9679	12,6606	3,1034	11,8894	2,8324	11,7606	12,6606	27
36	J[39]	Compression	cLCB8	OK	2,8548	12,8248	2,9909	12,0266	2,7188	11,9041	12,8248	27

**Tableau C.2. (suite) Vérification des contraintes à l'ELS en phase d'exploitation**

Elem	Part	Comp./Tens.	LCom Name	CHK	FT (N/mm <sup>2</sup> )	FB (N/mm <sup>2</sup> )	FTL (N/mm <sup>2</sup> )	FBL (N/mm <sup>2</sup> )	FTR (N/mm <sup>2</sup> )	FBR (N/mm <sup>2</sup> )	FMAX (N/mm <sup>2</sup> )	ALW (N/mm <sup>2</sup> )
37	I[39]	Compression	cLCB8	OK	3,9889	11,0511	4,125	10,5035	3,8529	10,381	11,0511	27
37	J[40]	Compression	cLCB8	OK	3,6447	11,6458	3,7827	11,0178	3,5066	10,8943	11,6458	27
38	I[40]	Compression	cLCB8	OK	4,8535	10,0131	4,9915	9,6301	4,7154	9,5066	10,0131	27
38	J[41]	Compression	cLCB8	OK	4,0336	11,4404	4,1737	10,8645	3,8935	10,7394	11,4404	27
39	I[41]	Compression	cLCB8	OK	5,1531	12,0388	5,2932	11,5078	5,013	11,3826	12,0388	27
39	J[42]	Compression	cLCB8	OK	3,8288	14,0228	3,9707	13,2068	3,6868	13,0813	14,0228	27
40	I[42]	Compression	cLCB8	OK	3,829	14,0228	3,9709	13,2068	3,687	13,0813	14,0228	27
40	J[43]	Compression	cLCB8	OK	2,8795	15,3261	3,0218	14,3147	2,7372	14,1915	15,3261	27
41	I[43]	Compression	cLCB7	OK	1,08	19,5484	1,0809	17,9586	1,0792	17,954	19,5484	27
41	J[44]	Compression	cLCB7	OK	2,1342	17,9734	2,1345	16,6088	2,1339	16,6072	17,9734	27
42	I[44]	Compression	cLCB7	OK	2,1341	17,9735	2,1344	16,6088	2,1338	16,6072	17,9735	27
42	J[45]	Compression	cLCB7	OK	3,8305	15,3453	3,8305	14,3528	3,8305	14,3526	15,3453	27
43	I[45]	Compression	cLCB7	OK	2,7988	14,7939	2,7988	13,76	2,7987	13,7598	14,7939	27
43	J[46]	Compression	cLCB7	OK	4,0399	12,7433	4,0399	11,9931	4,0399	11,993	12,7433	27
44	I[46]	Compression	cLCB7	OK	2,8214	14,8743	2,8215	13,8353	2,8214	13,8353	14,8743	27
44	J[47]	Compression	cLCB7	OK	3,6693	13,3938	3,6693	12,5555	3,6693	12,5555	13,3938	27
45	I[47]	Compression	cLCB7	OK	2,7146	12,8838	2,7146	12,0072	2,7146	12,0072	12,8838	27
45	J[48]	Compression	cLCB7	OK	3,4236	11,6081	3,4236	10,9026	3,4236	10,9026	11,6081	27
46	I[48]	Compression	cLCB7	OK	2,2955	13,6686	2,2955	12,6882	2,2955	12,6882	13,6686	27
46	J[49]	Compression	cLCB7	OK	2,4525	13,2972	2,4525	12,3623	2,4525	12,3623	13,2972	27
47	I[49]	Compression	cLCB7	OK	1,5536	12,8187	1,5536	11,8476	1,5536	11,8476	12,8187	27
47	J[50]	Compression	cLCB7	OK	1,9341	11,9967	1,9341	11,1293	1,9341	11,1293	11,9967	27
48	I[50]	Compression	cLCB7	OK	1,0682	11,5345	1,0682	10,6323	1,0682	10,6323	11,5345	27
48	J[51]	Compression	cLCB7	OK	1,3767	10,6991	1,3767	9,8955	1,3767	9,8955	10,6991	27
49	I[51]	Compression	cLCB7	OK	0,5494	10,2572	0,5494	9,4203	0,5494	9,4203	10,2572	27
49	J[52]	Compression	cLCB7	OK	0,662	9,6756	0,662	8,8986	0,662	8,8986	9,6756	27
50	I[52]	Compression	cLCB7	OK	-0,1366	9,2492	-0,1366	8,4401	-0,1366	8,4401	9,2492	27
50	J[53]	Compression	cLCB7	OK	-0,2274	8,8974	-0,2274	8,1108	-0,2274	8,1108	8,8974	27
51	I[53]	Compression	cLCB7	OK	0,9662	7,9935	0,9662	7,3877	0,9662	7,3877	7,9935	27
51	J[54]	Compression	cLCB7	OK	0,7392	7,7952	0,7392	7,187	0,7392	7,187	7,7952	27
52	I[54]	Compression	cLCB7	OK	0,0079	7,4044	0,0079	6,7668	0,0079	6,7668	7,4044	27
52	J[55]	Compression	cLCB7	OK	0,4565	6,7254	0,4565	6,185	0,4565	6,185	6,7254	27
53	I[55]	Compression	cLCB7	OK	0,4565	6,7254	0,4565	6,185	0,4565	6,185	6,7254	27
53	J[56]	Compression	cLCB7	OK	0,7181	6,3188	0,7181	5,836	0,7181	5,836	6,3188	27
54	I[56]	Compression	cLCB7	OK	0,7181	6,3188	0,7181	5,836	0,7181	5,836	6,3188	27
54	J[57]	Compression	cLCB7	OK	0,7384	6,2858	0,7384	5,8076	0,7384	5,8076	6,2858	27
55	I[57]	Compression	cLCB7	OK	0,7384	6,2858	0,7384	5,8076	0,7384	5,8076	6,2858	27
55	J[58]	Compression	cLCB7	OK	0,7846	6,2067	0,7846	5,7393	0,7846	5,7393	6,2067	27
56	I[58]	Compression	cLCB7	OK	0,7846	6,2067	0,7846	5,7393	0,7846	5,7393	6,2067	27
56	J[59]	Compression	cLCB7	OK	0,7935	6,187	0,7935	5,722	0,7935	5,722	6,187	27

## Annexe D

### Vérification des contraintes principales à l'état limite service

**Tableau D.1.** Liste des symboles utilisés pour la vérification des contraintes principales  
l'ELS en phase d'exploitation

Elem	Numéro d'élément
Part	Emplacement (I-end, J end)
Comp/Tens	Compression, Tension
Stage	Phase de construction
CHK	Vérification des contraintes pour les étapes de construction
Sig-P1	Contrainte principale exercée au point 1
Sig-P2	Contrainte principale exercée au point 2
Sig-P3	Contrainte principale exercée au point 3
Sig-P4	Contrainte principale exercée au point 4
Sig-P5	Contrainte principale exercée au point 5
Sig-P6	Contrainte principale exercée au point 6
Sig-P7	Contrainte principale exercée au point 7
Sig-P8	Contrainte principale exercée au point 8
Sig-P9	Contrainte principale exercée au point 9
Sig-P10	Contrainte principale exercée au point 10
Sig-MAX	contrainte principale maximale
Sig-AP	contrainte admissible

$$\sigma_{ps} = \frac{1}{2} \left[ (\sigma_x + \sigma_z) \pm \sqrt{(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4(\tau_s + \tau_i + \tau_p)^2} \right]$$

Tableau D.2. Vérification des contraintes principales à l'ELS en phase d'exploitation

Elem	Part	Comp./Tens	LCom Name	CHK	Sig_P1 (N/mm <sup>2</sup> )	Sig_P2 (N/mm <sup>2</sup> )	Sig_P3 (N/mm <sup>2</sup> )	Sig_P4 (N/mm <sup>2</sup> )	Sig_P5 (N/mm <sup>2</sup> )	Sig_P6 (N/mm <sup>2</sup> )	Sig_P7 (N/mm <sup>2</sup> )	Sig_P8 (N/mm <sup>2</sup> )	Sig_P9 (N/mm <sup>2</sup> )	Sig_P10 (N/mm <sup>2</sup> )	Sig_MAX (N/mm <sup>2</sup> )	Sig_AP (N/mm <sup>2</sup> )
2	I[4]	Tension	cLCB8	OK	0	0	0	0	0	0	-0,0001	-0,0001	0	0	-0,0001	3,7954
2	J[5]	Tension	cLCB8	OK	0	0	0	0	-0,0009	-0,0009	-0,0012	-0,0012	-0,0007	-0,0007	-0,0012	3,7954
3	I[5]	Tension	cLCB8	OK	0	0	0	0	-0,0009	-0,0009	-0,0012	-0,0012	-0,0007	-0,0007	-0,0012	3,7954
3	J[6]	Tension	cLCB8	OK	0	0	0	0	-0,0052	-0,0052	-0,0071	-0,0071	-0,0041	-0,0041	-0,0071	3,7954
4	I[6]	Tension	cLCB8	OK	0	0	0	0	-0,0052	-0,0052	-0,0071	-0,0071	-0,0041	-0,0041	-0,0071	3,7954
4	J[7]	Tension	cLCB8	OK	0	0	0	0	-0,0071	-0,0071	-0,0096	-0,0096	-0,0056	-0,0056	-0,0096	3,7954
5	I[7]	Tension	cLCB8	OK	0	0	0	0	-0,0071	-0,0071	-0,0096	-0,0096	-0,0056	-0,0056	-0,0096	3,7954
5	J[8]	Tension	cLCB8	OK	0	0	0	0	-0,0326	-0,0326	-0,0417	-0,0417	-0,0233	-0,0233	-0,0417	3,7954
6	I[8]	Tension	cLCB8	OK	0	0	0	0	-0,0326	-0,0326	-0,0417	-0,0417	-0,0233	-0,0233	-0,0417	3,7954
6	J[9]	Tension	cLCB8	OK	-0,2473	-0,2473	0	0	-0,0816	-0,0816	-0,095	-0,095	-0,0503	-0,0503	-0,2473	3,7954
7	I[9]	Tension	cLCB8	OK	0	0	0	0	-0,0005	-0,0005	-0,0006	-0,0006	-0,0003	-0,0003	-0,0006	3,7954
7	J[10]	Tension	cLCB8	OK	0	0	0	0	-0,0325	-0,0325	-0,0445	-0,0445	-0,0261	-0,0261	-0,0445	3,7954
8	I[10]	Tension	cLCB8	OK	-0,4652	-0,4652	0	0	-0,0034	-0,0034	-0,0038	-0,0038	-0,0019	-0,0019	-0,4652	3,7954
8	J[11]	Tension	cLCB8	OK	-0,3694	-0,3694	0	0	-0,074	-0,074	-0,0848	-0,0848	-0,0443	-0,0443	-0,3694	3,7954
9	I[11]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,0023	-0,0023	-0,0031	-0,0031	-0,0017	-0,0017	-0,0031	3,7954
9	J[12]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,1154	-0,1154	-0,1473	-0,1473	-0,0828	-0,0828	-0,1473	3,7954
10	I[12]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,0137	-0,0137	-0,019	-0,019	-0,0112	-0,0112	-0,019	3,7954
10	J[13]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,146	-0,146	-0,1933	-0,1933	-0,1118	-0,1118	-0,1933	3,7954
11	I[13]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,0283	-0,0283	-0,0403	-0,0403	-0,0242	-0,0242	-0,0403	3,7954
11	J[14]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,126	-0,126	-0,1699	-0,1699	-0,0993	-0,0993	-0,1699	3,7954
12	I[14]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,0225	-0,0225	-0,0324	-0,0324	-0,0196	-0,0196	-0,0324	3,7954
12	J[15]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,0826	-0,0826	-0,1144	-0,1144	-0,0678	-0,0678	-0,1144	3,7954
13	I[15]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,0615	-0,0615	-0,0932	-0,0932	-0,0596	-0,0596	-0,0932	3,7954
13	J[16]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,2459	-0,2459	-0,3434	-0,3434	-0,2087	-0,2087	-0,3434	3,7954
14	I[16]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,0834	-0,0834	-0,1229	-0,1229	-0,0767	-0,0767	-0,1229	3,7954
14	J[17]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,2906	-0,2906	-0,393	-0,393	-0,2328	-0,2328	-0,393	3,7954
15	I[17]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,1571	-0,1571	-0,2316	-0,2316	-0,1458	-0,1458	-0,2316	3,7954
15	J[18]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,4359	-0,4359	-0,5755	-0,5755	-0,3384	-0,3384	-0,5755	3,7954
16	I[18]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,2494	-0,2494	-0,3492	-0,3492	-0,2115	-0,2115	-0,3492	3,7954
16	J[19]	Tension	cLCB5	OK	-0,1957	-0,1957	0	0	-0,5638	-0,5638	-0,6931	-0,6931	-0,3875	-0,3875	-0,6931	3,7954
17	I[19]	Tension	cLCB5	OK	-0,1956	-0,1956	0	0	-0,5846	-0,5846	-0,7193	-0,7193	-0,4029	-0,4029	-0,7193	3,7954
17	J[20]	Tension	cLCB5	OK	-1,5643	-1,5643	0	0	-0,7742	-0,7742	-0,8792	-0,8792	-0,4698	-0,4698	-1,5643	3,7954
18	I[20]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,3737	-0,3737	-0,5626	-0,5626	-0,3701	-0,3701	-0,5626	3,7954
18	J[21]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,2718	-0,2718	-0,4338	-0,4338	-0,2997	-0,2997	-0,4338	3,7954
19	I[21]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,2707	-0,2707	-0,4319	-0,4319	-0,2984	-0,2984	-0,4319	3,7954
19	J[22]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,0953	-0,0953	-0,1671	-0,1671	-0,1258	-0,1258	-0,1671	3,7954
20	I[22]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,2015	-0,2015	-0,3408	-0,3408	-0,2505	-0,2505	-0,3408	3,7954
20	J[23]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,0447	-0,0447	-0,0819	-0,0819	-0,0648	-0,0648	-0,0819	3,7954
21	I[23]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,1062	-0,1062	-0,1799	-0,1799	-0,1303	-0,1303	-0,1799	3,7954
21	J[24]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,0147	-0,0147	-0,026	-0,026	-0,0195	-0,0195	-0,026	3,7954
22	I[24]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,0558	-0,0558	-0,0911	-0,0911	-0,0626	-0,0626	-0,0911	3,7954
22	J[25]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,0058	-0,0058	-0,0097	-0,0097	-0,0068	-0,0068	-0,0097	3,7954
23	I[25]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,033	-0,033	-0,0507	-0,0507	-0,0326	-0,0326	-0,0507	3,7954
23	J[26]	Tension	cLCB7	OK	-0,0001	-0,0001	0	0	-0,0015	-0,0026	-0,0034	-0,0042	-0,0028	-0,0034	-0,0042	3,7954
24	I[26]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,0553	-0,0504	-0,083	-0,0723	-0,0517	-0,045	-0,083	3,7954
24	J[27]	Tension	cLCB7	OK	0	0	0	0	-0,0024	-0,0024	-0,0044	-0,0044	-0,0035	-0,0035	-0,0044	3,7954
25	I[27]	Tension	cLCB8	OK	0	-0,0335	0	0	-0,0031	-0,0034	-0,0038	-0,0041	-0,0021	-0,0022	-0,0335	3,7954
25	J[28]	Tension	cLCB8	OK	-0,2714	-0,4977	0	0	-0,0257	-0,0263	-0,0304	-0,0303	-0,016	-0,0159	-0,4977	3,7954
26	I[28]	Tension	cLCB8	OK	-1,1015	-1,3278	0	0	-0,0022	-0,0025	-0,0023	-0,0026	-0,0012	-0,0013	-1,3278	3,7954
26	J[29]	Tension	cLCB8	OK	-1,5063	-1,7368	0	0	-0,0358	-0,0371	-0,0359	-0,036	-0,0174	-0,0172	-1,7368	3,7954
27	I[29]	Tension	cLCB8	OK	-0,3143	-0,5448	0	0	-0,0011	-0,0012	-0,0013	-0,0015	-0,0007	-0,0007	-0,5448	3,7954
27	J[30]	Tension	cLCB8	OK	-0,889	-1,1237	0	0	-0,0525	-0,0544	-0,0576	-0,0579	-0,0291	-0,029	-1,1237	3,7954
28	I[30]	Tension	cLCB8	OK	-1,6581	-1,8929	0	0	-0,0007	-0,0007	-0,0007	-0,0006	-0,0003	-0,0003	-1,8929	3,7954
28	J[31]	Tension	cLCB8	OK	-2,3605	-2,6003	0	0	-0,0625	-0,0664	-0,0527	-0,0532	-0,0237	-0,0236	-2,6003	3,7954
29	I[31]	Tension	cLCB8	OK	-3,0918	-3,3316	0	0	-0,0015	-0,0019	-0,0009	-0,0011	-0,0004	-0,0005	-3,3316	3,7954
29	J[32]	Tension	cLCB8	OK	-3,1152	-3,3659	0	0	-0,0051	-0,0054	-0,0032	-0,003	-0,0013	-0,0012	-3,3659	3,7954
30	I[32]	Tension	cLCB8	OK	-2,3838	-2,6346	0	0	-0,0508	-0,0561	-0,0424	-0,0447	-0,019	-0,0197	-2,6346	3,7954
30	J[33]	Tension	cLCB8	OK	-1,7371	-1,9921	0	0	0	0	0	0	0	0	-1,9921	3,7954
31	I[33]	Tension	cLCB8	OK	-0,9678	-1,2228	0	0	-0,0441	-0,0473	-0,0477	-0,0499	-0,024	-0,0248	-1,2228	3,7954
31	J[34]	Tension	cLCB8	OK	-0,4494	-0,7086	0	0	-0,0029	-0,0028	-0,0033	-0,0032	-0,0017	-0,0016	-0,7086	3,7954
32	I[34]	Tension	cLCB8	OK	-1,6057	-1,8649	0	0	-0,0284	-0,0309	-0,028	-0,0295	-0,0135	-0,014	-1,8649	3,7954
32	J[35]	Tension	cLCB8	OK	-1,246	-1,5095	0	0	-0,0049	-0,005	-0,0051	-0,005	-0,0025	-0,0024	-1,5095	3,7954
33	I[35]	Tension	cLCB8	OK	-0,4321	-0,6956	0	0	-0,0205	-0,0219	-0,0237	-0,0249	-0,0124	-0,0128	-0,6956	3,7954
33	J[36]	Tension	cLCB8	OK	-0,0193	-0,2869	0	0	-0,0049	-0,0049	-0,006	-0,0058	-0,0032	-0,0031	-0,2869	3,7954
34	I[36]	Tension	cLCB8	OK	0	0	0	0	-0,0009	-0,001	-0,0012	-0,0014	-0,0007	-0,0008	-0,0014	3,7954
34	J[37]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,0295	-0,0262	-0,0505	-0,0422	-0,0355	-0,0296	-0,0505	3,7954
35	I[37]	Tension	cLCB8	OK	-0,0004	-0,0005	0	0	-0,0004	-0,0012	-0,0009	-0,0013	-0,0005	-0,0008	-0,0013	3,7954
35	J[38]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,0187	-0,019	-0,032	-0,033	-0,0232	-0,024	-0,033	3,7954
36	I[38]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,0029	-0,0029	-0,0054	-0,0054	-0,0043	-0,0043	-0,0054	3,7954
36	J[39]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,0422	-0,0422	-0,0771	-0,0771	-0,0608	-0,0608	-0,0771	3,7954
37	I[39]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,0122	-0,0122	-0,024	-0,024	-0,021	-0,021	-0,024	3,7954
37	J[40]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,0926	-0,0926	-0,1748	-0,1748	-0,1461	-0,1461	-0,1748	3,7954
38	I[40]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,0416	-0,0416	-0,0845	-0,0845	-0,0785	-0,0785	-0,0845	3,7954
38	J[41]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,1868	-0,1868	-0,35	-0,35	-0,2948	-0,2948	-0,35	3,7954
39	I[41]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,091	-0,091	-0,1752	-0,1752	-0,1503	-0,1503	-0,1752	3,7954
39	J[42]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,263	-0,263	-0,4597	-0,4597	-0,3541	-0,3541	-0,4597	3,7954
40	I[42]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,2764	-0,2764	-0,4827	-0,4827	-0,3721	-0,3721	-0,4827	3,7954
40	J[43]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,3809	-0,3809	-0,6253	-0,6253	-0,4529	-0,4529	-0,6253	3,7954
41																

