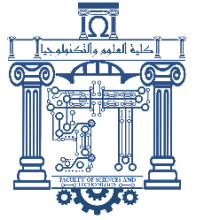




الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
Republique Algerienne Democratique Et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



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'art**

**Par : CHORFI Mohamed Oussama**

**Sujet**

# CALCUL A LA FATIGUE D'UN PONT MIXTE SUIVANT LES EUROCODES

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

M. Labeled Abderahim

Maitre de conférences B

Président

M. Boursas Farid

Maitre-Assistant A

Examineur

M. Soltani Mohammed Ridha

Maitre de conférences B

Rapporteur

Promotion : 2020/2021

# REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en premier lieu ALLAH qui m'a donné la puissance pour  
achever ce travail.

Je tiens aussi à remercier toute l'équipe pédagogique de la faculté des sciences  
et de la technologie de l'université de Tébessa et les intervenants professionnels  
responsables de la formation génie civil.

Je remercie mon encadreur Monsieur Soltani Mohamed Rédha qui n'a pas cessé  
de m'encourager pendant la durée du projet, ainsi pour sa générosité en matière  
de formation et d'encadrement.

J'ai bénéficié, grâce à lui, un enseignant vrai, non seulement sur le plan  
scientifique, mais aussi sur le plan humain. Ce travail a abouti grâce à l'énorme  
temps qu'il m'a consacré, à ses qualités sur le plan scientifique et humain.

Qu'il trouve ici l'expression de mes sincères gratitudee.

Mes plus vifs remerciements s'adressent également à M<sub>r</sub> Labed Abderrahim  
pour m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence du jury.

Que M<sub>r</sub> Boursas Farid, reçoit l'expression de mes profondes reconnaissances  
pour avoir accepté d'examiner de ce travail.

# TABLE DES MATIERES

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Remerciement</b> .....   | <b>i</b>    |
| <b>Liste des symboles</b> .....   | <b>vi</b>   |
| <b>Liste des Tableaux</b> .....   | <b>viii</b> |
| <b>Liste des Figures</b> .....  | <b>x</b>    |
| <b>RESUME</b> .....   | <b>xiv</b>  |
| <b>ABSTRACT</b> .....   | <b>xv</b>   |
| <b>ملخص</b> .....   | <b>xvi</b>  |
| <b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....  | <b>1</b>    |
| <b>CHAPITRE 1</b> .....   | <b>2</b>    |
| <b>GENERALITES SUR LA FATIGUE DES MATERIAUX ET DES STRUCTURES</b> .....     | <b>2</b>    |
| 1.1. Description du phénomène de fatigue .....                              | 2           |
| 1.2. Chargement cyclique .....  | 3           |
| 1.2.1. Chargement à amplitude constante .....                               | 3           |
| 1.2.2. Chargement à amplitude variable .....                                | 4           |
| 1.2.2.1. Méthode du réservoir .....   | 5           |
| 1.2.2.2. Méthode de la goutte d'eau .....                                   | 6           |
| 1.3. Courbe Wöhler .....  | 7           |
| 1.4. Les paramètres d'influençant la fatigue .....                          | 8           |
| 1.4.1. Paramètres d'ordre métallurgique .....                               | 8           |
| 1.4.2. Paramètres d'ordre mécanique et géométrique .....                    | 9           |
| 1.4.3. Environnement .....  | 10          |
| 1.4.4. Influence de la contrainte moyenne .....                             | 10          |
| 1.4.4.1. Diagramme de Haig .....  | 12          |
| 1.4.4.2. Diagramme de RÖS .....   | 14          |
| 1.4.4.3. Diagramme de MOORE-KOOMERS-JASPER .....                            | 14          |
| 1.5. Amorçage des fissures de fatigue .....                                 | 14          |
| 1.6. Les critères de fatigue multiaxiaux périodiques .....                  | 16          |
| 1.7. Les lois d'endommagement de fatigue .....                              | 17          |
| 1.8. Dispositions constructives des ponts métalliques .....                 | 17          |
| 1.8.1. Montants verticaux courants .....                                    | 17          |
| 1.8.1.1. Les raidisseurs d'âme .....  | 18          |
| 1.8.1.2. Les montants des cadres d'entretoisement avec entretoises .....    | 18          |
| 1.8.1.3. Les montants des cadres d'entretoisement avec pièces de pont ..... | 19          |

|  |           |
|--|-----------|
| 1.8.2. Montant d'appui - platines d'appui.....   | 20        |
| 1.8.3. Pièces de pont et entretoises .....   | 20        |
| 1.8.4. Raidisseurs longitudinaux.....  | 21        |
| <b>CHAPITRE 2.....</b>   | <b>22</b> |
| <b>Vérifications à la fatigue des ponts-routes selon les Eurocodes .....</b>                           | <b>22</b> |
| 2.1. Introduction .....  | 22        |
| 2.2. Charges de fatigue et combinaisons de charges .....   | 23        |
| 2.2.1. Les différents modèles de charge .....  | 23        |
| 2.2.1.1. Modèle de charge de fatigue 1 (analogue FLM1) .....   | 23        |
| 2.2.1.2. Modèle de charge de fatigue 2 (analogue FLM2) .....   | 23        |
| 2.2.1.4. Modèle de charge de fatigue 4 (analogue FLM4) .....   | 25        |
| 2.2.1.5. Modèle de charge de fatigue 5 (élaboré à partir de données de trafic routier enregistré)..... | 27        |
| 2.2.2. Positionnement des charges de fatigue .....   | 27        |
| 2.2.3. Trafic concomitant.....   | 28        |
| 2.2.4. Combinaison d'actions de fatigue et trafic concomitant .....                                    | 28        |
| 2.3. Justifications à l'ELU de fatigue des ponts mixtes .....  | 29        |
| 2.3.1. Méthode des étendues de contraintes équivalentes .....  | 30        |
| 2.3.1.1. Format général de vérification .....  | 30        |
| 2.3.1.2. Justification de la charpente .....   | 30        |
| 2.3.1.3. Justification du hourdis .....  | 44        |
| 2.3.1.4. Justification de la connexion .....   | 46        |
| 2.3.2. Méthode générale .....  | 49        |
| 2.3.2.1. Spectre des étendues de contrainte.....   | 49        |
| 2.3.2.2. Méthode Palmgren-Miner .....  | 50        |
| 2.3.2.3. Critères de vérification des Eurocodes.....   | 51        |
| <b>CHAPITRE 3.....</b>   | <b>53</b> |
| <b>Application à un bipoutre mixte .....</b>   | <b>53</b> |
| 3.1. Présentation de l'ouvrage .....   | 53        |
| 3.1.1. Description du tablier .....  | 53        |
| 3.1.2. Répartition des matières .....  | 54        |
| 3.2. Données du trafic .....   | 55        |
| 3.3. Matériaux .....   | 56        |
| 3.3.1. Caractéristique mécanique des aciers .....  | 56        |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.3.2. Béton.....   | 56        |
| 3.3.3. Armatures passives .....   | 57        |
| 3.3.4. Connecteurs .....  | 57        |
| 3.4. Actions et combinaisons d'actions .....  | 57        |
| 3.4.1. Actions permanentes.....   | 57        |
| 3.4.2. Gradient de température .....  | 58        |
| 3.5. Modélisation du tablier.....   | 58        |
| 3.5.1. Introduction des données .....   | 59        |
| 3.5.1.1. Géométrie .....  | 59        |
| 3.5.1.2. Maillage.....  | 60        |
| 3.5.1.3. Conditions aux limites et chargement .....   | 62        |
| 3.6. Justification à la fatigue.....  | 63        |
| 3.6.1. Sollicitations sous combinaison cyclique et non cyclique.....                                    | 63        |
| 3.6.2. Caractéristiques géométriques .....  | 66        |
| 3.6.3. Catégories de détail étudiées .....  | 67        |
| 3.6.4. Justification par la méthode simplifiée des étendues de contrainte équivalentes .....            | 70        |
| 3.6.5. Justification par la méthode Palmgren-Miner .....  | 73        |
| <b>Conclusion.....</b>  | <b>81</b> |
| <b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>   | <b>83</b> |
| <b>Annexe A .....</b>   | <b>85</b> |
| <b>Largeurs efficaces des poutres .....</b>   | <b>85</b> |
| <b>Annexe B .....</b>   | <b>88</b> |
| <b>Calcul des coefficients <math>\lambda</math> .....</b>   | <b>88</b> |
| <b>Annexe C .....</b>   | <b>92</b> |
| <b>Courbes de variation des contraintes <math>\sigma</math> et <math>\tau</math> sous FLM3.....</b>     | <b>92</b> |
| <b>Annexe D .....</b>   | <b>99</b> |
| <b>Courbes de variation des contraintes <math>\sigma</math> et <math>\sigma_p</math> sous FLM4.....</b> | <b>99</b> |