**Tableau D.2. (suite) Vérification des contraintes principales à l'ELS en phase d'exploitation**

Elem	Part	Comp./Tens	LCom Name	CHK	Sig_P1 (N/mm <sup>2</sup> )	Sig_P2 (N/mm <sup>2</sup> )	Sig_P3 (N/mm <sup>2</sup> )	Sig_P4 (N/mm <sup>2</sup> )	Sig_P5 (N/mm <sup>2</sup> )	Sig_P6 (N/mm <sup>2</sup> )	Sig_P7 (N/mm <sup>2</sup> )	Sig_P8 (N/mm <sup>2</sup> )	Sig_P9 (N/mm <sup>2</sup> )	Sig_P10 (N/mm <sup>2</sup> )	Sig_MAX (N/mm <sup>2</sup> )	Sig_AP (N/mm <sup>2</sup> )
46	I[48]	Tension	cLCB8	OK	0	0	0	0	-0,0369	-0,0369	-0,0537	-0,0537	-0,0329	-0,0329	-0,0537	3,7954
46	J[49]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,0051	-0,0051	-0,0076	-0,0076	-0,0047	-0,0047	-0,0076	3,7954
47	I[49]	Tension	cLCB8	OK	0	0	0	0	-0,0807	-0,0807	-0,1121	-0,1121	-0,0667	-0,0667	-0,1121	3,7954
47	J[50]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,0108	-0,0108	-0,0157	-0,0157	-0,0096	-0,0096	-0,0157	3,7954
48	I[50]	Tension	cLCB8	OK	0	0	0	0	-0,1091	-0,1091	-0,1468	-0,1468	-0,0857	-0,0857	-0,1468	3,7954
48	J[51]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,0041	-0,0041	-0,0057	-0,0057	-0,0034	-0,0034	-0,0057	3,7954
49	I[51]	Tension	cLCB8	OK	0	0	0	0	-0,0917	-0,0917	-0,1173	-0,1173	-0,0659	-0,0659	-0,1173	3,7954
49	J[52]	Tension	cLCB5	OK	0	0	0	0	-0,0001	-0,0001	-0,0001	-0,0001	0	0	-0,0001	3,7954
50	I[52]	Tension	cLCB8	OK	-0,3768	-0,3768	0	0	-0,0738	-0,0738	-0,0845	-0,0845	-0,0441	-0,0441	-0,3768	3,7954
50	J[53]	Tension	cLCB8	OK	-0,4676	-0,4676	0	0	-0,0034	-0,0034	-0,0038	-0,0038	-0,0019	-0,0019	-0,4676	3,7954
51	I[53]	Tension	cLCB8	OK	0	0	0	0	-0,0321	-0,0321	-0,0441	-0,0441	-0,0259	-0,0259	-0,0441	3,7954
51	J[54]	Tension	cLCB8	OK	0	0	0	0	-0,0005	-0,0005	-0,0006	-0,0006	-0,0003	-0,0003	-0,0006	3,7954
52	I[54]	Tension	cLCB8	OK	-0,2323	-0,2323	0	0	-0,0811	-0,0811	-0,0947	-0,0947	-0,0503	-0,0503	-0,2323	3,7954
52	J[55]	Tension	cLCB8	OK	0	0	0	0	-0,0326	-0,0326	-0,0417	-0,0417	-0,0233	-0,0233	-0,0417	3,7954
53	I[55]	Tension	cLCB8	OK	0	0	0	0	-0,0326	-0,0326	-0,0417	-0,0417	-0,0233	-0,0233	-0,0417	3,7954
53	J[56]	Tension	cLCB8	OK	0	0	0	0	-0,0072	-0,0072	-0,0097	-0,0097	-0,0056	-0,0056	-0,0097	3,7954
54	I[56]	Tension	cLCB8	OK	0	0	0	0	-0,0072	-0,0072	-0,0097	-0,0097	-0,0056	-0,0056	-0,0097	3,7954
54	J[57]	Tension	cLCB8	OK	0	0	0	0	-0,0052	-0,0052	-0,0071	-0,0071	-0,0041	-0,0041	-0,0071	3,7954
55	I[57]	Tension	cLCB8	OK	0	0	0	0	-0,0052	-0,0052	-0,0071	-0,0071	-0,0041	-0,0041	-0,0071	3,7954
55	J[58]	Tension	cLCB8	OK	0	0	0	0	-0,0009	-0,0009	-0,0012	-0,0012	-0,0007	-0,0007	-0,0012	3,7954
56	I[58]	Tension	cLCB8	OK	0	0	0	0	-0,0009	-0,0009	-0,0012	-0,0012	-0,0007	-0,0007	-0,0012	3,7954
56	J[59]	Tension	cLCB8	OK	0	0	0	0	0	0	-0,0001	-0,0001	0	0	-0,0001	3,7954

## Annexe E

### Vérification de la fissuration a l'état limite service

**Tableau E.1.** Liste des symboles utilisés pour la vérification de la fissuration à l'état limite service

Elm	Numéro d'élément
Part	Emplacement (I-end, J end)
Top/Bottom	Fibre supérieure, fibre inférieure
Lcom Name	Combinaison d'action
Serviceability Load Type	Fréquente/quasi-permanente
Type	Composants MAX/MIN
Check	OK/NG
$W_k$	Largeur de la fissure
$W_{max}$	Largeur admissible

Tableau E.2.Vérification de la fissuration a l'état limite service

Elem	Part	Top/Bottom	LCom Name	Serviceability Load Type	CHK	N_Ed (N)	M_Ed (N*mm)	S_r,max (mm)	Ep_sm-Ep_cm	Wk (mm)	Wmax (mm)
2	[[4]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-19371535,72	-10421895889	0	0	0	0,2
2	[[4]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-19371535,72	-10421895889	0	0	0	0,2
2	[[5]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-19377449,23	-10486143413	0	0	0	0,2
2	[[5]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-19377449,23	-10486143413	0	0	0	0,2
3	[[5]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-19377449,23	-10486143413	0	0	0	0,2
3	[[5]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-19377449,23	-10486143413	0	0	0	0,2
3	[[6]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-19387829,85	-10743720624	0	0	0	0,2
3	[[6]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-19387829,85	-10743720624	0	0	0	0,2
4	[[6]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-19387829,85	-10743720624	0	0	0	0,2
4	[[6]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-19387829,85	-10743720624	0	0	0	0,2
4	[[7]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-19390805,72	-10851261062	0	0	0	0,2
4	[[7]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-19390805,72	-10851261062	0	0	0	0,2
5	[[7]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-19390805,72	-10851261062	0	0	0	0,2
5	[[7]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-19390805,72	-10851261062	0	0	0	0,2
5	[[8]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-19413724,68	-12177331363	0	0	0	0,2
5	[[8]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-19413724,68	-12177331363	0	0	0	0,2
6	[[8]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-19413724,68	-12177331363	0	0	0	0,2
6	[[8]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-19413724,68	-12177331363	0	0	0	0,2
6	[[9]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-19429171,49	-14382822723	0	0	0	0,2
6	[[9]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-19429171,49	-14382822723	2989,9986	0	0	0,2
7	[[9]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-23395802,53	-13724666245	0	0	0	0,2
7	[[9]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-23395802,53	-13724666245	0	0	0	0,2
7	[[10]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-24744679,16	-13652226772	0	0	0	0,2
7	[[10]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-24744679,16	-13652226772	0	0	0	0,2
8	[[10]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-22564261,11	-17640289238	0	0	0	0,2
8	[[11]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-23828801,78	-18082575168	0	0	0	0,2
9	[[11]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-28159431,77	-17363079744	0	0	0	0,2
9	[[11]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-28159431,77	-17363079744	0	0	0	0,2
9	[[12]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-29197134,05	-18577212962	0	0	0	0,2
9	[[12]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-29197134,05	-18577212962	0	0	0	0,2
10	[[12]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-33683923,84	-17832181746	0	0	0	0,2
10	[[12]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-33683923,84	-17832181746	0	0	0	0,2
10	[[13]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-34595979,41	-19843970493	0	0	0	0,2
10	[[13]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-34595979,41	-19843970493	0	0	0	0,2
11	[[13]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-39290845,52	-19063603205	0	0	0	0,2
11	[[13]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-39290845,52	-19063603205	0	0	0	0,2
11	[[14]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-39758433,2	-21037752690	0	0	0	0,2
11	[[14]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-39758433,2	-21037752690	0	0	0	0,2
12	[[14]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-44636699,65	-20234444276	0	0	0	0,2
12	[[14]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-44636699,65	-20234444276	0	0	0	0,2
12	[[15]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-45027943,3	-21356225929	0	0	0	0,2
12	[[15]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-45027943,3	-21356225929	0	0	0	0,2
13	[[15]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-44325114,1	-15571099067	0	0	0	0,2
13	[[15]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-44325114,1	-15571099067	0	0	0	0,2
13	[[16]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-44999473,58	-19467141053	0	0	0	0,2
13	[[16]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-44999473,58	-19467141053	0	0	0	0,2
14	[[16]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-50178997,03	-18607282421	0	0	0	0,2
14	[[16]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-50178997,03	-18607282421	0	0	0	0,2
14	[[17]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-50856068,98	-23223875780	0	0	0	0,2
14	[[17]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-50856068,98	-23223875780	0	0	0	0,2
15	[[17]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-50164715,25	-16836286705	0	0	0	0,2
15	[[17]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-50164715,25	-16836286705	0	0	0	0,2
15	[[18]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-50802899,84	-23140186287	0	0	0	0,2
15	[[18]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-50802899,84	-23140186287	0	0	0	0,2
16	[[18]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-56874765,72	-22132722317	0	0	0	0,2
16	[[18]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-56874765,72	-22132722317	0	0	0	0,2
16	[[19]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-57029306,61	-30488071588	0	0	0	0,2
16	[[19]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-57029306,61	-30488071588	0	0	0	0,2
17	[[19]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-57030015,09	-30487717619	0	0	0	0,2
17	[[19]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-57030015,09	-30487717619	0	0	0	0,2
17	[[20]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-56815900,24	-35737240068	0	0	0	0,2
17	[[20]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-56815900,24	-35737240068	0	0	0	0,2
18	[[20]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-51029423,74	-5814429971	0	0	0	0,2
18	[[20]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-51029423,74	-5814429971	0	0	0	0,2
18	[[21]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-50918672,63	-1779625666	0	0	0	0,2
18	[[21]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-50918672,63	-1779625666	0	0	0	0,2
19	[[21]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-50917999,05	-1779962195	0	0	0	0,2
19	[[21]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-50917999,05	-1779962195	0	0	0	0,2
19	[[22]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-50484054,67	4285115161	0	0	0	0,2
19	[[22]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-50484054,67	4285115161	0	0	0	0,2
20	[[22]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-44888230,39	3356637580	0	0	0	0,2
20	[[22]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-44888230,39	3356637580	0	0	0	0,2
20	[[23]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-44222253,24	7425099185	0	0	0	0,2
20	[[23]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-44222253,24	7425099185	0	0	0	0,2
21	[[23]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-44030453,89	1957587472	0	0	0	0,2
21	[[23]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-44030453,89	1957587472	0	0	0	0,2
21	[[24]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-43775290,21	3438069400	0	0	0	0,2
21	[[24]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-43775290,21	3438069400	0	0	0	0,2
22	[[24]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-44113388,27	-2182796260	0	0	0	0,2
22	[[24]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-44113388,27	-2182796260	0	0	0	0,2
22	[[25]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-44113653,78	-1983639985	0	0	0	0,2
22	[[25]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-44113653,78	-1983639985	0	0	0	0,2
23	[[25]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-44909383,08	-7848845663	0	0	0	0,2

Tableau E.2.(suite) Vérification de la fissuration a l'état limite service

Elem	Part	Top/Bottom	LCom Name	Serviceability Load Type	CHK	N_Ed (N)	M_Ed (N*mm)	S_r,max (mm)	Ep_sm-Ep_cm	Wk (mm)	Wmax (mm)
23	[25]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-44909383,08	-7848845663	0	0	0	0,2
23	[26]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-44700371,11	-8404841168	0	0	0	0,2
23	[26]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-44700371,11	-8404841168	0	0	0	0,2
24	[26]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-39835357,93	-9222824962	0	0	0	0,2
24	[26]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-39835357,93	-9222824962	0	0	0	0,2
24	[27]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-39153148,19	-8914418895	0	0	0	0,2
24	[27]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-39153148,19	-8914418895	0	0	0	0,2
25	[27]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-40249736,59	-14694369371	0	0	0	0,2
25	[27]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-40249736,59	-14694369371	0	0	0	0,2
25	[28]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-39610409,23	-16532913476	0	0	0	0,2
25	[28]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-39610409,23	-16532913476	0	0	0	0,2
26	[28]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-35159155,94	-17316178038	0	0	0	0,2
26	[29]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-34203933,47	-18668594734	0	0	0	0,2
27	[29]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-36407973,66	-14573980268	0	0	0	0,2
27	[29]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-36407973,66	-14573980268	0	0	0	0,2
27	[30]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-35072102,46	-16462792109	0	0	0	0,2
28	[30]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-30900187,85	-17155009912	0	0	0	0,2
28	[31]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-29463264,98	-19579889374	0	0	0	0,2
29	[31]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-25496725,86	-20238030600	0	0	0	0,2
29	[31]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-25496725,86	-20238030600	2989,9986	0	0	0,2
29	[32]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-25435137,74	-20429774066	0	0	0	0,2
29	[32]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-25435137,74	-20429774066	2989,9986	0	0	0,2
30	[32]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-29401768,78	-19771617588	0	0	0	0,2
30	[33]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-30746281,04	-17764195948	0	0	0	0,2
31	[33]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-34918852,96	-17071869082	0	0	0	0,2
31	[34]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-36163959,64	-15602510023	0	0	0	0,2
31	[34]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-36163959,64	-15602510023	0	0	0	0,2
32	[34]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-34077120,66	-19610907048	0	0	0	0,2
32	[35]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-35020559,12	-18681387955	0	0	0	0,2
33	[35]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-39679053,31	-18122072784	0	0	0	0,2
33	[35]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-39679053,31	-18122072784	0	0	0	0,2
33	[36]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-40488522,32	-16844899953	0	0	0	0,2
33	[36]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-40488522,32	-16844899953	0	0	0	0,2
34	[36]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-39135550,52	-10843569001	0	0	0	0,2
34	[36]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-39135550,52	-10843569001	0	0	0	0,2
34	[37]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-39816732,33	-11584548126	0	0	0	0,2
34	[37]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-39816732,33	-11584548126	0	0	0	0,2
35	[37]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-44751713,96	-10842207618	0	0	0	0,2
35	[37]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-44751713,96	-10842207618	0	0	0	0,2
35	[38]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-45029073,73	-10767441892	0	0	0	0,2
35	[38]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-45029073,73	-10767441892	0	0	0	0,2
36	[38]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-44114441,79	-4799434477	0	0	0	0,2
36	[38]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-44114441,79	-4799434477	0	0	0	0,2
36	[39]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-44113706,42	-5433930217	0	0	0	0,2
36	[39]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-44113706,42	-5433930217	0	0	0	0,2
37	[39]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-43777858,66	187280900,1	0	0	0	0,2
37	[39]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-43777858,66	187280900,1	0	0	0	0,2
37	[40]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-44033206,09	-1726466338	0	0	0	0,2
37	[40]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-44033206,09	-1726466338	0	0	0	0,2
38	[40]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-44378251,38	3766422567	0	0	0	0,2
38	[40]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-44378251,38	3766422567	0	0	0	0,2
38	[41]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-45016435,98	-675998067,4	0	0	0	0,2
38	[41]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-45016435,98	-675998067,4	0	0	0	0,2
39	[41]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-51088301,85	331465902,7	0	0	0	0,2
39	[41]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-51088301,85	331465902,7	0	0	0	0,2
39	[42]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-51242842,74	-6162404421	0	0	0	0,2
39	[42]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-51242842,74	-6162404421	0	0	0	0,2
40	[42]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-51243551,22	-6162050452	0	0	0	0,2
40	[42]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-51243551,22	-6162050452	0	0	0	0,2
40	[43]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-51029436,37	-10561767294	0	0	0	0,2
40	[43]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-51029436,37	-10561767294	0	0	0	0,2
41	[43]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-56815900,24	-35737240068	0	0	0	0,2
41	[43]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-56815900,24	-35737240068	0	0	0	0,2
41	[44]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-56705136,49	-30654833900	0	0	0	0,2
41	[44]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-56705136,49	-30654833900	0	0	0	0,2
42	[44]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-56704462,92	-30655170429	0	0	0	0,2
42	[44]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-56704462,92	-30655170429	0	0	0	0,2
42	[45]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-56270518,54	-22295324499	0	0	0	0,2
42	[45]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-56270518,54	-22295324499	0	0	0	0,2
43	[45]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-50674694,26	-23223802081	0	0	0	0,2
43	[45]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-50674694,26	-23223802081	0	0	0	0,2
43	[46]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-50008717,11	-16860571903	0	0	0	0,2
43	[46]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-50008717,11	-16860571903	0	0	0	0,2
44	[46]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-50983712,68	-23335351657	0	0	0	0,2
44	[46]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-50983712,68	-23335351657	0	0	0	0,2
44	[47]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-50311624,43	-18834558541	0	0	0	0,2
44	[47]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-50311624,43	-18834558541	0	0	0	0,2
45	[47]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-45134324,44	-19694048543	0	0	0	0,2
45	[47]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-45134324,44	-19694048543	0	0	0	0,2
45	[48]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-44469366,32	-15857490703	0	0	0	0,2
45	[48]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-44469366,32	-15857490703	0	0	0	0,2
46	[48]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-45610924,62	-22021206870	0	0	0	0,2
46	[48]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-45610924,62	-22021206870	0	0	0	0,2

**Tableau E.2. (suite) Vérification de la fissuration a l'état limite service**

Elem	Part	Top/Bottom	LCom Name	Serviceability Load Type	CHK	N_Ed (N)	M_Ed (N*mm)	S_r,max (mm)	Ep_sm-Ep_cm	Wk (mm)	Wmax (mm)
46	J[49]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-45221321,55	-20999803293	0	0	0	0,2
46	J[49]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-45221321,55	-20999803293	0	0	0	0,2
47	J[49]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-40351073,63	-21812398549	0	0	0	0,2
47	J[49]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-40351073,63	-21812398549	0	0	0	0,2
47	J[50]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-39620024,96	-19488008347	0	0	0	0,2
47	J[50]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-39620024,96	-19488008347	0	0	0	0,2
48	J[50]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-34925207,76	-20268367477	0	0	0	0,2
48	J[50]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-34925207,76	-20268367477	0	0	0	0,2
48	J[51]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-33871706,72	-18057154252	0	0	0	0,2
48	J[51]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-33871706,72	-18057154252	0	0	0	0,2
49	J[51]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-29385085,44	-18802157469	0	0	0	0,2
49	J[51]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-29385085,44	-18802157469	0	0	0	0,2
49	J[52]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-28246499,3	-17460194550	0	0	0	0,2
49	J[52]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-28246499,3	-17460194550	0	0	0	0,2
50	J[52]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-23916092,35	-18179652953	0	0	0	0,2
50	J[53]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-22596943,9	-17675050259	0	0	0	0,2
51	J[53]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-24868220,23	-13620425667	0	0	0	0,2
51	J[53]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-24868220,23	-13620425667	0	0	0	0,2
51	J[54]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-23427329,54	-13675967465	0	0	0	0,2
51	J[54]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-23427329,54	-13675967465	0	0	0	0,2
52	J[54]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-19460790,42	-14334108690	0	0	0	0,2
52	J[54]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-19460790,42	-14334108690	2989,9986	0	0	0,2
52	J[55]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-19389860,63	-12154356648	0	0	0	0,2
52	J[55]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-19389860,63	-12154356648	0	0	0	0,2
53	J[55]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-19389860,63	-12154356648	0	0	0	0,2
53	J[55]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-19389860,63	-12154356648	0	0	0	0,2
53	J[56]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-19319039,43	-10862558289	0	0	0	0,2
53	J[56]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-19319039,43	-10862558289	0	0	0	0,2
54	J[56]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-19319039,43	-10862558289	0	0	0	0,2
54	J[56]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-19319039,43	-10862558289	0	0	0	0,2
54	J[57]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-19309808,12	-10759461956	0	0	0	0,2
54	J[57]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-19309808,12	-10759461956	0	0	0	0,2
55	J[57]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-19309808,13	-10759461971	0	0	0	0,2
55	J[57]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-19309808,13	-10759461971	0	0	0	0,2
55	J[58]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-19277482,6	-10517363557	0	0	0	0,2
55	J[58]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-19277482,6	-10517363557	0	0	0	0,2
56	J[58]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-19277482,6	-10517363557	0	0	0	0,2
56	J[58]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-19277482,6	-10517363557	0	0	0	0,2
56	J[59]	Bottom	cLCB9	Frequent	OK	-19259014,36	-10461937723	0	0	0	0,2
56	J[59]	Top	cLCB9	Frequent	OK	-19259014,36	-10461937723	0	0	0	0,2

## Annexe F

### Vérification de la résistance à la flexion

**Tableau F.1.** Liste des symboles utilisés pour la vérification de la résistance à la flexion

Elm	Numéro d'élément
Part	Emplacement (I-end, J end)
Positive/Negative	Moment positif, moment négatif
LCom Name	Combinaison d'action
Type	Composants MAX/MIN
M Rd	Moment résistant
M <sub>ed</sub> / M <sub>Rd</sub>	Rapport Moment sollicitant/Moment résistant
A <sub>S,min</sub>	Aire de la section minimale d'armatures
Check	OK/NG