# LISTE DES SYMBOLES

|                  |   |
|------------------|---|
| $b$              | Distance entre les poutres principales.   |
| $e$              | Excentricité de la charge FLM3 par rapport à l'axe de l'ouvrage.  |
| $G_{k,sup}$      | Sollicitations caractéristiques sous charge permanente défavorable.   |
| $G_{k,inf}$      | Sollicitations caractéristiques action dues au retrait du béton.  |
| $I_{sG}$         | Moment d'inertie de la section droite de la poutre seule par rapport à l'axe neutre.  |
| $K$              | Nombre de voies supportant un trafic de poids lourds.   |
| $N_i$            | Nombre totale de cycles d'endommagement sous amplitude constante des contraintes $\Delta\sigma_i$ .                             |
| $n_i$            | Nombre de cycles avec amplitude constante des contraintes $\Delta\sigma_i$ .  |
| $N_j$            | Nombre de poids-lourds par an sur la voie $j$ .   |
| $N_{obs}$        | Nombre indicatif de véhicules lourds prévus par voie lente.   |
| $N_R$            | Nombre de cycles d'étendue constante de contraintes.  |
| $N_{Ri}$         | Endurance (en cycles) obtenue avec la courbe pondérée $\Delta\sigma_c/\gamma_{Mf}$ .  |
| $PC$             | Pourcentage de camions.   |
| $Q_i$            | Poids (kN) du poids-lourd $i$ circulant sur la voie lente.  |
| $Q_{m1}$         | Poids moyen (kN) des poids-lourds circulant sur la voie lente.  |
| $Q_{mj}$         | Poids moyen des poids-lourds sur la voie $j$ .  |
| $S_G$            | Moment statique, par rapport à l'axe neutre, de la partie de la section située sur sa partie supérieure.                        |
| $t_w$            | Épaisseur de l'âme de la poutre.  |
| $\Phi$           | Coefficient de dommage équivalent d'impact.   |
| $\gamma_F$       | Coefficient partiel appliqué aux charges.   |
| $\gamma_{Ff}$    | Coefficient partiel appliqué aux charges.   |
| $\gamma_{fat}$   | Coefficient partiel de résistance à la fatigue.   |
| $\gamma_{F,fat}$ | Coefficient partiel relatif aux charges FLM3.   |
| $\gamma_{Mf}$    | Coefficient partiel de résistance à la fatigue.   |
| $\gamma_{S,fat}$ | Coefficient partiel relatif aux matériaux.  |
| $\gamma_{S,fat}$ | Coefficient partiel relatif aux matériaux.  |
| $\eta_j$         | Valeur de la ligne d'influence au centre de la voie $j$ pour la sollicitation qui produit l'étendue de variation de contrainte. |

- $\lambda$  Coefficient de dommage équivalent.
- $\lambda_v$  Coefficient de dommage équivalent dépendant des spectres du chargement de fatigue et de la pente  $m$  de la courbe de résistance en fatigue.
- $\Delta\theta$  Sollicitations caractéristiques dues au gradient thermique.
- $\Delta\sigma_E$  Étendue de contrainte équivalente d'amplitude constante.
- $\Delta\sigma_{E,2}$  Étendue de contrainte normale équivalente d'amplitude constante relative à 2 millions de cycles.
- $\Delta\sigma_R$  Résistance à la fatigue du composant étudié.
- $\Delta\sigma_{Rsk}$  Étendue de contrainte pour  $N^*$  cycles, donnée par les courbes S-N concernées.
- $\Delta\tau_c$  Valeur de référence de la résistance à la fatigue à 2 millions de cycles.

# LISTE DES TABLEAUX

|  |     |
|--|-----|
| <b>Tableau 1.1.</b> Limites du domaine de rupture de Goodman .....   | 11  |
| <b>Tableau 2.1.</b> Tables de répartitions des camions en fonction du trafic .....   | 26  |
| <b>Tableau 2.2.</b> Nombre indicatif de véhicules lourds prévus par voie lente.....  | 27  |
| <b>Tableau 2.3.</b> Valeurs de $\lambda_3$ .....   | 38  |
| <b>Tableau 3.1.</b> Tableau Dimensions des parois des sections transversales .....   | 55  |
| <b>Tableau 3.2.</b> Variation de $f_y$ et $f_u$ en fonction de l'épaisseur de la paroi de l'acier S355 .....   | 56  |
| <b>Tableau 3.3.</b> Poids propre des superstructures et des équipements .....  | 58  |
| <b>Tableau 3.4.</b> Caractéristiques géométriques des sections mixtes .....  | 67  |
| <b>Tableau 3.5.</b> Résumés des calculs de justification des assemblages des poutres principales sous les<br>camions FLM3 .....  | 72  |
| <b>Tableau 3.6.</b> Vérification de la soudure bout à bout de la semelle inférieure (Section $x = 37.43$ m).<br>.....  | 75  |
| <b>Tableau 3.7.</b> Vérification de soudure transversale de l'âme des montants verticaux courants en T sur la<br>semelle inférieure (Section $x = 75,635$ m). .....                                      | 76  |
| <b>Tableau 3.8.</b> Vérification de soudure transversale de l'âme des montants verticaux courants en T sur la<br>semelle inférieure (Section $x = 105.89$ m) .....                                       | 77  |
| <b>Tableau 3.9.</b> Vérification de la soudure bout à bout de la semelle inférieure (Section $x = 106.94$ m)<br>.....  | 78  |
| <b>Tableau 3.10.</b> Vérification de soudure transversale de l'âme des montants verticaux courants en T sur<br>la semelle inférieure (Section $x = 105.89$ m) contraintes principales $\sigma_p$ . ..... | 79  |
| <b>Tableau 3.11.</b> Comparaison des vérifications avec les deux méthodes. ....  | 80  |
| <b>Tableau D.1.</b> Comptage des cycles et étendus des contraintes $\sigma$ sous camion A du convoi FLM4 dans<br>la section $x = 37.43$ m .....  | 101 |
| <b>Tableau D.2.</b> Comptage des cycles et étendus des contraintes $\sigma$ sous camion B du convoi FLM4 dans<br>la section $x = 37.43$ m .....  | 102 |
| <b>Tableau D.3.</b> Comptage des cycles et étendus des contraintes $\sigma$ sous camion C du convoi FLM4 dans<br>la section $x = 37.43$ m .....  | 103 |
| <b>Tableau D.4.</b> Comptage des cycles et étendus des contraintes $\sigma$ sous camion D du convoi FLM4 dans<br>la section $x = 37.43$ m .....  | 104 |
| <b>Tableau D.5.</b> Comptage des cycles et étendus des contraintes $\sigma$ sous camion E du convoi FLM4 dans<br>la section $x = 37.43$ m .....  | 105 |
| <b>Tableau D.6.</b> Comptage des cycles et étendus des contraintes $\sigma$ sous camion A convoi FLM4 dans la<br>section $x = 75.635$ m .....  | 107 |
| <b>Tableau D.7.</b> Comptage des cycles et étendus des contraintes $\sigma$ sous camion B convoi FLM4 dans la<br>section $x = 75.635$ m .....  | 108 |



|   |     |
|---|-----|
| <b>Tableau D.8.</b> Comptage des cycles et étendus des contraintes $\sigma$ sous camion C convoi FLM4 dans la section $x = 75.635$ m .....    | 109 |
| <b>Tableau D.9.</b> Comptage des cycles et étendus des contraintes $\sigma$ sous camion D convoi FLM4 dans la section $x = 75.635$ m .....    | 110 |
| <b>Tableau D.10.</b> Comptage des cycles et étendus des contraintes $\sigma$ sous camion E convoi FLM4 dans la section $x = 75.635$ m .....   | 112 |
| <b>Tableau D.11.</b> Comptage des cycles et étendus des contraintes $\sigma$ sous camion A convoi FLM4 dans la section $x = 105.89$ m .....   | 113 |
| <b>Tableau D.12.</b> Comptage des cycles et étendus des contraintes $\sigma$ sous camion B convoi FLM4 dans la section $x = 105.89$ m .....   | 114 |
| <b>Tableau D.13.</b> Comptage des cycles et étendus des contraintes $\sigma$ sous camion C convoi FLM4 dans la section $x = 105.89$ m .....   | 115 |
| <b>Tableau D.14.</b> Comptage des cycles et étendus des contraintes $\sigma$ sous camion C convoi FLM4 dans la section $x = 105.89$ m .....   | 116 |
| <b>Tableau D.15.</b> Comptage des cycles et étendus des contraintes $\sigma$ sous camion E convoi FLM4 dans la section $x = 105.89$ m .....   | 117 |
| <b>Tableau D.16.</b> Comptage des cycles et étendus des contraintes $\sigma$ sous camion A convoi FLM4 dans la section $x = 106.94$ m .....   | 119 |
| <b>Tableau D.17.</b> Comptage des cycles et étendus des contraintes $\sigma$ sous camion B convoi FLM4 dans la section $x = 106.94$ m .....   | 120 |
| <b>Tableau D.18.</b> Comptage des cycles et étendus des contraintes $\sigma$ sous camion C convoi FLM4 dans la section $x = 106.94$ m .....   | 121 |
| <b>Tableau D.19.</b> Comptage des cycles et étendus des contraintes $\sigma$ sous camion D convoi FLM4 dans la section $x = 106.94$ m .....   | 122 |
| <b>Tableau D.20.</b> Comptage des cycles et étendus des contraintes $\sigma$ sous camion E convoi FLM4 dans la section $x = 106.94$ m .....   | 123 |
| <b>Tableau D.21.</b> Comptage des cycles et étendus des contraintes $\sigma_p$ sous camion A convoi FLM4 dans la section $x = 105.89$ m ..... | 125 |
| <b>Tableau D.22.</b> Comptage des cycles et étendus des contraintes $\sigma_p$ sous camion B convoi FLM4 dans la section $x = 105.89$ m ..... | 126 |
| <b>Tableau D.23.</b> Comptage des cycles et étendus des contraintes $\sigma_p$ sous camion C convoi FLM4 dans la section $x = 105.89$ m ..... | 127 |
| <b>Tableau D.24.</b> Comptage des cycles et étendus des contraintes $\sigma_p$ sous camion D convoi FLM4 dans la section $x = 105.89$ m ..... | 128 |
| <b>Tableau D.25.</b> Comptage des cycles et étendus des contraintes $\sigma_p$ sous camion E convoi FLM4 dans la section $x = 105.89$ m ..... | 129 |