Tableau F.2. Vérification de la résistance à la flexion

Elem	Part	Positive/ Negative	LCom Name	Design Situations	Type	CHK	M_Ed (N*mm)	M_Rd (N*mm)	M_Ed/M_Rd	Aps (mm^2)
2	J[4]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	OK	-10421895889	11121115413	0,9371	10800
2	J[4]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0,0014	21646534021	0	10800
2	J[5]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	OK	-10793246813	11109042084	0,9716	10800
2	J[5]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	21658607350	0	10800
3	J[5]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	OK	-10793246813	11109042084	0,9716	10800
3	J[5]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	21658607350	0	10800
3	J[6]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-11832205712	11087860656	1,0671	10800
3	J[6]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	21679788779	0	10800
4	J[6]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-11832205712	11087860656	1,0671	10800
4	J[6]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	21679788779	0	10800
4	J[7]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-12253556349	11081785507	1,1057	10800
4	J[7]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	21685863927	0	10800
5	J[7]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-12253556349	11081785507	1,1057	10800
5	J[7]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	21685863927	0	10800
5	J[8]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-16041208550	11034557876	1,4537	10800
5	J[8]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	21733091558	0	10800
6	J[8]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-16041208550	11034557876	1,4537	10800
6	J[8]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	21733091558	0	10800
6	J[9]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-20806834173	10985398816	1,894	10800
6	J[9]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	21782250619	0	10800
7	J[9]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-20148677695	17689630190	1,139	14400
7	J[9]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	25260734720	0	14400
7	J[10]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-22734925522	20356903689	1,1168	14400
7	J[10]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	22593461221	0	14400
8	J[10]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-26722987988	17539031037	1,5236	14400
8	J[10]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	25452419691	0	14400
8	J[11]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-29922512568	20517546635	1,4584	14400
8	J[11]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	22504200181	0	14400
9	J[11]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-29203017144	27400789878	1,0658	18000
9	J[11]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	25872855665	0	18000
9	J[12]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-33272944412	30485139652	1,0914	18000
9	J[12]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	22828826843	0	18000
10	J[12]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	OK	-32527913196	37189371027	0,8747	21600
10	J[12]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	26088077775	0	21600
10	J[13]	Negative	cLCB1	Persistent & T	FX-MIN	OK	-38403080425	40273720800	0,9536	21600
10	J[13]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	23007616783	0	21600
11	J[13]	Negative	cLCB1	Persistent & T	FX-MIN	OK	-38403080425	46734365039	0,8217	25200
11	J[13]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	26157463163	0	25200
11	J[14]	Negative	cLCB1	Persistent & T	FX-MIN	OK	-47959733519	49818714813	0,9627	25200
11	J[14]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	22594447576	0	25200
12	J[14]	Negative	cLCB1	Persistent & T	FX-MIN	OK	-47959733519	56044782746	0,8557	28800
12	J[14]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	25727868493	0	28800
12	J[15]	Negative	cLCB1	Persistent & T	FX-MIN	OK	-58500071500	59130057011	0,9893	28800
12	J[15]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	20642857592	0	28800
13	J[15]	Negative	cLCB1	Persistent & T	FX-MIN	OK	-58500071500	65122892534	0,8983	28800
13	J[15]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	15619089909	0	28800
13	J[16]	Negative	cLCB1	Persistent & T	FX-MIN	NG	-70024083567	68204599028	1,0267	28800
13	J[16]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	11886652489	0	28800
14	J[16]	Negative	cLCB1	Persistent & T	FX-MIN	OK	-70024083567	73922567623	0,9473	32400
14	J[16]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	14921042590	0	32400
14	J[17]	Negative	cLCB1	Persistent & T	FX-MIN	NG	-82531780522	77006490392	1,0718	32400
14	J[17]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	11225123467	0	32400
15	J[17]	Negative	cLCB1	Persistent & T	FX-MIN	NG	-82531780522	82338098800	1,0024	32400
15	J[17]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	5998471069	0	32400
15	J[18]	Negative	cLCB1	Persistent & T	FX-MIN	NG	-96023151563	85257115895	1,1263	32400
15	J[18]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	3131226149	0	32400
16	J[18]	Negative	cLCB1	Persistent & T	FX-MIN	NG	-96023151563	90143920568	1,0652	36000
16	J[18]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	5767596837	0	36000
16	J[19]	Negative	cLCB1	Persistent & T	FX-MIN	NG	-1,10498E+11	92201337585	1,1984	36000
16	J[19]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	3882719114	0	36000
17	J[19]	Negative	cLCB1	Persistent & T	FX-MIN	NG	-1,10498E+11	92201337585	1,1984	36000
17	J[19]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	3882719114	0	36000
17	J[20]	Negative	cLCB1	Persistent & T	FX-MIN	NG	-1,17433E+11	92337255011	1,2718	36000
17	J[20]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	3771252823	0	36000
18	J[20]	Negative	cLCB4	Persistent & T	-	OK	-68915076964	92337255011	0,7463	36000
18	J[20]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	3771252823	0	36000
18	J[21]	Negative	cLCB4	Persistent & T	-	OK	-64619917329	92201669726	0,7009	36000
18	J[21]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	3882411976	0	36000
19	J[21]	Negative	cLCB4	Persistent & T	-	OK	-64619917329	92201669726	0,7009	36000
19	J[21]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	3882411976	0	36000
19	J[22]	Negative	cLCB4	Persistent & T	-	OK	-55856075618	90144980258	0,6196	36000
19	J[22]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	5766530062	0	36000
20	J[22]	Negative	cLCB4	Persistent & T	-	OK	-55856075618	85258175585	0,6551	32400
20	J[22]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	3130411447	0	32400
20	J[23]	Negative	cLCB4	Persistent & T	-	OK	-47977360694	82340810530	0,5827	32400
20	J[23]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	5995339184	0	32400
21	J[23]	Negative	cLCB4	Persistent & T	-	OK	-47977360694	77009202122	0,623	32400
21	J[23]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	11222972032	0	32400
21	J[24]	Negative	cLCB4	Persistent & T	-	OK	-40983772556	73924185539	0,5544	32400
21	J[24]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	15401446028	0	32400
22	J[24]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	OK	-43774014676	68206216944	0,6418	32400
22	J[24]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	20543132772	0	32400
22	J[25]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	OK	-41701709881	65122892534	0,6404	32400
22	J[25]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	1383714334	24861774526	0,0557	32400
23	J[25]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	OK	-47566915559	59130057011	0,8044	32400
23	J[25]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	1383714334	29967036827	0,0462	32400
23	J[26]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	OK	-46367783594	56044782746	0,8273	32400
23	J[26]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	7603881718	34304090322	0,2217	32400

Tableau F.2. (suite) Vérification de la résistance à la flexion

Elem	Part	Positive/ Negative	LCom Name	Design Situations	Type	CHK	M_Ed (N*mm)	M_Rd (N*mm)	M_Ed/M_Rd	Aps (mm^2)
24	J[26]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	OK	-47185767388	49818714813	0,9471	28800
24	J[26]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	7603881718	31237159636	0,2434	28800
24	J[27]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	OK	-45498775851	46734365039	0,9736	28800
24	J[27]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	13069696815	34568216319	0,3781	28800
25	J[27]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-51278726328	40634318098	1,262	28800
25	J[27]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	13069696815	39578277976	0,3302	28800
25	J[28]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-51738686313	37189371027	1,3912	28800
25	J[28]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	17400146426	43901047120	0,3963	28800
26	J[28]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-52521950875	30844269086	1,7028	25200
26	J[28]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	17400146426	40818729873	0,4263	25200
26	J[29]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-52495784801	27712049518	1,8943	25200
26	J[29]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	20591377649	44051262574	0,4674	25200
27	J[29]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-48401170335	30215361295	1,6019	25200
27	J[29]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	20591377649	41192304105	0,4999	25200
27	J[30]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-48911400757	27211572594	1,7974	25200
27	J[30]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	22640166686	44196092805	0,5123	25200
28	J[30]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-49603618560	21218737072	2,3377	21600
28	J[30]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	22640166686	41046246426	0,5516	21600
28	J[31]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-50649913902	18499193290	2,738	21600
28	J[31]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	23543908036	43765790207	0,538	21600
29	J[31]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-51308055127	12273125358	4,1805	18000
29	J[31]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	23543908036	40506539275	0,5812	18000
29	J[32]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-51820420324	12273125358	4,2223	18000
29	J[32]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	23311094549	40506539275	0,5755	18000
30	J[32]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-51162263846	18499193290	2,7656	21600
30	J[32]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	23311094549	43765790207	0,5326	21600
30	J[33]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-50380389187	21218737069	2,3743	21600
30	J[33]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	21948319626	41046246426	0,5347	21600
31	J[33]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-49688062320	27211572592	1,826	25200
31	J[33]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	21948319626	44196092808	0,4966	25200
31	J[34]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-49444250242	30215361294	1,6364	25200
31	J[34]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	19436653566	41192304105	0,4719	25200
32	J[34]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-53452647267	27712049518	1,9289	25200
32	J[34]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	19436653566	44051262575	0,4412	25200
32	J[35]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-53748673804	30844270528	1,7426	25200
32	J[35]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	15775753469	40818724001	0,3865	25200
33	J[35]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-53189358633	37189371027	1,4302	28800
33	J[35]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	15775753469	43901047120	0,3593	28800
33	J[36]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-53137732783	40634318098	1,3077	28800
33	J[36]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	10965890685	39578277976	0,2771	28800
34	J[36]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-47136401830	46734365039	1,0086	28800
34	J[36]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	10965890685	34568216319	0,3172	28800
34	J[37]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	OK	-49102927936	49818714813	0,9856	28800
34	J[37]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	5007967014	31237156699	0,1603	28800
35	J[37]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	OK	-48360587428	56044782746	0,8629	32400
35	J[37]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	5007967014	34304090323	0,146	32400
35	J[38]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	OK	-49796886932	59130057011	0,8422	32400
35	J[38]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	29967036827	0	32400
36	J[38]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	OK	-43828879518	65122892534	0,673	32400
36	J[38]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	24861774526	0	32400
36	J[39]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	OK	-46112645387	68204599028	0,6761	32400
36	J[39]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	20544401728	0	32400
37	J[39]	Negative	cLCB4	Persistent & T	-	OK	-42295164906	73922567623	0,5722	32400
37	J[39]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	15403363044	0	32400
37	J[40]	Negative	cLCB4	Persistent & T	-	OK	-49463605357	77006490392	0,6423	32400
37	J[40]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	11225123467	0	32400
38	J[40]	Negative	cLCB4	Persistent & T	-	OK	-49463605357	82338098800	0,6007	32400
38	J[40]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	5998471069	0	32400
38	J[41]	Negative	cLCB1	Persistent & T	FX-MIN	OK	-58988709935	85257115895	0,6919	32400
38	J[41]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	3131226149	0	32400
39	J[41]	Negative	cLCB1	Persistent & T	FX-MIN	OK	-58988709935	90143920568	0,6544	36000
39	J[41]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	5767596837	0	36000
39	J[42]	Negative	cLCB1	Persistent & T	FX-MIN	OK	-70584923940	92201337585	0,7656	36000
39	J[42]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	3882719114	0	36000
40	J[42]	Negative	cLCB1	Persistent & T	FX-MIN	OK	-70584923940	92201337585	0,7656	36000
40	J[42]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	3882719114	0	36000
40	J[43]	Negative	cLCB1	Persistent & T	FX-MIN	OK	-76288299993	92337255011	0,8262	36000
40	J[43]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	3771252823	0	36000
41	J[43]	Negative	cLCB1	Persistent & T	FX-MIN	NG	-1,17433E+11	92337255011	1,2718	36000
41	J[43]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	3771252823	0	36000
41	J[44]	Negative	cLCB1	Persistent & T	FX-MIN	NG	-1,10498E+11	92201669726	1,1984	36000
41	J[44]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	3882411976	0	36000
42	J[44]	Negative	cLCB1	Persistent & T	FX-MIN	NG	-1,10498E+11	92201669726	1,1984	36000
42	J[44]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	3882411976	0	36000
42	J[45]	Negative	cLCB1	Persistent & T	FX-MIN	NG	-96023154263	90144980258	1,0652	36000
42	J[45]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	5766530062	0	36000
43	J[45]	Negative	cLCB1	Persistent & T	FX-MIN	NG	-96023154263	85258175585	1,1263	32400
43	J[45]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	3130411447	0	32400
43	J[46]	Negative	cLCB1	Persistent & T	FX-MIN	NG	-82531780522	82340810530	1,0023	32400
43	J[46]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	5995339184	0	32400
44	J[46]	Negative	cLCB1	Persistent & T	FX-MIN	NG	-82531780522	77009202122	1,0717	32400
44	J[46]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	11222972032	0	32400
44	J[47]	Negative	cLCB1	Persistent & T	FX-MIN	OK	-70024086267	73924185539	0,9472	32400
44	J[47]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	14992637390	0	32400
45	J[47]	Negative	cLCB1	Persistent & T	FX-MIN	NG	-70024086267	68206216944	1,0267	28800
45	J[47]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	11958653650	0	28800
45	J[48]	Negative	cLCB1	Persistent & T	FX-MIN	OK	-58500071500	65122892534	0,8983	28800
45	J[48]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	15716811216	0	28800

**Tableau F.2. (suite) Vérification de la résistance à la flexion**

Elem	Part	Positive/ Negative	LCom Name	Design Situations	Type	CHK	M_Ed (N*mm)	M_Rd (N*mm)	M_Ed/M_Rd	Aps (mm^2)
46	I[48]	Negative	cLCB1	Persistent & T	FX-MIN	OK	-58500071500	59130057011	0,9893	28800
46	I[48]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	20740578898	0	28800
46	J[49]	Negative	cLCB1	Persistent & T	FX-MIN	OK	-47959734869	56044782746	0,8557	28800
46	J[49]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	25791484018	0	28800
47	I[49]	Negative	cLCB1	Persistent & T	FX-MIN	OK	-47959734869	49818714813	0,9627	25200
47	I[49]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	22658063101	0	25200
47	J[50]	Negative	cLCB1	Persistent & T	FX-MIN	OK	-38403080425	46734365039	0,8217	25200
47	J[50]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	26177887419	0	25200
48	I[50]	Negative	cLCB1	Persistent & T	FX-MIN	OK	-38403080425	40273720801	0,9536	21600
48	I[50]	Positive	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	23028041040	0	21600
48	J[51]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	OK	-32752888402	37189371027	0,8807	21600
48	J[51]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	26086930251	0	21600
49	I[51]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-33497891619	30485139652	1,0988	18000
49	I[51]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	22827679319	0	18000
49	J[52]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-29300134650	27400789878	1,0693	18000
49	J[52]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	25866985378	0	18000
50	I[52]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-30019593053	20520085157	1,4629	14400
50	I[52]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	22498329894	0	14400
50	J[53]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-26757750359	17540818995	1,5255	14400
50	J[53]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	25448700458	0	14400
51	I[53]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-22703125767	20360622922	1,1151	14400
51	I[53]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	22589741988	0	14400
51	J[54]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-20099980940	17691760165	1,1361	14400
51	J[54]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	25258604746	0	14400
52	I[54]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-20758122165	10987528790	1,8892	10800
52	I[54]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	21780120645	0	10800
52	J[55]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-16018235523	11035696659	1,4515	10800
52	J[55]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	21731952776	0	10800
53	I[55]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-16018235523	11035696659	1,4515	10800
53	I[55]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	21731952776	0	10800
53	J[56]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-12264855095	11082249132	1,1067	10800
53	J[56]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	21685400303	0	10800
54	I[56]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-12264855095	11082249132	1,1067	10800
54	I[56]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	21685400303	0	10800
54	J[57]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-11847948731	11088249404	1,0685	10800
54	J[57]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	21679400031	0	10800
55	I[57]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	NG	-11847948746	11088249404	1,0685	10800
55	I[57]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	21679400031	0	10800
55	J[58]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	OK	-10824466936	11109180502	0,9744	10800
55	J[58]	Positive	cLCB4	Persistent & T	-	OK	0	21658468933	0	10800
56	I[58]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	OK	-10824466936	11109180502	0,9744	10800
56	I[58]	Positive	cLCB4	Persistent & T	-	OK	0	21658468933	0	10800
56	J[59]	Negative	cLCB2	Persistent & T	FX-MIN	OK	-10461937723	11121115413	0,9407	10800
56	J[59]	Positive	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	21646534021	0	10800

## Annexe G

### Vérification de la résistance à l'effort tranchant

**Tableau G.1.** Liste des symboles utilisés pour la vérification de la résistance à l'effort tranchant

Elm	Numéro d'élément
Part	Emplacement (I-end, J end)
Max/Min	Maximum/minimum force de cisaillement
LCom Name	Combinaison d'action
Type	Composantes MAX/MIN
Check	OK/NG
$V_{Ed}$	Effort tranchant sollicitant
$V_{Rd}$	Effort tranchant résistant
$V_{Rd,c}$	Effort tranchant résistant du béton
$V_{Rd,s}$	Effort tranchant résistant des armatures
$V_{Rd,max}$	Effort tranchant résistant maximum
$V_{Ed}/ V_{Rd}$	Rapport effort tranchant sollicitant/effort tranchant résistant

**Tableau G.2. Vérification de la résistance à l'effort tranchant**

Elem	Part	Max/Min	LCom Name	Design Situations	Type	CHK	V_Ed (N)	V_Rd (N)	V_Rd,c (N)	V_Rd,s (N)	V_Rd,max (N)	V_Ed/V_Rd
2	I[4]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	0	7566743,837	7566743,837	0	18103276,42	0
2	J[5]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	617820,4522	7567628,138	7567628,138	0	18104170,29	0,0816
3	I[5]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	617820,4522	7567628,138	7567628,138	0	18104170,29	0,0816
3	J[6]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	1319318,744	7569180,196	7569180,196	0	18105739,4	0,1743
4	I[6]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	1319318,744	7569180,196	7569180,196	0	18105739,4	0,1743
4	J[7]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	1375103,97	7569625,075	7569625,075	0	18106189,23	0,1817
5	I[7]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	1375103,97	7569625,075	7569625,075	0	18106189,23	0,1817
5	J[8]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	1802790,703	7573050,478	7573050,478	0	18109653,61	0,2381
6	I[8]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	1802790,703	7573050,478	7573050,478	0	18109653,61	0,2381
6	J[9]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	2230477,436	7575358,239	7575358,239	0	18111988,52	0,2944
7	I[9]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	1037794,151	6315757,26	6315757,26	0	16943345,73	0,1643
7	J[10]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	2040195,322	6435461,572	6435461,572	0	17045292,43	0,317
8	I[10]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	938838,435	6240819,294	6240819,294	0	16880498,69	0,1504
8	J[11]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	2395559,768	6354428,972	6354428,972	0	16976071,36	0,377
9	I[11]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	1252887,422	6728987,071	6728987,071	0	17303375,89	0,1862
9	J[12]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	2798351,926	6815681,987	6815681,987	0	17381804,36	0,4106
10	I[12]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	1614300,329	7178490,74	7178490,74	0	17720911,28	0,2249
10	J[13]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	3173534,851	7250020,873	7250020,873	0	17789843,5	0,4377
11	I[13]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	1934658,682	7607592,799	7607592,799	0	18144676,62	0,2543
11	J[14]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	3114549,595	7642289,312	7642289,312	0	18190016,41	0,4075
12	I[14]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	1826250,106	7671738,981	7671738,981	0	18548710,73	0,238
12	J[15]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	2764684,214	7671738,981	7671738,981	0	18578280,52	0,3604
13	I[15]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	2464374,145	7671738,981	7671738,981	0	18525161,42	0,3212
13	J[16]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	4149699,171	7671738,981	7671738,981	0	18576128,81	0,5409
14	I[16]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	2782668,505	7671738,981	7671738,981	0	18967591,83	0,3627
14	J[17]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	4549168,304	7671738,981	7671738,981	0	18968894,01	0,593
15	I[17]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	3515845,8	7671738,981	7671738,981	0	20049693,58	0,4583
15	J[18]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	5337518,869	7671738,981	7671738,981	0	20680507,81	0,6957
16	I[18]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	4356499,961	7671738,981	7671738,981	0	20096203,92	0,5679
16	J[19]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	6048080,503	7671738,981	7671738,981	0	20494763,21	0,7884
17	I[19]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	6057680,867	7671738,981	7671738,981	0	20494763,21	0,7896
17	J[20]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	6702406,295	7671738,981	7671738,981	0	20521092,9	0,8736
18	I[20]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	-3339870,977	7671738,981	7671738,981	0	20244446,32	0,4353
18	J[21]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	-2403323,809	7671738,981	7671738,981	0	18710546,23	0,3133
19	I[21]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	-2385069,079	7671738,981	7671738,981	0	18710821,24	0,3109
19	J[22]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	389425,4119	7671738,981	7671738,981	0	18520816,55	0,0508
20	I[22]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	-1418786,271	7671738,981	7671738,981	0	20680735,9	0,1849
20	J[23]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	1715288,89	7671738,981	7671738,981	0	20052794,86	0,2236
21	I[23]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	139296,8267	7671738,981	7671738,981	0	18968894,01	0,0182
21	J[24]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	-2092476,479	7671738,981	7671738,981	0	18968894,01	0,2728
22	I[24]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	1159999,273	7671738,981	7671738,981	0	18968894,01	0,1512
22	J[25]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	-1700376,927	7671738,981	7671738,981	0	18968894,01	0,2216
23	I[25]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	1629393,601	7671738,981	7671738,981	0	18968894,01	0,2124
23	J[26]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	-1306369,74	7671738,981	7671738,981	0	18968894,01	0,1703
24	I[26]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	817282,8486	7671738,981	7671738,981	0	18968894,01	0,1065
24	J[27]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	-910431,1255	7671738,981	7671738,981	0	18968894,01	0,1187
25	I[27]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	-910431,1255	7671738,981	7671738,981	0	18968894,01	0,1187
25	J[28]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	-512539,7359	7671738,981	7671738,981	0	18968894,01	0,0668
26	I[28]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	-512539,7359	7671738,981	7671738,981	0	18968894,01	0,0668
26	J[29]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	-112677,4306	7671738,981	7671738,981	0	18968894,01	0,0147
27	I[29]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	-112677,4306	7671738,981	7671738,981	0	18968894,01	0,0147
27	J[30]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	289171,3152	7671738,981	7671738,981	0	18968894,01	0,0377
28	I[30]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	289171,3152	7671738,981	7671738,981	0	18968894,01	0,0377
28	J[31]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	693018,9892	7671738,981	7671738,981	0	18968894,01	0,0903
29	I[31]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	786447,3343	6123283,668	6123283,668	0	16783437,9	0,1284
29	J[32]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	1192303,555	6117590,241	6117590,241	0	16778783,14	0,1949
30	I[32]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	-29020,1596	6474064,57	6474064,57	0	17078577	0,0045
30	J[33]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	951485,5384	6590519,649	6590519,649	0	17180193,85	0,1444

**Tableau G.2. (suite) Vérification de la résistance à l'effort tranchant**

Elem	Part	Max/Min	LCom Name	Design Situations	Type	CHK	V_Ed (N)	V_Rd (N)	V_Rd,c (N)	V_Rd,s (N)	V_Rd,max (N)	V_Ed/V_Rd
31	J[33]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	-149871,3486	6939495,059	6939495,059	0	17495552,51	0,0216
31	J[34]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	1303664,587	7040279,999	7040279,999	0	17589656,38	0,1852
32	J[34]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	160992,2418	6870523,668	6870523,668	0	17431935,26	0,0234
32	J[35]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	1445581,605	6947782,48	6947782,48	0	17503239,36	0,2081
33	J[35]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	246621,1669	7317321,149	7317321,149	0	17855323,52	0,0337
33	J[36]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	1578866,139	7379646,074	7379646,074	0	17916502,35	0,2139
34	J[36]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	971068,8154	7275174,654	7275174,654	0	17814246,14	0,1335
34	J[37]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	2348148,597	7327959,134	7327959,134	0	17865729,16	0,3204
35	J[37]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	1053883,41	7671738,981	7671738,981	0	18238709,96	0,1374
35	J[38]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	2197181,448	7671738,981	7671738,981	0	18259672,52	0,2864
36	J[38]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	1487470,733	7652596,418	7652596,418	0	18190545,59	0,1944
36	J[39]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	2715749,921	7652542,048	7652542,048	0	18190490,01	0,3549
37	J[39]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	1919276,045	7627670,528	7627670,528	0	18165106,99	0,2516
37	J[40]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	3499570,424	7646587,892	7646587,892	0	18184405,88	0,4577
38	J[40]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	2674087,468	7671738,981	7671738,981	0	19250488,27	0,3486
38	J[41]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	4538328,063	7671738,981	7671738,981	0	19906250,05	0,5916
39	J[41]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	3557309,154	7671738,981	7671738,981	0	19829999,72	0,4637
39	J[42]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	5292937,328	7671738,981	7671738,981	0	20235899,08	0,6899
40	J[42]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	5302537,692	7671738,981	7671738,981	0	20235956,93	0,6912
40	J[43]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	5967837,457	7671738,981	7671738,981	0	20244447,36	0,7779
41	J[43]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	-5119828,295	7671738,981	7671738,981	0	20521092,9	0,6674
41	J[44]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	-4090039,081	7671738,981	7671738,981	0	17837277,41	0,5331
42	J[44]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	-4071784,352	7671738,981	7671738,981	0	17837552,43	0,5308
42	J[45]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	-1299001,745	7671738,981	7671738,981	0	17664524,20	0,1693
43	J[45]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	-3107213,428	7671738,981	7671738,981	0	20483608,21	0,405
43	J[46]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	23331,3984	7671738,981	7671738,981	0	20052794,86	0,0003
44	J[46]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	-1860655,72	7671738,981	7671738,981	0	18671307,05	0,2425
44	J[47]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	1170837,704	7671738,981	7671738,981	0	18925285,72	0,1526
45	J[47]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	-1565567,928	7671738,981	7671738,981	0	18968894,01	0,2041
45	J[48]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	1263870,396	7671738,981	7671738,981	0	18968894,01	0,1647
46	J[48]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	818221,0481	7671738,981	7671738,981	0	18968894,01	0,1067
46	J[49]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	2064857,236	7671738,981	7671738,981	0	18968894,01	0,2692
47	J[49]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	-510861,6077	7671738,981	7671738,981	0	18968894,01	0,0666
47	J[50]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	1340540,532	7671738,981	7671738,981	0	18968894,01	0,1747
48	J[50]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	-1137186,341	7671738,981	7671738,981	0	18968894,01	0,1482
48	J[51]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	1533627,381	7671738,981	7671738,981	0	18968894,01	0,1999
49	J[51]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	-834387,2181	7671738,981	7671738,981	0	18968894,01	0,1088
49	J[52]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	1800364,907	7671738,981	7671738,981	0	18968894,01	0,2347
50	J[52]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	-484862,3566	7671738,981	7671738,981	0	18790222,18	0,0632
50	J[53]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	-1480788,67	7671738,981	7671738,981	0	18590822,44	0,193
51	J[53]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	-242795,8786	7671738,981	7671738,981	0	18934143,86	0,0316
51	J[54]	Max	cLCB2	Persistent & T	FX-MAX	OK	-1095950,936	7671738,981	7671738,981	0	18716341,81	0,1429
52	J[54]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	-1068069,237	5952811,752	5952811,752	0	16645941,59	0,1794
52	J[55]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	-684483,4261	5946066,285	5946066,285	0	16640580,79	0,1151
53	J[55]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	-684483,4261	5946066,285	5946066,285	0	16640580,79	0,1151
53	J[56]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	-300410,5348	5939323,504	5939323,504	0	16635228,2	0,0506
54	J[56]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	-300410,5348	5939323,504	5939323,504	0	16635228,2	0,0506
54	J[57]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	-250254,0165	5938444,041	5938444,041	0	16634530,51	0,0421
55	J[57]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	-250264,5851	5938444,042	5938444,042	0	16634530,51	0,0421
55	J[58]	Max	cLCB1	Persistent & T	FX-MAX	OK	-74727,4502	5935363,374	5935363,374	0	16632087,38	0,0126
56	J[58]	Max	cLCB4	Persistent & T	-	OK	-74727,4502	5935363,374	5935363,374	0	16632087,38	0,0126
56	J[59]	Max	cLCB4	Persistent & T	-	OK	-25624,0523	5933602,606	5933602,606	0	16630691,57	0,0043

## Annexe H

### Vérification de la résistance à l'effort tranchant et torsion

**Tableau H.1.** Liste des symboles utilisés pour la vérification de la résistance à l'effort tranchant et torsion

Elm	Numéro d'élément
Part	Emplacement (I-end, J end)
Max/Min	Maximum/minimum force de cisaillement
LCom Name	Combinaison d'action
Type	Composantes MAX/MIN
Check	OK/NG
$V_{Ed}$	Effort tranchant sollicitant
$V_{Rd}$	Effort tranchant résistant
$V_{Rd,c}$	Effort tranchant résistant du béton
$V_{Rd,s}$	Effort tranchant résistant des armatures
$V_{Rd,max}$	Effort tranchant résistant maximum
$V_{Ed}/ V_{Rd}$	Rapport effort tranchant sollicitant/effort tranchant résistant

Tableau H.2. (suite) Vérification de la résistance à l'effort tranchant et torsion