# LISTE DES FIGURES

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure 1.1.</b> Phases de propagation des fissures .....   | 2  |
| <b>Figure 1.2.</b> Chargements d’amplitude constante .....  | 3  |
| <b>Figure 1.3.</b> Exemple d’histoire de contrainte due à un chargement variable .....                                    | 5  |
| <b>Figure 1.4.</b> Principe de la méthode du réservoir .....  | 5  |
| <b>Figure 1.5.</b> Illustration de la méthode de la goutte d’eau .....  | 7  |
| <b>Figure 1.6.</b> Courbe de Wöhler S-N et les différents domaines de fatigue. ....                                       | 7  |
| <b>Figure 1.7.</b> GOODMAN – SMITH .....  | 11 |
| <b>Figure 1.8.</b> Diagramme de Haig .....  | 12 |
| <b>Figure 1.9.</b> Diagramme de Haig. Représentation de Gerber, Goodman et Söderberg. ....                                | 13 |
| <b>Figure 1.10.</b> Diagramme de RÖS. ....  | 14 |
| <b>Figure 1.11.</b> Construction de la courbe d’érouissage cyclique. ....   | 15 |
| <b>Figure 1.12.</b> Procédure de calcul de $N_a$ (nombre de cycles à l’amorçage) avec l’approche de Neuber. ....          | 16 |
| <b>Figure 1.13.</b> Montants verticaux, Dispositions constructives.....   | 18 |
| <b>Figure 1.14.</b> Montant vertical en Té avec semelle arrêtée progressivement. ....                                     | 19 |
| <b>Figure 1.15.</b> Disposition pour semelle additionnelle. ....  | 20 |
| <b>Figure 1.16.</b> Extrémité d’un raidisseur longitudinal .....  | 21 |
| <b>Figure 2.1.</b> Modèle de charge FLM1 .....  | 24 |
| <b>Figure 2.2.</b> Modèle de charge de fatigue 3 .....  | 25 |
| <b>Figure 2.3.</b> Position de la voie lente de gauche à considérer pour l’étude des effets généraux .....                | 27 |
| <b>Figure 2.4.</b> Zone de voie lente de gauche élargie. ....   | 28 |
| <b>Figure 2.5.</b> Détails classiques d’un bipoutre mixte (en MPa) .....  | 30 |
| <b>Figure 2.6.</b> Illustration de la méthode des étendues de contraintes équivalentes .....                              | 32 |
| <b>Figure 2.7.</b> Sections résistantes des poutres mixtes. ....  | 33 |
| <b>Figure 2.8.</b> Distribution des rigidités .....   | 34 |
| <b>Figure 2.9.</b> Utilisation des lignes d’influence pour la détermination de $\sigma_{s,max}$ et $\sigma_{s,min}$ ..... | 34 |
| <b>Figure 2.10.</b> $\lambda_{max}$ pour les moments dans les ponts routiers .....  | 40 |
| <b>Figure 2.11.</b> Variation du coefficient d’impact en fonction de la distance du joint de dilatation .....             | 41 |
| <b>Figure 2.12.</b> Courbe de résistance à la fatigue de la catégorie de détail 1 .....                                   | 43 |
| <b>Figure 2.13.</b> Courbes de résistance à la fatigue pour les étendues de contrainte de cisaillement .....              | 43 |
| <b>Figure 2.14.</b> Courbe S-N pour armatures de béton armé et pour armatures de précontrainte .....                      | 46 |
| <b>Figure 2.15.</b> Courbe de résistance à la fatigue pour les goujons à tête dans les dalles pleines .....               | 49 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Figure 2.16.</b> Spectre des étendues de contrainte à amplitude variable .....                                       | 50  |
| <b>Figure 2.17.</b> Le critère de Palmgren-Miner .....  | 50  |
| <b>Figure 3.1.</b> Coupe longitudinale. ....  | 53  |
| <b>Figure 3.2.</b> Coupe transversale. ....   | 54  |
| <b>Figure 3.3.</b> Variation des sections transversales dans une poutre principale.....                                 | 54  |
| <b>Figure 3.4.</b> Notations utilisées. ....  | 55  |
| <b>Figure 3.5.</b> Géométrie du tablier .....   | 59  |
| <b>Figure 3.6.</b> Offset des poutres et de la dalle .....  | 60  |
| <b>Figure 3.7.</b> Degrés de liberté d'un élément de poutre 3D .....  | 60  |
| <b>Figure 3.8.</b> Degrés de liberté d'un élément de coque mince ou épaisse .....                                       | 61  |
| <b>Figure 3.9.</b> Maillage du tablier .....  | 62  |
| <b>Figure 3.10.</b> LUSAS Moving Load .....   | 63  |
| <b>Figure 3.11.</b> Moments sous combinaison de base non cyclique. ....   | 64  |
| <b>Figure 3.12.</b> Moments sous combinaison de base (valeur maximale) et FLM3 .....                                    | 64  |
| <b>Figure 3.13.</b> Moments sous combinaison de base (valeur minimale) et FLM3 .....                                    | 65  |
| <b>Figure 3.14.</b> Efforts tranchants sous FLM3 .....  | 66  |
| <b>Figure 3.15.</b> Les catégories de détail considérées pour les vérifications à l'ELU de fatigue .....                | 67  |
| <b>Figure 3.16.</b> Coupe transversale sur Entretoise courante. ....  | 68  |
| <b>Figure 3.17.</b> Vue en plan sur Entretoise courante. ....   | 68  |
| <b>Figure 3.18.</b> Coupe transversale sur Entretoise sur Pile. ....  | 68  |
| <b>Figure 3.19.</b> Vue en plan sur Entretoise sur Pile. ....   | 69  |
| <b>Figure 3.20.</b> Détail de soudure semelles supérieure et inférieure des sections de poutres S4 et S5. ....          | 69  |
| <b>Figure 3.21.</b> Détail de soudure semelles supérieure et inférieure des sections de poutres S5 et S6. ....          | 70  |
| <b>Figure A.3.</b> Largeur efficace de la dalle .....   | 86  |
| <b>Figure C.1.</b> Variation de la contrainte $\sigma$ sous FLM3 dans la section $x = 37.43$ m .....                    | 93  |
| <b>Figure C.2.</b> Variation de la contrainte $\sigma$ sous FLM3 dans la section $x = 75.635$ m .....                   | 94  |
| <b>Figure C.3.</b> Variation de la contrainte $\sigma$ sous FLM3 dans la section $x = 105.89$ m .....                   | 95  |
| <b>Figure C.4.</b> Variation de la contrainte $\sigma$ sous FLM3 dans la section $x = 106.94$ m .....                   | 96  |
| <b>Figure C.5.</b> Variation de $\tau$ sous FLM3 dans la section $x = 105.89$ m .....                                   | 97  |
| <b>Figure C.6.</b> Variation de $\tau$ sous FLM3 dans la section $x = 75.635$ m .....                                   | 98  |
| <b>Figure D.1.</b> Variation de la contrainte $\sigma$ sous camion A du convoi FLM4 dans la section $x = 37.43$ m ..... | 100 |
| <b>Figure D.2.</b> Comptage des cycles sous camion A du convoi FLM4 dans la section $x = 37.43$ m .....                 | 101 |
| <b>Figure D.3.</b> Variation de la contrainte $\sigma$ sous camion B du convoi FLM4 dans la section $x = 37.43$ m ..... | 102 |
| <b>Figure D.4.</b> Variation de la contrainte $\sigma$ sous camion C du convoi FLM4 dans la section $x = 37.43$ m ..... | 103 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Figure D.5.</b> Variation de la contrainte $\sigma$ sous camion D du convoi FLM4 dans la section $x = 37.43$ m     | 104 |
| <b>Figure D.6.</b> Variation de la contrainte $\sigma$ sous camion E du convoi FLM4 dans la section $x = 37.43$ m     | 105 |
| <b>Figure D.7.</b> Variation de la contrainte $\sigma$ sous camion A du convoi FLM4 dans la section $x = 75.635$ m    | 106 |
| <b>Figure D.8.</b> Comptage des cycles sous camion A du convoi FLM4 dans la section $x = 75.635$ m                    | 107 |
| <b>Figure D.9.</b> Variation de la contrainte $\sigma$ sous camion B du convoi FLM4 dans la section $x = 75.635$ m    | 108 |
| <b>Figure D.10.</b> Variation de la contrainte $\sigma$ sous camion C du convoi FLM4 dans la section $x = 75.635$ m   | 109 |
| <b>Figure D.11.</b> Variation de la contrainte $\sigma$ sous camion D du convoi FLM4 dans la section $x = 75.635$ m   | 110 |
| <b>Figure D.12.</b> Variation de la contrainte $\sigma$ sous camion E du convoi FLM4 dans la section $x = 75.635$ m   | 111 |
| <b>Figure D.13.</b> Variation de la contrainte $\sigma$ sous camion A du convoi FLM4 dans la section $x = 105.89$ m   | 112 |
| <b>Figure D.14.</b> Comptage des cycles sous camion A du convoi FLM4 dans la section $x = 105.89$ m                   | 113 |
| <b>Figure D.15.</b> Variation de la contrainte $\sigma$ sous camion B du convoi FLM4 dans la section $x = 105.89$ m   | 114 |
| <b>Figure D.16.</b> Variation de la contrainte $\sigma$ sous camion C du convoi FLM4 dans la section $x = 105.89$ m   | 115 |
| <b>Figure D.17.</b> Variation de la contrainte $\sigma$ sous camion D du convoi FLM4 dans la section $x = 105.89$ m   | 116 |
| <b>Figure D.18.</b> Variation de la contrainte $\sigma$ sous camion E du convoi FLM4 dans la section $x = 105.89$ m   | 117 |
| <b>Figure D.19.</b> Variation de la contrainte $\sigma$ sous camion A du convoi FLM4 dans la section $x = 106.94$ m   | 118 |
| <b>Figure D.20.</b> Comptage des cycles sous camion A du convoi FLM4 dans la section $x = 106.94$ m                   | 119 |
| <b>Figure D.21.</b> Variation de la contrainte $\sigma$ sous camion B du convoi FLM4 dans la section $x = 106.94$ m   | 120 |
| <b>Figure D.22.</b> Variation de la contrainte $\sigma$ sous camion C du convoi FLM4 dans la section $x = 106.94$ m   | 121 |
| <b>Figure D.23.</b> Variation de la contrainte $\sigma$ sous camion D du convoi FLM4 dans la section $x = 106.94$ m   | 122 |
| <b>Figure D.24.</b> Variation de la contrainte $\sigma$ sous camion E du convoi FLM4 dans la section $x = 106.94$ m   | 123 |
| <b>Figure D.25.</b> Variation de la contrainte $\sigma_P$ sous camion A du convoi FLM4 dans la section $x = 105.89$ m | 124 |
| <b>Figure D.26.</b> Comptage des cycles de $\sigma_P$ sous camion A du convoi FLM4 dans la section $x = 105.89$ m     | 125 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Figure D.27.</b> Variation de la contrainte $\sigma_p$ sous camion B du convoi FLM4 dans la section $x = 105.89$ m | 126 |
| <b>Figure D.28.</b> Variation de la contrainte $\sigma_p$ sous camion C du convoi FLM4 dans la section $x = 105.89$ m | 127 |
| <b>Figure D.29.</b> Variation de la contrainte $\sigma_p$ sous camion D du convoi FLM4 dans la section $x = 105.89$ m | 128 |
| <b>Figure D.30.</b> Variation de la contrainte $\sigma_p$ sous camion E du convoi FLM4 dans la section $x = 105.89$ m | 129 |

## RESUME

L'objet de ce mémoire de fin d'étude consiste à justifier les assemblages d'un pont mixte existant vis-à-vis les états limites de fatigue suivant les Eurocodes.

La première partie de cette étude est consacré en premier lieu à présenter les paramètres qu'on doit considérer pour étudier le comportement des structures vis-à-vis de la fatigue. En deuxième lieu les méthodes proposées par les Eurocodes pour la vérification vis-à-vis des états limites de fatigue des assemblages des poutres, des armatures de la dalle et de la connexion dalle-poutre ont été présentées.

La deuxième partie consiste à vérifier l'état limite de fatigue d'assemblages utilisées dans les poutres principales d'un tablier de pont mixte existant. Les sollicitations nécessaires au calcul des contraintes ont été déterminées à partir d'un modèle numérique tridimensionnel en utilisant le logiciel de calcul par éléments finis LUSAS. La résistance vis-vis de la fatigue est effectuée à l'aide de la méthode des  $\lambda$  et de la méthode de l'endommagement cumulatif et les courbes S-N proposées dans les Eurocodes 2, 3 et 4.

Les résultats obtenus ont montré que certains assemblages dimensionnés par le bureau d'études ne sont pas justifiées vis-à-vis des états limites de fatigue.

**Mots-clés** : Fatigue, Endommagement, Eurocode, LUSAS, Courbe S-N, Etendue de contrainte, Comptage de cycles.

## ABSTRACT

This master thesis is devoted to the fatigue design of the weld attachments and the stiffeners used in the main girders beams of an existing steel-concrete composite bridge according to the different parts of the Eurocodes dealing with the design of steel and composite bridges.

The first part of this study is primarily devoted to review the parameters that must be considered for the fatigue assessment of the structures. Both the simplified method called the  $\lambda$  method and the Palmgren-Miner's cumulative damage analysis recommended by the relevant Eurocodes for the fatigue design of the structural steel, concrete and reinforcement and headed stud shear connectors were presented.

The second part of this thesis, the fatigue verification of a number of weld attachments and stiffeners is performed. The stress ranges were calculated from a global analysis for the fatigue load models FLM3 and FLM4, by modeling the composite deck with a 3D finite element model and using LUSAS 14 software.

The results obtained showed that most of the weld attachments and stiffeners do not pass the fatigue verification. It was then concluded that initially the design of the bridge did not include the fatigue verification.

**Keywords :** Fatigue, Damage, Eurocode, LUSAS, S-N curve, Stress extent, Cycle counting.

## ملخص

الغرض من أطروحة نهاية الدراسة هذه هو تبرير تجميعات الجسر المركب الحالي مقابل حالات حد التعب وفقاً للقواعد الأوروبية. تم تخصيص الجزء الأول من هذه الدراسة في المقام الأول لتقديم المعلومات التي يجب أخذها في الاعتبار لدراسة سلوك الهياكل فيما يتعلق بالتعب. ثانيًا، تم تقديم الطرق التي اقترحتها المدونات الأوروبية للتحقق فيما يتعلق بحالات حد التعب لتجميعات الحزم وتعزيزات للبلطة ووصلة الحزم-البلطة. يتكون الجزء الثاني من التحقق من حالة حدود التعب للتجميعات المستخدمة في الحزم الرئيسية لسطح جسر مركب منجز. تم تحديد الضغوط اللازمة لحساب الضغوط من نموذج رقمي ثلاثي الأبعاد باستخدام برنامج حساب العناصر المحدودة LUSAS. يتم تحديد قوة التعب باستخدام طريقة  $\lambda$  وطريقة الضرر التراكمي ومنحنيات S-N المقترحة في القواعد الأوروبية 2، 3 و 4. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن بعض التجميعات التي تم تحديد أبعادها بواسطة مكتب الدراسات غير مبررة فيما يتعلق بحالات حد التعب.

**الكلمات المفتاحية:** التعب، الضرر، الرمز الأوروبي، LUSAS، منحنى S-N، نطاق الإجهاد، عد الدورات.



## INTRODUCTION GENERALE

L'objet de ce mémoire de fin d'études consiste à justifier les poutres principales d'un bipoutre mixte à trois travées continues vis-à-vis de la fatigue. L'ouvrage étudié est un pont routier de 151.27 mètres franchissant le cours d'eau Oued El Hay situé dans la commune d'El Kantara dans la wilaya de Biskra. L'étude de l'Avant-Projet Sommaire et celle du projet a été réalisée par la SAPTA (Société Algérienne des Ponts et Travaux d'Art), spécialisée dans la construction des ponts mixtes et dont le siège est situé dans la wilaya d'Alger.

Les justifications ont été effectuées en utilisant les Eurocodes qui sont actuellement utilisés à l'échelle Européenne pour la vérification en fatigue de tous les types d'ouvrages.

La justification en fatigue de l'ossature métallique nécessite une connaissance au préalable des dispositions constructives vis-à-vis de la fatigue des différents assemblages par soudure ou par boulonnage, des assemblages qui sont regroupés par catégories par les tableaux 8.1 jusqu'au 8.10 de l'EN 1993-1-9 [5].

L'EN 1993-1-9 [5] propose deux méthodes de justification à la fatigue. La première méthode simplifiée des étendues de contrainte équivalentes est basée sur le modèle FLM3 et la deuxième méthode de Palmgren-Miner basée sur le principe de l'endommagement cumulé, pour laquelle on considère les camions du modèle FLM4. Faute de données, les camions du modèle FLM5 qui représentent les données du trafic journalier réel n'ont pas été pris en compte.

Le présent document s'articule autour des deux points suivants :

- ◆ Généralités sur la fatigue des matériaux et des structures ;
- ◆ Présentation des règles générales des Eurocodes (Introduction aux Eurocodes, charges de fatigue et combinaisons de charges, méthodes de justification en fatigue).

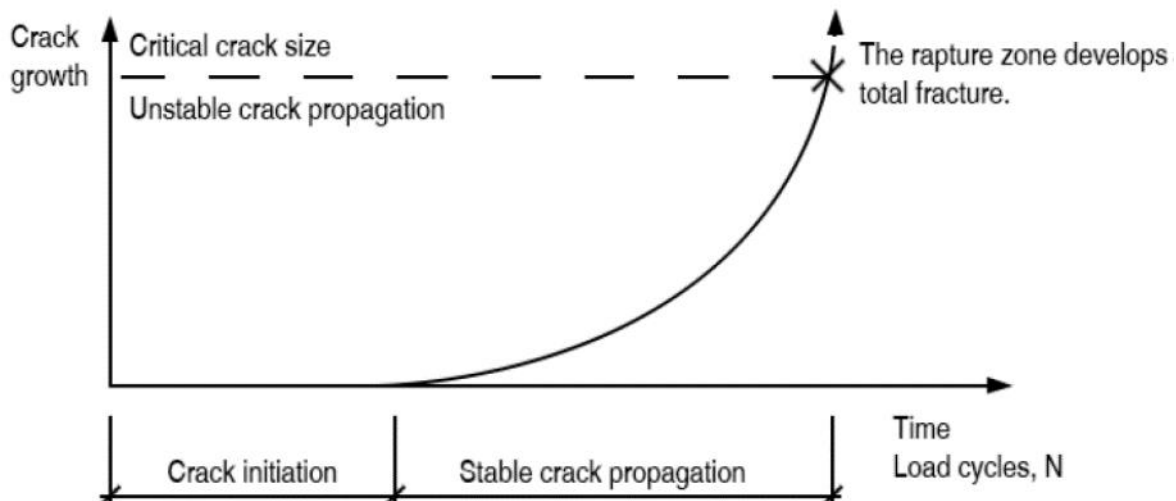
Les sollicitations et les caractéristiques nécessaires aux calculs des contraintes ont été déterminées en utilisant le logiciel de calcul par éléments finis LUSAS 14 [14]. Les calculs relatifs aux calculs des contraintes normales et de cisaillement ont été effectués manuellement ou programmés sur Excel afin de gagner du temps.

## CHAPITRE 1

# GENERALITES SUR LA FATIGUE DES MATERIAUX ET DES STRUCTURES

### 1.1. Description du phénomène de fatigue

Le phénomène de fatigue désigne la dégradation progressive des structures soumises à des sollicitations fluctuantes, alternées ou répétées, qui se traduit par l'apparition et le développement de fissures, endommageant ces structures et pouvant les amener à la ruine. Les fissures de fatigue se développent suivant trois grandes étapes (Figure 1.1) : l'amorçage de la fissure, sa propagation et enfin la rupture brutale de la section résistante restante [21].



**Figure 1.1.** Phases de propagation des fissures

La théorie de l'endommagement a pour objet de décrire l'évolution des phénomènes entre l'état vierge (matériau dépourvu de fissures ou de cavités à l'échelle microscopique) et l'amorçage de la fissure macroscopique. Le stade final de l'endommagement correspond à la rupture de l'élément, c'est à dire à l'existence d'une fissure macroscopique de la taille de cet élément (de 0.1 à 1 mm pour les métaux). Au-delà, c'est le domaine de la fissuration.

En ouvrages d'art, le risque de fatigue concerne la charpente métallique des ouvrages métalliques (rivetés, boulonnés ou soudés) et les ouvrages mixtes.