Elem	Part	Max/Min	LCom Name	Design Situations	Type	CHK	T_Ed (N*mm)	T_Rd,max (N*mm)	V_Ed (N)	V_Rd,max (N)	Ratio
2	I[4]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-0,0008	1,24125E+11	0	18103276,42	0
2	I[4]	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	0,0008	1,24125E+11	0	18103276,42	0
2	I[4]	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-0,0008	1,14086E+11	25947,1019	16639195,81	0,0016
2	J[5]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-468747000	1,24131E+11	100392,4522	18104170,29	0,0093
2	J[5]	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	468747000	1,24131E+11	617820,4522	18104170,29	0,0379
2	J[5]	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-468747000	1,14089E+11	74403,4775	16639642,75	0,0086
3	I[5]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	468747000	1,24131E+11	617820,4522	18104170,29	0,0379
3	I[5]	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	468747000	1,24131E+11	617820,4522	18104170,29	0,0379
3	I[5]	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-468747000	1,14089E+11	74403,4775	16639642,75	0,0086
3	J[6]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	947335500	1,24142E+11	1319318,744	18105739,4	0,0805
3	J[6]	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	947335500	1,24142E+11	1319318,744	18105739,4	0,0805
3	J[6]	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-947335500	1,14095E+11	249922,9624	16640427,31	0,0233
4	I[6]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	947335500	1,24142E+11	1319318,744	18105739,4	0,0805
4	I[6]	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	947335500	1,24142E+11	1319318,744	18105739,4	0,0805
4	I[6]	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-947335500	1,14095E+11	249922,9624	16640427,31	0,0233
4	J[7]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	953896500	1,24145E+11	1375103,97	18106189,23	0,0836
4	J[7]	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	953896500	1,24145E+11	1375103,97	18106189,23	0,0836
4	J[7]	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-953896500	1,14096E+11	300049,2959	16640652,22	0,0264
5	I[7]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	953896500	1,24145E+11	1375103,97	18106189,23	0,0836
5	I[7]	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	953896500	1,24145E+11	1375103,97	18106189,23	0,0836
5	I[7]	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-953896500	1,14096E+11	300049,2959	16640652,22	0,0264
5	J[8]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1004197500	1,24169E+11	1802790,703	18109653,61	0,1076
5	J[8]	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1004197500	1,24169E+11	1802790,703	18109653,61	0,1076
5	J[8]	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1004197500	1,14108E+11	684010,7062	16642384,41	0,0499
6	I[8]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1004197500	1,24169E+11	1802790,703	18109653,61	0,1076
6	I[8]	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1004197500	1,24169E+11	1802790,703	18109653,61	0,1076
6	I[8]	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1004197500	1,14108E+11	684010,7062	16642384,41	0,0499
6	J[9]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1054498500	1,24185E+11	2230477,436	18111988,52	0,1316
6	J[9]	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1054498500	1,24185E+11	2230477,436	18111988,52	0,1316
6	J[9]	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1054498500	1,14116E+11	1067310,507	16643551,86	0,0734
7	I[9]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1054498500	1,28296E+11	-154889,134	18711576,25	0,0165
7	I[9]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1054498500	1,16172E+11	1037794,151	16943345,73	0,0703
7	I[9]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1054498500	1,28296E+11	1095950,936	18711576,25	0,0165
7	J[10]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1104799500	1,29694E+11	1422226,474	18915469,65	0,0837
7	J[10]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1104799500	1,16871E+11	2040195,322	17045292,43	0,1291
7	J[10]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1104799500	1,29694E+11	244850,9744	18915469,65	0,0215
8	I[10]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1104799500	1,27434E+11	1480788,67	18585882,17	0,0883
8	I[10]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1104799500	1,15741E+11	938838,435	16880498,69	0,0652
8	I[10]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1104799500	1,27434E+11	1480788,67	18585882,17	0,0883
8	J[11]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1155100500	1,28744E+11	485044,132	18777027,52	0,0348
8	J[11]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1155100500	1,16396E+11	2395559,768	16976071,36	0,1511
8	J[11]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1155100500	1,28744E+11	485044,132	18777027,52	0,0348
9	I[11]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1155100500	1,3006E+11	-1800300,558	18968894,01	0,1038
9	I[11]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1155100500	1,1864E+11	1252887,422	17303375,89	0,0821
9	I[11]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1155100500	1,3006E+11	-1800300,558	18968894,01	0,1038
9	J[12]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1205401500	1,3006E+11	820092,7153	18968894,01	0,0525
9	J[12]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1205401500	1,19178E+11	2798351,926	17381804,36	0,1711
9	J[12]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1205401500	1,3006E+11	820092,7153	18968894,01	0,0525
10	I[12]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1205401500	1,3006E+11	-1548010,479	18968894,01	0,0909
10	I[12]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1205401500	1,21503E+11	1614300,329	17720911,28	0,1011
10	I[12]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1205401500	1,3006E+11	-1548010,479	18968894,01	0,0909
10	J[13]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1255702500	1,3006E+11	1099922,832	18968894,01	0,0676
10	J[13]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1255702500	1,21976E+11	3173534,851	17789843,5	0,1887
10	J[13]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1255702500	1,3006E+11	1099922,832	18968894,01	0,0676
11	I[13]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1255702500	1,3006E+11	-1377829,506	18968894,01	0,0823
11	I[13]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1255702500	1,24409E+11	1934658,682	18144676,62	0,1167
11	I[13]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1255702500	1,3006E+11	-1377829,506	18968894,01	0,0823
11	J[14]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1306003500	1,3006E+11	511416,5876	18968894,01	0,037
11	J[14]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1306003500	1,24651E+11	3114549,595	18180016,41	0,1818
11	J[14]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1306003500	1,3006E+11	511416,5876	18968894,01	0,037
12	I[14]	T-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1306003500	1,27179E+11	1826250,106	18548710,73	0,1087
12	I[14]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1306003500	1,27179E+11	1826250,106	18548710,73	0,1087
12	I[14]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1306003500	1,3006E+11	-2065182,392	18968894,01	0,1189
12	J[15]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1356304500	1,3006E+11	-658849,9082	18968894,01	0,0452
12	J[15]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1356304500	1,27382E+11	2764684,214	18578280,52	0,1595
12	J[15]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1356304500	1,3006E+11	-658849,9082	18968894,01	0,0452
13	I[15]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1356304500	1,3006E+11	-1259470,046	18968894,01	0,0768
13	I[15]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1356304500	1,27018E+11	2464374,145	18525161,42	0,1437
13	I[15]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1356304500	1,3006E+11	-1259470,046	18968894,01	0,0768
13	J[16]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1406605500	1,3006E+11	1640644,272	18968894,01	0,0973
13	J[16]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1406605500	1,27367E+11	4149699,171	18576128,81	0,2344
13	J[16]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1406605500	1,3006E+11	1640644,272	18968894,01	0,0973
14	I[16]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1406605500	1,3006E+11	-1093417,06	18968894,01	0,0685
14	I[16]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1406605500	1,30051E+11	2782668,505	18967591,83	0,1575
14	I[16]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1406605500	1,3006E+11	-1093417,06	18968894,01	0,0685
14	J[17]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1456906500	1,2835E+11	1969046,805	18719542,94	0,1165
14	J[17]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1456906500	1,3006E+11	4549168,304	18968894,01	0,251
14	J[17]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1456906500	1,2835E+11	1969046,805	18719542,94	0,1165
15	I[17]	T-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1456906500	1,30044E+11	3515845,8	20049693,58	0,1866
15	I[17]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1456906500	1,30044E+11	3515845,8	20049693,58	0,1866
15	I[17]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1456906500	1,3006E+11	-97598,2043	20052211,18	0,0161
15	J[18]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1507207331	1,28488E+11	3075212,202	20430562,46	0,1623
15	J[18]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1507207331	1,3006E+11	5337518,869	20680507,81	0,2697
15	J[18]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1507207331	1,28488E+11	3075212,202	20430562,46	0,1623

Tableau H.2. (suite) Vérification de la résistance à l'effort tranchant et torsion

Elem	Part	Max/Min	LCom Name	Design Situations	Type	CHK	T_Ed (N*mm)	T_Rd,max (N*mm)	V_Ed (N)	V_Rd,max (N)	Ratio
16	18	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1507207331	1,12756E+11	1113174,384	17422431,48	0,0773
16	18	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1507207331	1,3006E+11	4356499,961	20096203,92	0,2284
16	18	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1507207331	1,12756E+11	1113174,384	17422431,48	0,0773
16	19	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1557508331	1,12355E+11	4025799,736	17704865,05	0,2412
16	19	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1557508331	1,3006E+11	6048080,503	20494763,21	0,3071
16	19	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1557508331	1,12355E+11	4025799,736	17704865,05	0,2412
17	19	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1557508331	1,12353E+11	4045000,463	17704575,79	0,2423
17	19	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1557508331	1,3006E+11	6057680,867	20494763,21	0,3075
17	19	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1557508331	1,12353E+11	4045000,463	17704575,79	0,2423
17	20	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1580471831	1,12908E+11	5119641,528	17814854,8	0,3014
17	20	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1580471831	1,3006E+11	6702406,295	20521092,9	0,3388
17	20	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1580471831	1,12908E+11	5119641,528	17814854,8	0,3014
18	20	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1530220009	1,1845E+11	-3433486,089	18689247,93	0,1966
18	20	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1486288821	1,28307E+11	-3339870,977	20244466,32	0,1766
18	20	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1485736354	1,13732E+11	-5824468,642	17944896,91	0,3376
18	21	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1513549703	1,18737E+11	-2403323,809	18710546,23	0,1412
18	21	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1513549703	1,18737E+11	-2403323,809	18710546,23	0,1412
18	21	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1512997235	1,3006E+11	-5089591,318	20494827,55	0,26
19	21	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1513549703	1,18739E+11	-2385069,079	1710821,24	0,1402
19	21	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1513549703	1,18739E+11	-2385069,079	18710821,24	0,1402
19	21	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1512997235	1,3006E+11	-5080463,953	20494827,55	0,2595
19	22	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1480292115	1,19863E+11	389425,4119	18520816,55	0,0334
19	22	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1480292115	1,19863E+11	389425,4119	18520816,55	0,0334
19	22	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1479739648	1,29911E+11	-3417744,364	20073398,04	0,1817
20	22	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1480292115	1,3006E+11	-1418786,271	20680735,9	0,08
20	22	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1480292115	1,3006E+11	-1418786,271	20680735,9	0,08
20	22	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1479739648	1,27011E+11	-4321850,205	20195962,18	0,2256
20	23	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1448499784	1,3006E+11	1715288,89	20052794,86	0,0967
20	23	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1448499784	1,3006E+11	1715288,89	20052794,86	0,0967
20	23	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1447947316	1,26666E+11	-2481280,569	19529530,61	0,1385
21	23	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1448499784	1,3006E+11	139296,8267	18968894,01	0,0185
21	23	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1448499784	1,3006E+11	139296,8267	18968894,01	0,0185
21	23	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1447947316	1,26567E+11	-3269276,601	18459417,44	0,1885
21	24	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1418173384	1,3006E+11	-2092476,479	18968894,01	0,1212
21	24	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1418173384	1,3006E+11	-2092476,479	18968894,01	0,1212
21	24	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1417620916	1,26435E+11	-1689806,934	18440132,43	0,1028
22	24	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1418173384	1,3006E+11	1159999,273	18968894,01	0,0721
22	24	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1418173384	1,3006E+11	1159999,273	18968894,01	0,0721
22	24	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1417620916	1,2661E+11	-2487450,258	18465685,53	0,1459
22	25	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1389113200	1,3006E+11	-1700376,927	18968894,01	0,1003
22	25	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1389113200	1,3006E+11	-1700376,927	18968894,01	0,1003
22	25	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1388560732	1,2661E+11	-1260275,226	18465705,6	0,0792
23	25	T-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1388560732	1,27022E+11	-1983447,34	18525845,99	0,118
23	25	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1388363357	1,3006E+11	1629939,601	18968894,01	0,0966
23	25	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1388560732	1,27022E+11	-1983447,34	18525845,99	0,118
23	26	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1532053582	1,3006E+11	-1306369,74	18968894,01	0,0806
23	26	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1532053582	1,3006E+11	-1306369,74	18968894,01	0,0806
23	26	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1360745501	1,26914E+11	-831671,929	18510049,08	0,0557
24	26	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1486754947	1,3006E+11	-1154076,673	18968894,01	0,0723
24	26	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1191357334	1,3006E+11	817282,8486	18968894,01	0,0522
24	26	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1360745501	1,24393E+11	-2122474,623	18142356,43	0,1279
24	27	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1334725159	1,3006E+11	-910431,1255	18968894,01	0,0583
24	27	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1334725159	1,3006E+11	-910431,1255	18968894,01	0,0583
24	27	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1334172691	1,24039E+11	-747082,0995	18090795,72	0,0521
25	27	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1334725159	1,3006E+11	-910431,1255	18968894,01	0,0583
25	27	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1334725159	1,3006E+11	-910431,1255	18968894,01	0,0583
25	27	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1334172691	1,24608E+11	-1381624,953	18173674,74	0,0867
25	28	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1309394771	1,3006E+11	-512539,7359	18968894,01	0,0371
25	28	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1309394771	1,3006E+11	-512539,7359	18968894,01	0,0371
25	28	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1308842304	1,24276E+11	-27695,587	18125355,04	0,0121
26	28	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1309394771	1,3006E+11	-512539,7359	18968894,01	0,0371
26	28	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1309394771	1,3006E+11	-512539,7359	18968894,01	0,0371
26	28	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1308842304	1,2197E+11	-1216253,65	17788933,93	0,0791
26	29	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1300639431	1,3006E+11	-112677,4306	18968894,01	0,0159
26	29	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1300639431	1,3006E+11	-112677,4306	18968894,01	0,0159
27	29	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1300086963	1,22617E+11	-1080321,653	17883318,28	0,071
27	30	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1325864771	1,3006E+11	289171,3152	18968894,01	0,0254
27	30	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1325864771	1,3006E+11	289171,3152	18968894,01	0,0254
27	30	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1325312304	1,21924E+11	406658,9565	17782354,51	0,0337
28	30	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1325864771	1,3006E+11	289171,3152	18968894,01	0,0254
28	30	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1325864771	1,3006E+11	289171,3152	18968894,01	0,0254
28	30	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1325312304	1,19763E+11	-694524,5839	17467045,53	0,0508
28	31	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1352332703	1,3006E+11	693018,9892	18968894,01	0,0469
28	31	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1352332703	1,3006E+11	693018,9892	18968894,01	0,0469
28	31	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1351780235	1,19018E+11	318192,9789	17358444,39	0,0297
29	31	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1352332703	1,3006E+11	693018,9892	18968894,01	0,0469
29	31	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1308401515	1,15075E+11	786447,3343	16783437,9	0,0582
29	31	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1307849047	1,3006E+11	-996529,9733	18968894,01	0,0626
29	32	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1380042887	1,3006E+11	1098875,21	18968894,01	0,0685
29	32	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1336111699	1,15044E+11	1192303,555	16778783,14	0,0827
29	32	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-133559232	1,3006E+11	-589861,7274	18968894,01	0,0414
30	32	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1380042887	1,3006E+11	1098875,21	18968894,01	0,0685
30	32	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1336111699	1,17099E+11	-29020,1596	17078577	0,0131
30	32	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-133559232	1,3006E+11	-589861,7274	18968894,01	0,0414
30	33	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1408995409	1,3006E+11	209367,6587	18968894,01	0,0219
30	33	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1365064221	1,17796E+11	951485,5384	17180193,85	0,067
30	33	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1364511754	1,3006E+11	-185208,7784	18968894,01	0,0203

Tableau H.2. (suite) Vérification de la résistance à l'effort tranchant et torsion

Elem	Part	Max/Min	LCom Name	Design Situations	Type	CHK	T_Ed (N*m)	T_Rd,max (N*mm)	V_Ed (N)	V_Rd,max (N)	Ratio
31	I[33]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1408995409	1,3006E+11	1506746,728	18968894,01	0,0903
31	I[33]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1365064221	1,19958E+11	-149871,3486	1749552,51	0,0199
31	I[33]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1364511754	1,3006E+11	-185208,7784	18968894,01	0,0203
31	J[34]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1439190353	1,3006E+11	489457,8975	18968894,01	0,0369
31	J[34]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1395259165	1,20603E+11	1303664,587	17589656,38	0,0857
31	J[34]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1394706697	1,3006E+11	217424,9081	18968894,01	0,0222
32	I[34]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1439190353	1,3006E+11	-1795886,793	18968894,01	0,1057
32	I[34]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1395259165	1,19522E+11	160992,2418	17431935,26	0,0209
32	I[34]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1394706697	1,3006E+11	217424,9081	18968894,01	0,0222
32	J[35]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1470627634	1,3006E+11	313644,9633	18968894,01	0,0278
32	J[35]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1426696446	1,20011E+11	1445581,605	17503239,36	0,0945
32	J[35]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1426143979	1,3006E+11	618038,3196	18968894,01	0,0435
33	I[35]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1470627634	1,3006E+11	-2084275,914	18968894,01	0,1212
33	I[35]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1426696446	1,22425E+11	246621,1669	17855323,52	0,0255
33	I[35]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1426143979	1,3006E+11	618038,3196	18968894,01	0,0435
33	J[36]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1503307421	1,3006E+11	118608,2098	18968894,01	0,0178
33	J[36]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1459376234	1,22844E+11	1578866,139	17916502,35	0,1
33	J[36]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1458823766	1,3006E+11	1016633,312	18968894,01	0,0648
34	I[36]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1503307421	1,3006E+11	-1096986,437	18968894,01	0,0694
34	I[36]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1459376234	1,22143E+11	971068,8154	17814246,14	0,0665
34	I[36]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1458823766	1,3006E+11	1016633,312	18968894,01	0,0648
34	J[37]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1708354231	1,3006E+11	1193681,103	18968894,01	0,0761
34	J[37]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1493298190	1,22496E+11	2348148,597	17865729,16	0,1436
34	J[37]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1321620869	1,3006E+11	-708863,8566	18968894,01	0,0475
35	I[37]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1673126412	1,29998E+11	1413214,443	18959873,42	0,0874
35	I[37]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1493298190	1,25053E+11	1053883,41	18238709,96	0,0697
35	I[37]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1673126412	1,29998E+11	1413214,443	18959873,42	0,0874
35	J[38]	T-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1571841710	1,27084E+11	223908,4696	18534892,09	0,0244
35	J[38]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1528462990	1,25197E+11	2197181,448	18259672,52	0,1325
35	J[38]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1559196135	1,29279E+11	-1546829,308	18855060,6	0,0941
36	I[38]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1572394178	1,3006E+11	-992977,7589	18968894,01	0,0644
36	I[38]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1528462990	1,24723E+11	1487470,733	18190545,59	0,094
36	I[38]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1527910522	1,3006E+11	1807789,557	18968894,01	0,1071
36	J[39]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1608803678	1,3006E+11	996545,2651	18968894,01	0,0649
36	J[39]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1564872490	1,24723E+11	2715749,921	18190490,01	0,1618
36	J[39]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1564320022	1,3006E+11	-1051183,757	18968894,01	0,0674
37	I[39]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1608803678	1,3006E+11	-596402,4868	18968894,01	0,0438
37	I[39]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1564872490	1,24549E+11	1919276,045	18165106,99	0,1182
37	I[39]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1564320022	1,3006E+11	2200368,866	18968894,01	0,128
37	J[40]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1646479140	1,3006E+11	2095499,53	18968894,01	0,1231
37	J[40]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1602547952	1,24681E+11	3499570,424	18184405,88	0,2053
37	J[40]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1601995485	1,3006E+11	-30319,314	18968894,01	0,0139
38	I[40]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1646479140	1,3006E+11	444533,6195	20052211,18	0,0348
38	I[40]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1602547952	1,2486E+11	2674087,468	19250488,27	0,1517
38	I[40]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1601995485	1,3006E+11	-1681285,224	20052211,18	0,0962
38	J[41]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1685621040	1,3006E+11	3702760,551	20680507,81	0,192
38	J[41]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1641689985	1,25191E+11	4538328,063	19906250,05	0,2411
38	J[41]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1641137385	1,29312E+11	1495318,218	20561609,58	0,0854
39	I[41]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1685621040	1,18297E+11	1740722,733	18278715,26	0,1095
39	I[41]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1641689985	1,28337E+11	3557309,154	19829999,72	0,1922
39	I[41]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1641137385	1,1358E+11	-466719,5997	17549776,02	0,041
39	J[42]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1726227859	1,17897E+11	4740244,716	18578131,13	0,2698
39	J[42]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1682296671	1,28417E+11	5292937,328	20235899,08	0,2747
39	J[42]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1681744204	1,13179E+11	2447751,666	17834735,15	0,1521
40	I[42]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1726227859	1,17895E+11	4759445,443	18577841,86	0,2708
40	I[42]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1682296671	1,28418E+11	5302537,692	20235956,93	0,2751
40	I[42]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1681744204	1,13178E+11	2466952,393	17834445,89	0,1532
40	J[43]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1746253253	1,1845E+11	5874222,345	18689242,76	0,3291
40	J[43]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1702322065	1,28307E+11	5967837,457	20244447,36	0,3081
40	J[43]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1701765957	1,13732E+11	3541794,439	17944891,74	0,2123
41	I[43]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1580472000	1,12908E+11	-6702593,061	17814854,8	0,3902
41	I[43]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1580472000	1,3006E+11	-5119828,295	20521092,9	0,2616
41	I[43]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1580472000	1,12908E+11	-6702593,061	17814854,8	0,3902
41	J[44]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1557508331	1,13195E+11	-5653055,581	17837277,41	0,3307
41	J[44]	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1557508331	1,13195E+11	-4090039,081	17837277,41	0,2431
41	J[44]	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1557508331	1,3006E+11	-608200,176	20494827,55	0,3086
42	I[44]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1557508331	1,13197E+11	-5634800,852	17837552,43	0,3297
42	I[44]	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1557508331	1,13197E+11	-4071784,352	17837552,43	0,242
42	I[44]	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1557508331	1,3006E+11	-6071072,811	20494827,55	0,3082
42	J[45]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1507207500	1,14321E+11	-2819169,245	17664524,02	0,1728
42	J[45]	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1507207500	1,14321E+11	-1299001,745	17664524,02	0,0867
42	J[45]	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1507207500	1,3006E+11	-4449413,641	20096409,2	0,233
43	I[45]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1507207500	1,2882E+11	-4627380,928	20483608,21	0,2376
43	I[45]	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1507207500	1,2882E+11	-3107213,428	20483608,21	0,1634
43	I[45]	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1507207500	1,3006E+11	-5353519,482	20680735,9	0,2705
43	J[46]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1456906500	1,3006E+11	-1453987,102	20052794,86	0,0837
43	J[46]	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1456906500	1,3006E+11	23331,3984	20052794,86	0,0124
43	J[46]	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1456906500	1,29963E+11	-3552979,203	20037813,3	0,1885
44	I[46]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1456906500	1,2802E+11	-3337974,22	18671307,05	0,1902
44	I[46]	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1456906500	1,2802E+11	-1860655,72	18671307,05	0,111
44	I[46]	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1456906500	1,3006E+11	-4494972,762	18968894,01	0,2482
44	J[47]	T-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1406605500	1,3006E+11	-1309488,683	18968894,01	0,0798
44	J[47]	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1406605500	1,29761E+11	1170837,704	18925285,72	0,0727
44	J[47]	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1406605500	1,3006E+11	-2743958,183	18968894,01	0,1555
45	I[47]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1406605500	1,3006E+11	-3000037,428	18968894,01	0,169
45	I[47]	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1406605500	1,3006E+11	-1565567,928	18968894,01	0,0933
45	I[47]	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1406605500	1,27437E+11	-4112160,999	18586320,7	0,2323
45	J[48]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1356304500	1,3006E+11	-127750,1038	18968894,01	0,0172
45	J[48]	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1356304500	1,3006E+11	1263870,396	18968894,01	0,0771
45	J[48]	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1356304500	1,27092E+11	-2462173,97	18536063,85	0,1435

Tableau H.2. (suite) Vérification de la résistance à l'effort tranchant et torsion

Elem	Part	Max/Min	LCom Name	Design Situations	Type	CHK	T_Ed (N*mm)	T_Rd,max (N*mm)	V_Ed (N)	V_Rd,max (N)	Ratio
46	I[48]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1356304500	1,3006E+11	-573399,4519	18968894,01	0,0407
46	I[48]	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1356304500	1,3006E+11	818221,0481	18968894,01	0,0536
46	I[48]	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1356304500	1,27684E+11	-2684998,644	18622341,65	0,1548
46	J[49]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1306003331	1,3006E+11	716085,8203	18968894,01	0,0478
46	J[49]	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1306003331	1,3006E+11	2064857,236	18968894,01	0,1189
46	J[49]	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1306003331	1,27482E+11	-1826412,599	18592895,85	0,1085
47	I[49]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1306003331	1,3006E+11	-1859633,023	18968894,01	0,1081
47	I[49]	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1306003331	1,3006E+11	-510861,6077	18968894,01	0,037
47	I[49]	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1306003331	1,24958E+11	-3114272,021	18224807,56	0,1813
47	J[50]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1255702500	1,3006E+11	34618,0317	18968894,01	0,0115
47	J[50]	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1255702500	1,3006E+11	1340540,532	18968894,01	0,0803
47	J[50]	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1255702500	1,24579E+11	-1953303,169	18169555,66	0,1176
48	I[50]	T-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1255702500	1,22146E+11	-1886244,106	17814726,24	0,1162
48	I[50]	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1255702500	1,3006E+11	-1137186,341	18968894,01	0,0696
48	I[50]	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1255702500	1,22146E+11	-3192166,606	17814726,24	0,1895
48	J[51]	T-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1205401416	1,21601E+11	-358418,3778	17735103,72	0,0301
48	J[51]	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1205401416	1,3006E+11	1533627,381	18968894,01	0,0901
48	J[51]	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1205401416	1,21601E+11	-1621491,878	17735103,72	0,1013
49	I[51]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1205401416	1,3006E+11	-2097460,718	18968894,01	0,1198
49	I[51]	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1205401416	1,3006E+11	-834387,2181	18968894,01	0,0533
49	I[51]	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1205401416	1,19276E+11	-2805499,177	17396009,53	0,1714
49	J[52]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1155100500	1,3006E+11	580140,4073	18968894,01	0,0395
49	J[52]	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1155100500	1,3006E+11	1800364,907	18968894,01	0,1038
49	J[52]	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1155100500	1,18685E+11	-1252855,248	17309956,37	0,0821
50	I[52]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1155100500	1,28835E+11	-1705086,857	18790222,18	0,0997
50	I[52]	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1155100500	1,28835E+11	-484862,3566	18790222,18	0,0348
50	I[52]	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1155100500	1,16441E+11	-2395468,88	16982668,7	0,151
50	J[53]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1104799500	1,27468E+11	782195,7023	18590822,44	0,0507
50	J[53]	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1104799500	1,27468E+11	-1480788,67	18590822,44	0,0883
50	J[53]	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1104799500	1,15758E+11	-937984,2337	16882968,82	0,0651
51	I[53]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1104799500	1,29822E+11	-1420171,379	18934143,86	0,0835
51	I[53]	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1104799500	1,29822E+11	-242795,8786	18934143,86	0,0213
51	I[53]	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1104799500	1,16935E+11	-2039167,774	17054629,53	0,129
51	J[54]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1054498416	1,28328E+11	156348,4631	18716341,81	0,0166
51	J[54]	V-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1054498416	1,28328E+11	-1095950,936	18716341,81	0,0668
51	J[54]	V-Min	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1054498416	1,16188E+11	-1037064,444	16945728,51	0,0703
52	I[54]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1054498416	1,24217E+11	-2230477,352	18116767,97	0,1316
52	I[54]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1054498416	1,14133E+11	-1068069,237	16645941,59	0,0734
52	I[54]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1054498416	1,24217E+11	-2230477,352	18116767,97	0,1316
52	J[55]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1004197500	1,24144E+11	-1802790,703	18106046,37	0,1077
52	J[55]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1004197500	1,14096E+11	-684483,4261	16640580,79	0,0499
52	J[55]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1004197500	1,24144E+11	-1802790,703	18106046,37	0,1077
53	I[55]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1004197500	1,24144E+11	-1802790,703	18106046,37	0,1077
53	I[55]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	1004197500	1,14096E+11	-684483,4261	16640580,79	0,0499
53	I[55]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-1004197500	1,24144E+11	-1802790,703	18106046,37	0,1077
53	J[56]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-953896415,6	1,2407E+11	-1375103,97	18095341,19	0,0837
53	J[56]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	953896415,6	1,14059E+11	-300410,5348	16635228,2	0,0264
53	J[56]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-953896415,6	1,2407E+11	-1375103,97	18095341,19	0,0837
54	I[56]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-953896415,6	1,2407E+11	-1375103,97	18095341,19	0,0837
54	I[56]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	953896415,6	1,14059E+11	-300410,5348	16635228,2	0,0264
54	I[56]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-953896415,6	1,2407E+11	-1375103,97	18095341,19	0,0837
54	J[57]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-947335500	1,24061E+11	-1319318,744	18093945,8	0,0806
54	J[57]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	947335500	1,14054E+11	-250254,0165	16634530,51	0,0234
54	J[57]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-947335500	1,24061E+11	-1319318,744	18093945,8	0,0806
55	I[57]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	947335500	1,24061E+11	-276079,2435	18093945,8	0,0229
55	I[57]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	947335500	1,14054E+11	-250264,5851	16634530,51	0,0234
55	I[57]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-947335500	1,24061E+11	-1319318,744	18093945,8	0,0806
55	J[58]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	468746957,8	1,24027E+11	-100392,4522	18089059,54	0,0093
55	J[58]	V-Max	cLCB1	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	468746957,8	1,14038E+11	-74727,4502	16632087,38	0,0086
55	J[58]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-468746957,8	1,24027E+11	-167820,4522	18089059,54	0,0379
56	I[58]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	468746957,8	1,24027E+11	-100392,4522	18089059,54	0,0093
56	I[58]	V-Max	cLCB4	Persistent & Transient	-	OK	0,0015	1,14038E+11	-74727,4502	16632087,38	0,0045
56	I[58]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	-468746957,8	1,24027E+11	-617820,4522	18089059,54	0,0379
56	J[59]	T-Max	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MAX	OK	0,0019	1,24008E+11	0	18086267,92	0
56	J[59]	V-Max	cLCB4	Persistent & Transient	-	OK	0,0015	1,14028E+11	-25624,0523	16630691,57	0,0015
56	J[59]	V-Min	cLCB2	Persistent & Transient	MZ-MIN	OK	0,001	1,24008E+11	0	18086267,92	0