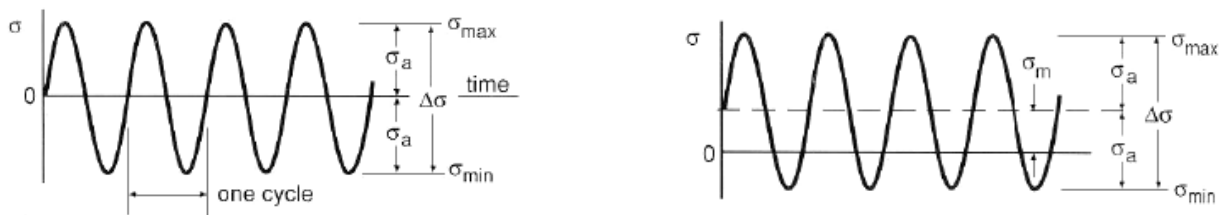
Le dimensionnement en fatigue d'une structure sous chargement cyclique nécessite de définir un « état limite » qui sera le critère de résistance.

## 1.2. Chargement cyclique

La contrainte appliquée peut être assimilée à une traction ou une compression, à une flexion ou à une torsion. L'histoire des contraintes est normalement considérée soit à amplitude constantes soit à amplitude variable.

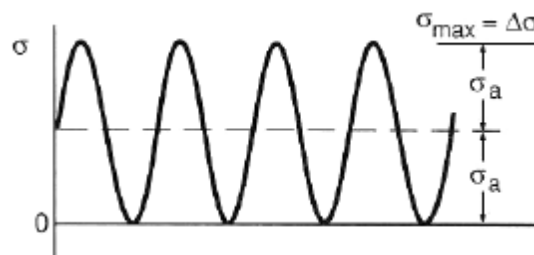
### 1.2.1. Chargement à amplitude constante

En général, à amplitude constante, la variation entre la contrainte et le temps se présente sous les trois modes distincts représentés sur la figure 1.2. La contrainte présente une amplitude symétrique de part et d'autre d'une contrainte moyenne  $\sigma_m$  nulle et passe de la contrainte maximale  $\sigma_{max}$  en tension à une contrainte minimale  $\sigma_{min}$  en compression de même ampleur, ceci correspond à un cycle de contraintes alternées. Les contraintes maximale et minimale en compression ou en traction sont asymétriques par rapport à une contrainte moyenne nulle.



a) contrainte alternée  $\sigma_m = 0$

b) contrainte ondulée  $\sigma_m \neq 0$



c) contrainte répétée  $\sigma_{min} = 0$

**Figure 1.2.** Chargements d'amplitude constante

A partir des contraintes maximales  $\sigma_{max}$  et des contraintes minimales  $\sigma_{min}$ , on définit les paramètres suivants :

- ◆ Contrainte moyenne :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

- ◆ Contrainte d'amplitude :

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

- ◆ Etendue de la variation de contrainte :  $2\sigma_A$

- ◆ Variation de contrainte :

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

- ◆ Ratio de contrainte :

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

- ◆ Relation d'amplitude :

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m}$$

Les signes de  $\sigma_a$  et  $\Delta\sigma$  sont toujours positifs,  $\sigma_{\max} > \sigma_{\min}$ , la traction est considérée positive.  $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{\min}$  et  $\sigma_m$  peuvent être positives, négatives ou nulles.

Quelques expressions additionnelles sont parfois utilisées :

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} (1 - R) \quad \sigma_m = \frac{\sigma_{\max}}{2} (1 + R)$$

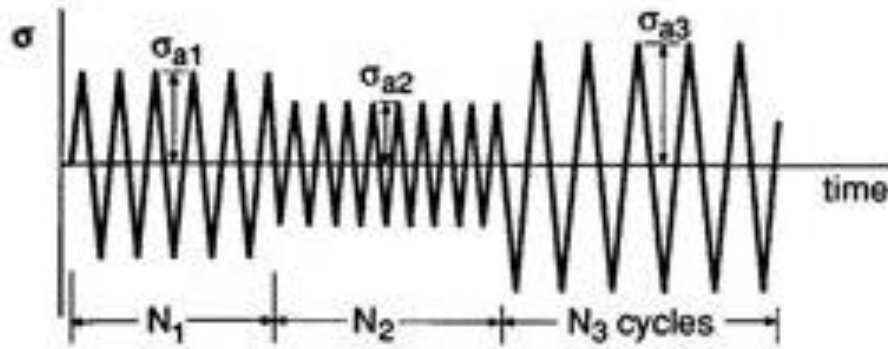
$$R = \frac{1 - A}{1 + A} \quad A = \frac{1 - R}{1 + R}$$

Pour les régimes fondamentaux suivants, on en déduit :

- ◆ Contrainte alternée :  $\sigma_{\max} = \sigma$   $\sigma_{\min} = -\sigma$   $\sigma_m = 0$   $\sigma_a = \sigma$   $\Delta\sigma = 2\sigma$   $R = 1$  ;
- ◆ Contrainte répétée :  $\sigma_{\max} = \sigma$   $\sigma_{\min} = 0$   $\sigma_m = \sigma/2$   $\sigma_a = \sigma/2$   $\Delta\sigma = \sigma$   $R = 0$ .

### 1.2.2. Chargement à amplitude variable

Les définitions précédentes sont étendues à un historique de contrainte quelconque produit par un événement-charge, comme le montre l'exemple de la figure 1.3.

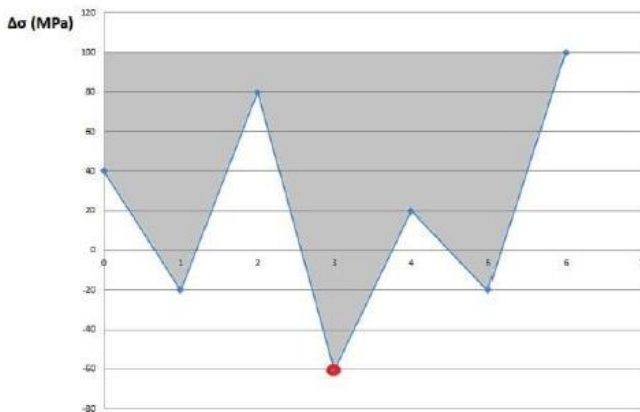


**Figure 1.3.** Exemple d’histoire de contrainte due à un chargement variable

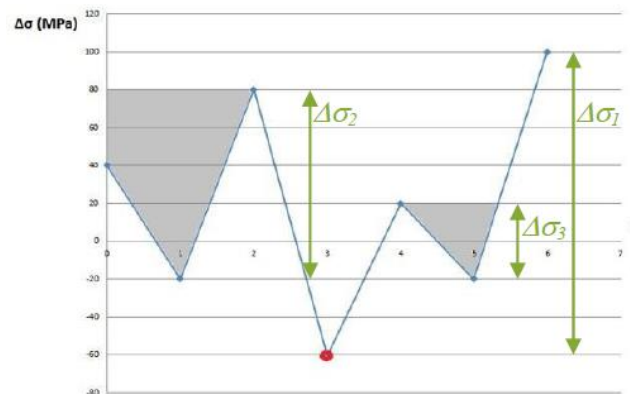
Dans ce cas, il est d’usage de procéder à un comptage de cycles ayant la même contrainte d’amplitude. Pour ce faire, il existe deux méthodes principales de comptage des cycles : le réservoir et la goutte d’eau.

**1.2.2.1. Méthode du réservoir**

Cette méthode consiste à « remplir d’eau » entre deux points hauts sur la séquence de référence, à l’image d’un réservoir, puis de vider ce réservoir à partir des points les plus bas. Les différences de niveaux d’eau correspondent aux variations de contrainte  $\Delta\sigma_i$ , comme il est représenté sur la figure 1.4.



a) Remplissage du réservoir



b) Vidange par le point le plus bas

**Figure 1.4.** Principe de la méthode du réservoir

Pour cet exemple, on obtient :  $\Delta\sigma_1 = 160$  MPa,  $\Delta\sigma_2 = 100$  MPa,  $\Delta\sigma_3 = 40$  MPa.

### 1.2.2.2. Méthode de la goutte d'eau

Cette méthode de la « goutte d'eau, ou rainflow en anglais » doit son nom à son inventeur japonais le professeur Endo, fondée sur l'analogie d'une goutte d'eau roulant sur les toits multiples d'une pagode, chassée par le vent et se mêlant aux filets d'eau.

Son nom vient du fait que pour l'appliquer, le graphique de variations de contraintes est tourné de  $90^\circ$ , afin d'imaginer que celui-ci est un relief sur lequel descend une goutte d'eau en partant d'un des extrema (Figure 1.5), tout en respectant un certain nombre de contraintes :

- ◆ Un chemin démarre à chaque extremum local de la fonction des contraintes (points : A, B, ..., I). Seuls les points utilisés sont les pics et les vallées du signal (là où on a un changement de signe de l'évolution de la contrainte en fonction du temps). Les points intermédiaires situés entre deux extremums relatifs du signal sont éliminés
- ◆ Lorsqu'un chemin ayant démarré à un minimum local (A, par exemple) passe au niveau du maximum local (B), tel que le prochain minimum local (C, du chemin CD) soit plus petit que le minimum situé à l'origine du chemin qui est le point A, le chemin est stoppé au niveau du maximum local B (chemin AB).
- ◆ Pour un chemin qui a démarré à un maximum local (B, par exemple), ce chemin est stoppé par le minimum local du prochain chemin si le maximum local de celui-ci D est plus grand que celui qui est situé à l'origine du chemin B.
- ◆ En partant du minimum local C la goutte est stoppée au niveau du maximum D puisqu'elle ne peut emprunter aucun des chemins du dessous (chemin CD, par exemple).
- ◆ Un nouveau chemin n'est jamais démarré tant que le précédent n'est pas stoppé (chemin DE par exemple). En partant du maximum local D, la goutte va poursuivre son chemin sur la branche de dessous jusqu'au minimum local G (chemin DG).
- ◆ La procédure est renouvelée jusqu'au dernier point du signal. Une fois ceci réalisé, les points restants constituent le résidu. Les étendues de variations successives du résidu vont en croissant et en décroissant (Chemin EFE').
- ◆ Chacune des étendues (A-D) et (G-I) est comptée comme un demi-cycle. Une étendue incluse dans un demi-cycle (tel que EFE' dans cet exemple) forme un cycle complet.