## Annexe I

### Pertes de précontrainte en phase d'exploitation pour le groupe de câbles P1-gauche

**Tableau I.1. Pertes de précontrainte en phase d'exploitation**

Elem	Part	Pertes instantanées (kN)	pertes de déformation élastique (kN)	Force(Elastic Loss)/ Force(Immediate Loss)	Pertes dues au retrait/fluage du béton (kN)	Pertes dues à la relaxation des câbles (kN)	Force/ Pertes instantanées
<b>Tendon Group</b>		<b>P1 GAUCHE</b>	<b>Stage</b>	<b>POSTCS</b>			
1	I	2924,7106	17,7746	1,0061	-266,4696	-349,9768	0,7953
1	J	2989,7675	22,432	1,0075	-263,9549	-369,9713	0,7955
2	I	2989,7137	22,4731	1,0075	-263,9089	-369,9544	0,7955
2	J	3055,5906	28,3377	1,0093	-266,2058	-391,1755	0,7941
3	I	3055,4668	28,3736	1,0093	-266,159	-391,1347	0,7942
3	J	3126,5973	34,1715	1,0109	-268,0647	-415,1982	0,7924
4	I	3126,4709	34,2048	1,0109	-268,0184	-415,1544	0,7924
4	J	3195,9201	39,0225	1,0122	-268,6054	-439,8548	0,7905
5	I	3195,7952	39,0368	1,0122	-268,579	-439,8093	0,7906
5	J	3165,1756	40,3352	1,0127	-260,716	-428,7694	0,7949
6	I	3165,0541	40,3236	1,0127	-260,7176	-428,7261	0,7949
6	J	3099,2674	39,1996	1,0126	-249,4921	-405,8075	0,8012
7	I	3099,2085	39,1885	1,0126	-249,4988	-405,7875	0,8012
7	J	3046,8806	37,2842	1,0122	-241,5368	-388,3119	0,8055
8	I	3046,8785	37,271	1,0122	-241,5514	-388,3112	0,8055
8	J	2996,3006	35,0982	1,0117	-238,9485	-372,0314	0,8078
9	I	2996,2858	35,0782	1,0117	-238,9699	-372,0267	0,8078
9	J	2944,5055	32,5696	1,0111	-241,4932	-355,9617	0,8082
10	I	2944,4961	32,5421	1,0111	-241,523	-355,9589	0,8081
10	J	2883,2414	29,7692	1,0103	-249,1508	-337,7127	0,8068
11	I	2882,9828	29,7239	1,0103	-249,1785	-337,6374	0,8068
11	J	2773,1925	23,9377	1,0086	-249,1281	-306,8972	0,8081
12	I	2772,8316	23,8887	1,0086	-249,1443	-306,8002	0,8081
12	J	2684,4143	16,0095	1,006	-238,7528	-283,7751	0,8113
13	I	2683,9547	15,9664	1,0059	-238,7793	-283,6592	0,8113
13	J	2592,5751	9,5675	1,0037	-224,8426	-261,3858	0,8161
14	I	2592,1771	9,5266	1,0037	-224,8734	-261,292	0,8161
14	J	2496,7853	9,2054	1,0037	-216,767	-239,5922	0,8209
15	I	2496,7376	9,1842	1,0037	-216,7886	-239,5818	0,8209
15	J	2379,0215	16,686	1,007	-222,1281	-214,8365	0,8233
16	I	2378,1702	16,6193	1,007	-222,1398	-214,6654	0,8233
16	J	2242,1159	21,5308	1,0096	-210,384	-188,6679	0,8316
17	I	2241,4799	21,4673	1,0096	-210,4267	-188,5525	0,8316
17	J	2159,322	14,6258	1,0068	-215,2792	-174,1043	0,8264
18	I	2158,8821	14,61	1,0068	-215,2846	-174,0294	0,8264
18	J	2081,5233	9,3527	1,0045	-210,8295	-161,2296	0,8257
19	I	2080,9747	-9,1402	0,9956	-234,8775	-161,1415	0,8053
19	J	2027,5101	-12,7445	0,9937	-234,4143	-152,7307	0,8028
20	I	2027,4951	-12,7824	0,9937	-234,4497	-152,7284	0,8027
20	J	1999,6118	-9,5124	0,9952	-244,1868	-148,477	0,7989

# Annexe J

## Tracé des câbles de précontrainte

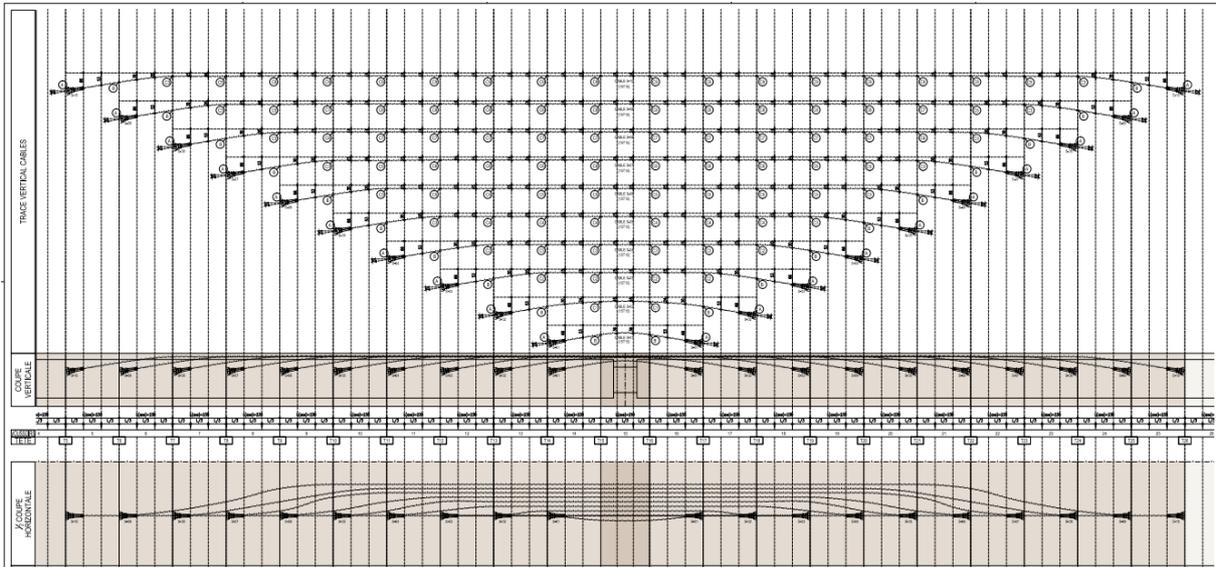


Figure J.1. Tracé des câbles de fléau

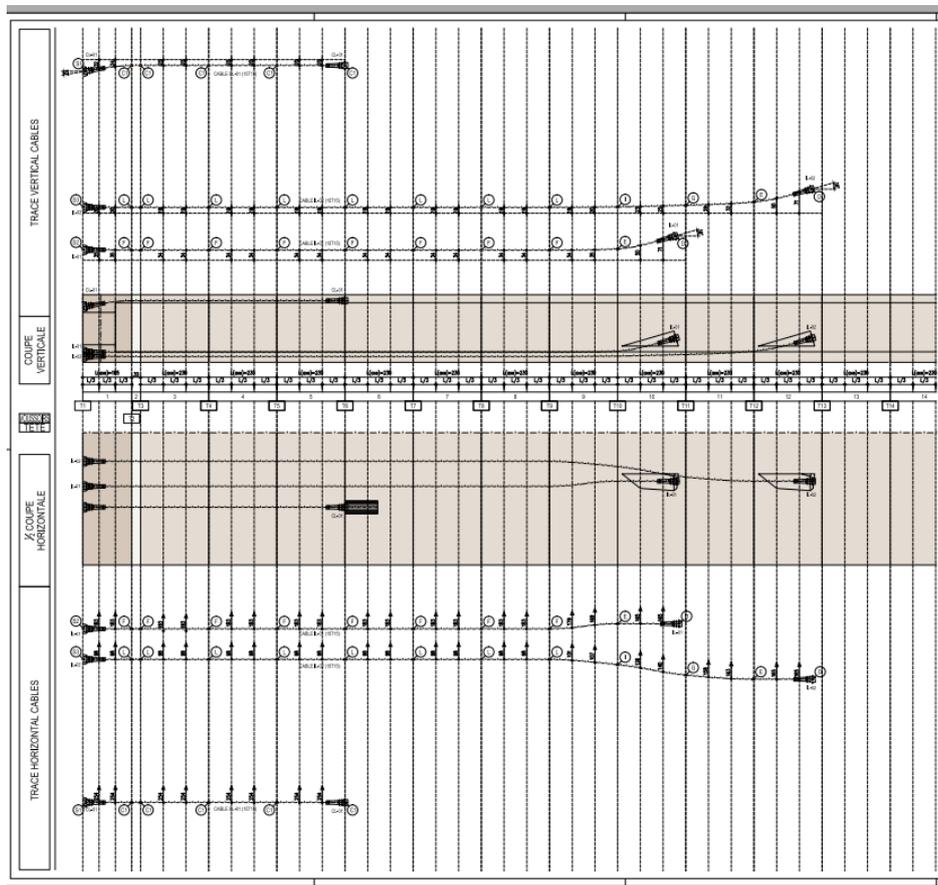
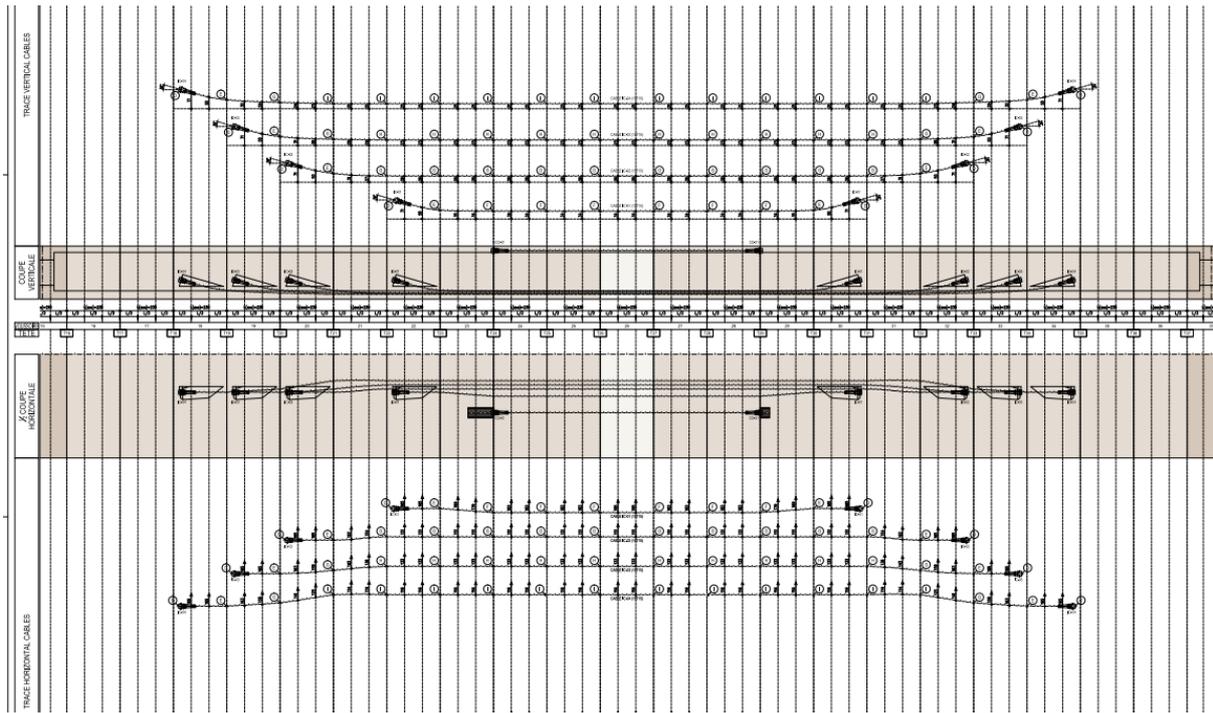


Figure J.2. Tracé des câbles de continuité ente P1-C1



**Figure J.3.** Tracée des câbles de continuité ente P1-P2