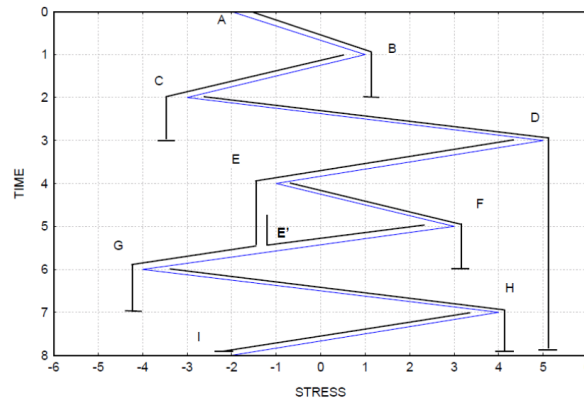


Figure 1.5. Illustration de la méthode de la goutte d'eau

### 1.3. Courbe Wöhler

La courbe de Wöhler est la plus ancienne et la seule permettant de visualiser la tenue des matériaux des structures dans le domaine de fatigue. Elle définit une relation entre la contrainte appliquée  $\sigma_a$  et le nombre de cycles à rupture  $N_r$  [22].

Pour la tracer, on réalise généralement des essais simples, qui consistent à soumettre chaque éprouvette à des cycles d'efforts périodique, d'amplitude de chargement constante fluctuant autour d'une valeur moyenne fixée, et de noter le nombre de cycles à rupture  $N_r$ . Le nombre de cycles  $N_r$  est reporté en abscisse sur une échelle logarithmique et l'amplitude de contrainte appliquée  $\sigma_a$  est reportée en abscisse sur une échelle linéaire. Ainsi à chaque éprouvette testée, correspond un point du plan  $(N_r, \sigma_a)$ . A partir d'un certain nombre d'essais, nous établissons la courbe de Wöhler.

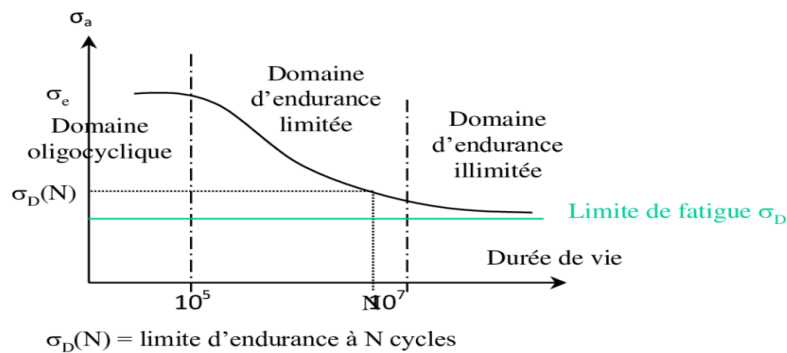


Figure 1.6. Courbe de Wöhler S-N et les différents domaines de fatigue [22].

Sur la courbe de Wöhler, on peut distinguer trois domaines :

- ◆ **Domaine de fatigue oligocyclique** où les ruptures surviennent après un petit nombre de cycles ( $N \leq 10^3 \dots 10^5$ ). Il correspond à des contraintes élevées pour lesquelles se produit une déformation plastique macroscopique du matériau.

- ◆ **Domaine de l'endurance limitée** où les ruptures surviennent après un nombre de cycles croissant avec la décroissance de la contrainte ( $10^3 \dots 10^5 < N \leq 10^7 \dots 10^8$ ). Dans ce cas, la rupture survient sans être accompagnée d'une déformation plastique d'ensemble mesurable. La réponse de l'éprouvette peut être purement élastique (comportement élastique dès les premiers cycles) ou bien adapté (comportement devenu élastique après stabilisation cyclique).
- ◆ **Domaine d'endurance illimitée ou zone de sécurité** où les ruptures ne se produisent pas avant un nombre de cycles supérieur à la durée de vie envisagée de la pièce ( $N > 10^7 \dots 10^8$ ). En deçà d'une valeur seuil  $\sigma\Delta$ , dite limite de fatigue, il n'y a jamais de rupture par fatigue quel que soit le nombre de cycles appliqué. Cette limite peut ne pas exister ou être mal définie pour certains matériaux (aciers à haute résistance, métaux non ferreux).

## 1.4. Les paramètres d'influençant la fatigue

### 1.4.1. Paramètres d'ordre métallurgique

#### a) Taille des grains

Les structures à grains fins présentent une meilleure tenue en fatigue que les structures à gros grains.

#### b) Orientation du fibrage par rapport à la direction des efforts

L'orientation générale des grains (fibrage) confère au matériau une anisotropie plus ou moins marquée. Les caractéristiques statiques et la tenue en fatigue seront meilleures dans le sens long du fibrage que dans les autres sens (travers long et travers court).

#### c) Taux d'érouissage

L'érouissage résultant des opérations de formage a pour effet de consolider le matériau (augmentation de la limite d'élasticité), et par suite, améliore la tenue en fatigue.

#### d) Traitement thermique

Suivant que le traitement thermique provoque un adoucissement ou un durcissement du matériau, la tenue en fatigue sera diminuée ou augmentée. De plus, le traitement thermique peut modifier la taille des grains.

#### e) Santé métallurgique de l'alliage

Les défauts métallurgiques (lacunes, défauts interstitiels, précipités, inclusions) peuvent être à l'origine de l'endommagement par fatigue. Par incompatibilité des déformations, ils provoquent des concentrations de contraintes locales. L'abattement de durée de vie dépendra de leurs quantités, taille, nature, répartition, orientation par rapport aux efforts.



### 1.4.2. Paramètres d'ordre mécanique et géométrique

#### a) Nature du chargement

Dans le cas des chargements monotones, Les paramètres prépondérants sont :

La forme du signal ;

Le rapport R (rapport entre la valeur minimale et la valeur maximale du chargement) : à contrainte maximale constante, si R augmente, la durée de vie augmente ;

La contrainte moyenne : à amplitude de chargement constante, si  $\sigma_m$  augmente, la durée de vie diminue.

La période du signal a en général peu d'influence sur la durée de vie. Cette règle est infirmée quand le phénomène de fatigue est associé à d'autres modes d'endommagement fonction du temps : fatigue/corrosion, fatigue/fluage, ou lorsque la rapidité des sollicitations produit un échauffement.

Dans le cas des chargements variables, les paramètres prépondérants sont :

- ◆ La présence de surcharges : la répétition périodique d'une surcharge peut retarder la propagation de fissures ;
- ◆ L'ordre d'apparition des cycles.

#### b) Accidents de forme (discontinuité dans la géométrie : entailles, trous...)

Un accident de forme augmente localement le niveau de contrainte. Cette augmentation peut être traduite par un coefficient de contrainte élastique  $K_t$  : rapport entre la contrainte locale maximale et la contrainte nominale. Dans le domaine d'endurance limité (domaine visé par l'industrie aéronautique), si la valeur de  $K_t$  augmente, la durée de vie diminue.

#### c) Effet d'échelle

A niveau de contrainte égale, deux pièces de même géométrie mais de dimensions différentes n'auront pas la même tenue en fatigue : plus les dimensions d'une pièce croissent, plus sa résistance à la fatigue diminue. Cette observation s'explique principalement par le volume de matière sollicité : plus celui-ci est grand, plus la probabilité d'avoir des défauts métallurgiques est grande. Weibull en a donné une interprétation phénoménologique. Z. Bazant a ensuite apporté une explication quantitative grâce à la mécanique de la rupture.

#### d) Qualité de l'usinage

Généralement, l'endommagement par fatigue apparaît en premier lieu à la surface des pièces. La prise en compte des deux aspects suivants améliore la tenue en fatigue :

- l'aspect microgéométrie de la surface : un mauvais usinage provoque en surface des microreliefs susceptibles d'augmenter localement le niveau de contrainte ; l'amorçage des fissures en surface est donc retardé lorsque la rugosité est faible ;
- l'aspect contraintes résiduelles : l'usinage peut introduire des contraintes résiduelles de traction en surface (elles sont équilibrées en profondeur par des contraintes résiduelles de compression); ces contraintes se superposant à celles du chargement accélèrent l'endommagement par fatigue.

#### 1.4.3. Environnement

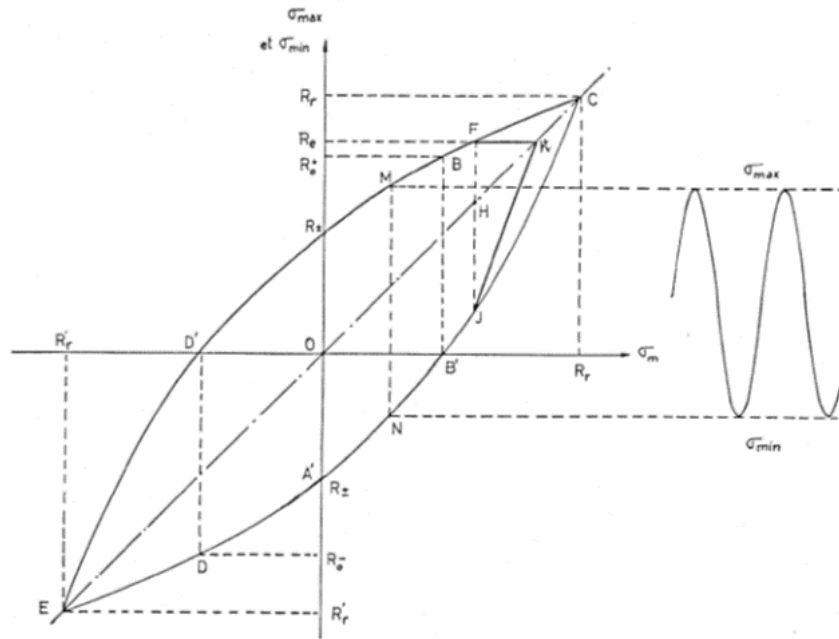
Un milieu agressif (températures élevées, milieux corrosifs...) aggrave le phénomène de fatigue. Il apparaît des phénomènes nouveaux comme le fluage ou la corrosion. Leur action est liée au temps d'exposition.

#### 1.4.4. Influence de la contrainte moyenne

Le tracé des courbes de Wöhler est en général effectué en soumettant des éprouvettes à des efforts sinusoïdaux (traction/compression, torsion...) à moyenne nulle. Lorsque les essais de fatigue sont réalisés à contrainte moyenne  $\sigma_m$  non nulle et constante, l'expérience montre que la durée de vie de l'éprouvette est modifiée, en particulier quand cette contrainte moyenne est relativement grande par rapport à la contrainte alternée. Une contrainte de traction diminue de façon importante la durée de vie, une contrainte de compression (jusqu'à un certain niveau) l'augmente très faiblement.

La limite d'endurance  $\sigma_D$  est aussi modifiée par la superposition d'une contrainte moyenne non nulle. La courbe d'interaction entre ces deux composantes s'appelle le diagramme d'endurance. Il en existe plusieurs représentations. Les plus utilisées sont ceux de Goodman - Smith et Haig.

Dans le diagramme de Goodman – Smith, schématisé à la figure 1.7, on porte en abscisse la contrainte moyenne  $\sigma_m$  et en ordonnée  $\sigma_{max}$ . Si on désire éviter les déformations permanentes, on limitera  $\sigma_{max}$  à la limite apparente d'élasticité  $R_e$  de sorte qu'on peut tronquer le diagramme par l'horizontale  $\sigma_{max} = R_e$ . Dans ce cas la partie de la courbe CJ doit être remplacée par le segment de droite KJ de sorte que l'on ait toujours la symétrie des points par rapport à la bissectrice du premier quadrant.



**Figure 1.7.** Diagramme GOODMAN – SMITH [21]

On peut encore simplifier davantage le diagramme de Goodman, en remplaçant les branches AF et A'J par des segments de droites.

Un diagramme de Goodman modifié est généralement utilisé pour l'étude de la fatigue polycyclique. Ce diagramme représente une courbe fermée pour une durée de vie N, dans l'espace  $(\sigma_m; \sigma_a)$ , et délimite le domaine de rupture du matériau pour un chargement uniaxial, à l'intérieur de ce domaine, la rupture ne se produira pas au bout de N cycles. Les segments qui délimitent le domaine de rupture sont représentés dans le tableau 1.1 [21] :

**Tableau 1.1.** Limites du domaine de rupture de Goodman [21].

| La rupture est prévue de se produire si on a : | Limites de la validité des équations :                 |
|--|--|
| $\sigma_{max} - 2 \sigma_m \geq \sigma_y$      | $-\sigma_y \leq \sigma_m \leq (\sigma_N - \sigma_y)$   |
| $\sigma_{max} - \sigma_m \geq \sigma_n$        | $(\sigma_N - \sigma_y) \leq \sigma_m \leq 0$           |
| $\sigma_{max} - (1-r) \sigma_m \geq \sigma_N$  | $0 \leq \sigma_m \leq \frac{\sigma_y - \sigma_N}{1-R}$ |
| $\sigma_{max} \geq \sigma_y$                   | $\frac{\sigma_y - \sigma_N}{1-R} \leq \sigma_m$        |

$$\text{où : } R = \frac{\sigma_N}{\sigma_u}$$

En utilisant le tableau 1.1, l'ingénieur peut prévoir si la rupture se produira sous un chargement de contrainte moyenne non nulle pour un certain nombre de cycles, si les données sont connues pour un chargement de contrainte moyenne nulle, ainsi que  $\sigma_u$  et  $\sigma_y$ .

La plupart des structures rencontrées imposent un état multiaxial de contrainte cyclique. Pour cela, on est amené à développer des critères de fatigue multiaxiaux pour prévoir la rupture de la structure, et on introduit pour cela la notion de contrainte équivalente.

#### 1.4.4.1. Diagramme de Haigh

Sur ce diagramme (Figure 1.8), l'amplitude de contrainte  $\sigma_a$  est portée en fonction de la contrainte moyenne  $\sigma_m$  à laquelle a été réalisé l'essai de fatigue. Deux points particuliers sont à considérer [21] :

- Le point A qui représente la limite d'endurance  $\sigma_D$  en sollicitation purement alternée ;
- Le point B qui représente le comportement limite du matériau pour une contrainte alternée nulle. Ce point correspond donc à la contrainte de rupture du matériau au cours d'un essai statique.

L'ensemble des limites d'endurance observées pour diverses valeurs de la contrainte moyenne se place alors sur la courbe AB ajustée en fonction des résultats d'essais.

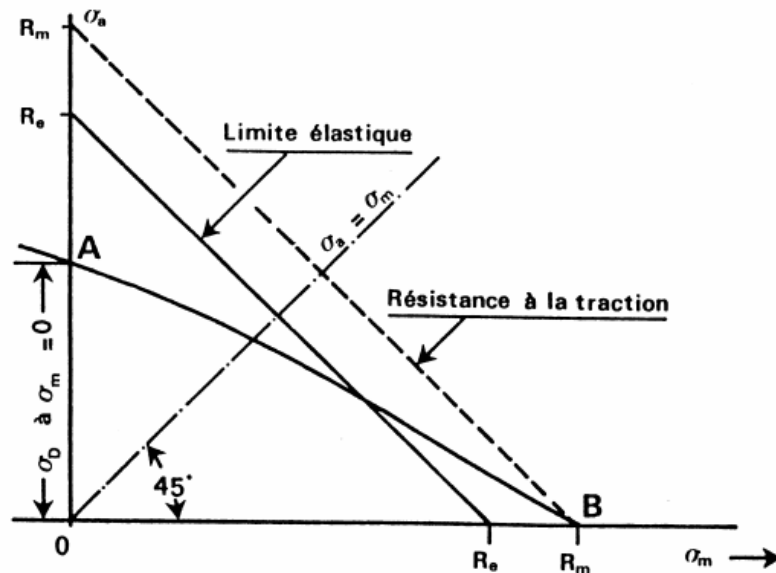
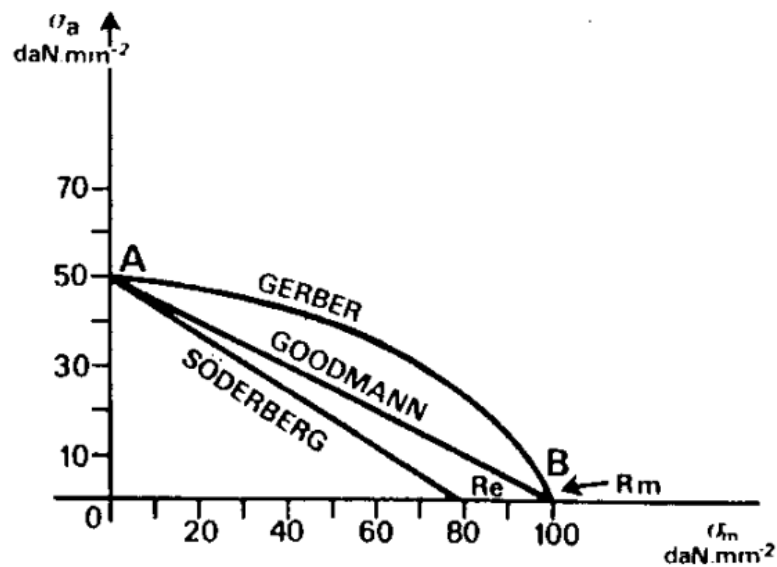


Figure 1.8. Diagramme de Haigh [21]

Différentes représentations de la courbe AB ont été proposées (Figure 1.9) :



**Figure 1.9.** Diagramme de Haigh. Représentation de Gerber, Goodman et Söderberg [21].

Goodman propose un modèle linéaire entre la limite d'endurance en condition alternée et la limite de rupture  $R_m$ .

$$\sigma_a = \sigma_D \left(1 - \frac{\sigma_m}{R_m}\right)$$

Gerber [7] propose quant à lui de modéliser la courbe par une parabole :

$$\sigma_a = \sigma_D \left(1 - \left(\frac{\sigma_m}{R_m}\right)^2\right)$$

Si la conception de la pièce est basée sur un design élastique à la place d'un design à la rupture, chose courante en conception d'éléments de machine, alors on se tourne vers la droite de Söderberg qui modélise la limite d'endurance en fonction de la contrainte moyenne comme une droite entre les limites d'endurance  $\sigma_a = \sigma_D$  en condition alternée et  $\sigma_m = R_e$  :

$$\sigma_a = \sigma_D \left(1 - \frac{\sigma_m}{R_e}\right)$$

### 1.4.4.2. Diagramme de RÖS

La contrainte maximale  $\sigma_{\max}$  est reportée en fonction de la contrainte minimale  $\sigma_{\min}$ . Ce diagramme est principalement employé dans les pays anglo-saxons (Figure 1.10) [21].

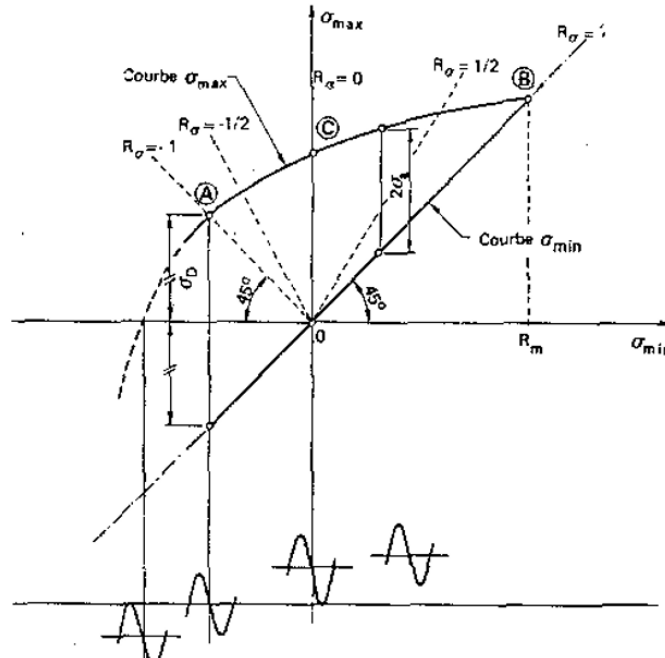


Figure 1.10. Diagramme de RÖS [21].

### 1.4.4.3. Diagramme de MOORE-KOOMERS-JASPER

La contrainte maximale  $\sigma_{\max}$  est représentée en fonction du rapport de contraintes [21] :

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

Ce diagramme est essentiellement employé dans les pays germaniques.

#### ◆ Remarque générale :

Il est nécessaire d'utiliser ces diagrammes dans le cas où la courbe de Wöhler dont on dispose n'est pas relative à la contrainte moyenne appliquée de manière à pouvoir se ramener au cas précédent. Ces diagrammes permettent de trouver l'amplitude de la contrainte purement alternée qui causera le dommage identique à un chargement cyclique à contrainte moyenne non nulle.

## 1.5. Amorçage des fissures de fatigue

Pour les structures soumises à des sollicitations variables au cours du temps, la ruine peut survenir au bout d'une durée finie. On définit souvent comme critère de ruine l'apparition d'une fissure d'une taille

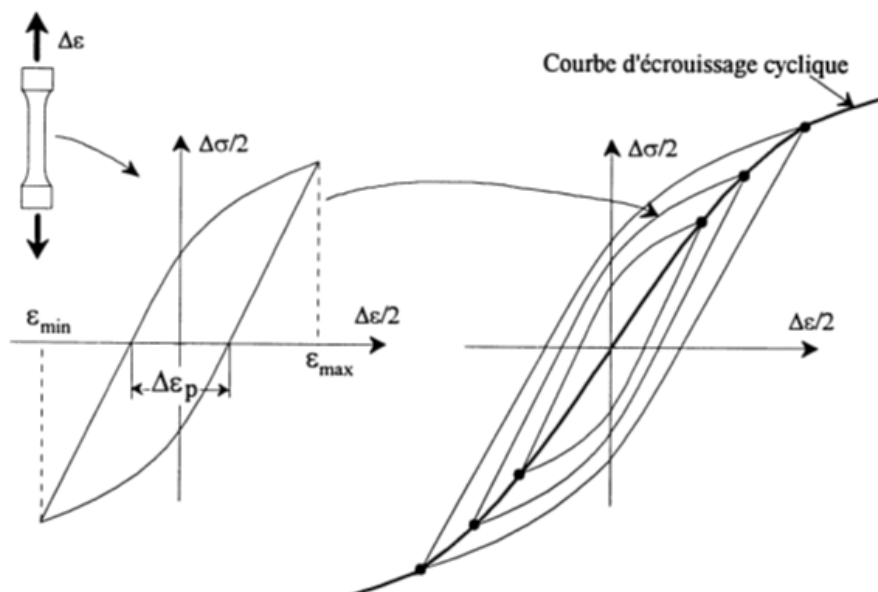
critique,  $a_{cr}$ . L'intervalle de temps, compris entre le début de la sollicitation et l'instant correspondant à la présence d'une fissure d'une taille critique,  $a_{cr}$ , couvre en réalité plusieurs phénomènes physiques.

L'observation de la fissuration dans les structures soumises à la fatigue montre que le processus qui conduit à la ruine peut être décomposé en plusieurs stades. Tout d'abord, dans les zones où le matériau est le plus sollicité, des microfissures apparaissent. Puis, celles-ci se développent et coalescent les unes avec les autres jusqu'à ce qu'elles forment une fissure de taille macroscopique. Enfin, cette fissure se propage jusqu'à la ruine de la structure.

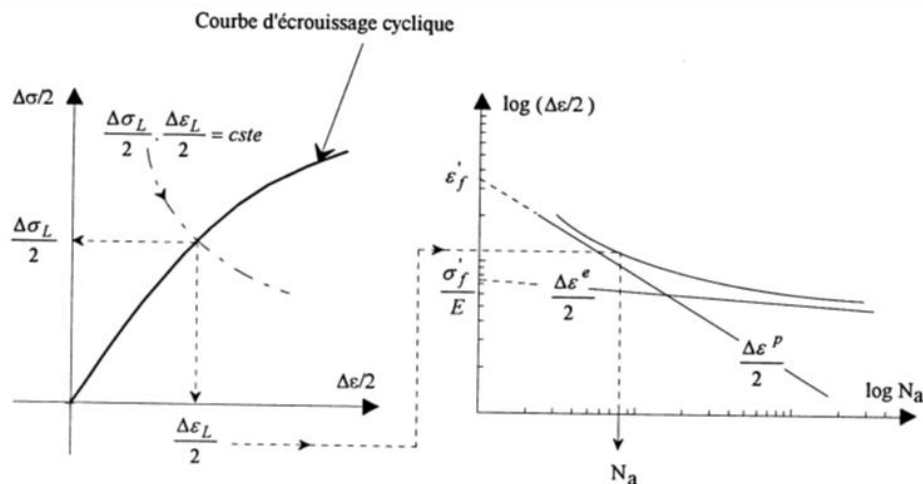
Il est d'usage de diviser la durée de vie d'une structure en deux phases : la phase d'amorçage et la phase de propagation.

Cependant, le problème de base consiste à définir le stade où l'amorçage se termine, c'est à dire où la propagation d'une fissure peut être décrite. La période de propagation pourrait être définie, par le stade à partir duquel une fissure unique s'amorce ou le stade où les microfissures commencent à coalescer. Ou encore celui qui correspond à la création de la « première microfissure ».

Aujourd'hui encore, la définition de l'amorçage reste un problème ouvert. Pour dimensionner les structures soumises à la fatigue, l'ingénieur a besoin de modèles qui permettent d'estimer le nombre de cycles  $N$  et donc de calculer le nombre de cycles à l'amorçage  $N_a$  et le nombre de cycles à la propagation  $N_p$ . La mise en œuvre de tels modèles n'est pas facile puisque les durées respectives des phases d'amorçage et de propagation dépendent fortement de l'amplitude de la sollicitation, de la présence éventuelle de défauts initiaux dans le matériau, de l'état initial de la structure et de la définition que l'on a de l'amorçage.



**Figure 1.11.** Construction de la courbe d'écroissage cyclique.



**Figure 1.12.** Procédure de calcul de  $N_a$  (nombre de cycles à l'amorçage) avec l'approche de Neuber.

Ainsi, connaissant les caractéristiques du matériau (coefficient d'érouissage cyclique et courbe de Manson-Coffin),  $K_t$  et le chargement nominal, on peut prévoir le nombre de cycles à l'amorçage. Dans le cas des géométries complexes, c'est-à-dire quand l'utilisation de  $K_t$  et d'un chargement nominal n'a aucun sens, on a recourt à la méthode des éléments finis.

Les critères d'amorçage des approches locales se fondent sur les données obtenues à partir d'essais uniaxiaux sur éprouvettes lisses correspondant à un matériau donné. Or, la zone critique où se produit l'amorçage des fissures dans les structures soudées est située dans la zone affectée thermiquement par le soudage où les caractéristiques du matériau sont difficiles d'accès et où, de plus, l'état de contrainte réel est multiaxial.

## 1.6. Les critères de fatigue multiaxiaux périodiques

Depuis plusieurs dizaines d'années, des investigations sur le comportement en fatigue des matériaux sont effectuées. Au départ, il avait été effectué des sollicitations uniaxiales d'amplitude constante qui ont donné lieu aux premières courbes S-N ; puis les études se sont orientées soit vers l'aspect amplitude variable des sollicitations uniaxiales, soit vers le comportement en fatigue sous sollicitations multiaxiales. A cette occasion sont apparus les essais multiaxiaux ainsi que les premiers critères de fatigue, établis alors pour explorer l'endurance illimitée des matériaux soumis à différents types de chargement.

Le rôle d'un critère de fatigue multiaxial est de situer tout cycle multiaxial de contraintes par rapport à la limite d'endurance du matériau. La notion généralement retenue de limite d'endurance concerne le



niveau de contrainte qui conduit à l'amorçage d'une fissure dite « longue », observable à l'échelle macroscopique, après un nombre donné de cycles généralement grand (souvent  $10^7$  cycles) et appelé seuil de l'endurance illimitée.

Un critère se présente généralement sous la forme d'une fonction de fatigue  $F$  de certaines composantes du cycle des contraintes dont il évalue la sévérité, des limites d'endurance du matériau (comme par exemple  $\sigma_{-1}$ ,  $\sigma_0$ ,  $\tau_{-1}$  en traction alternée symétrique, en traction répétée et en torsion alternée symétrique respectivement), voire de certaines de ses caractéristiques statiques (résistance maximale en traction  $s_u$ ). Lorsque le cycle, défini par son tenseur des contraintes  $\sigma(t)$  au cours d'une période, atteint la limite d'endurance du matériau, le critère s'écrit :

$$F=(\sigma(t), \sigma_{-1}, \sigma_0, \tau_{-1}, \dots) = 1$$

L'interprétation de la valeur effective de la fonction de fatigue  $F$  permet de statuer sur le fait que le cycle multiaxial considéré excède au sens du critère la limite d'endurance du matériau ( $F \geq 1$ ) ou reste en deçà de celle-ci ( $F < 1$ ) dans le cas contraire.

## 1.7. Les lois d'endommagement de fatigue

La théorie de l'endommagement, a pour objet de décrire l'évolution des phénomènes entre l'état vierge (matériau dépourvu de fissures ou de cavités à l'échelle microscopique) et l'amorçage de la fissure macroscopique. Le stade final de l'endommagement correspond à la rupture de l'élément, c'est à dire à l'existence d'une fissure macroscopique de la taille de cet élément (de 0.1 à 1 mm pour les métaux). Au-delà, c'est le domaine de la fissuration.

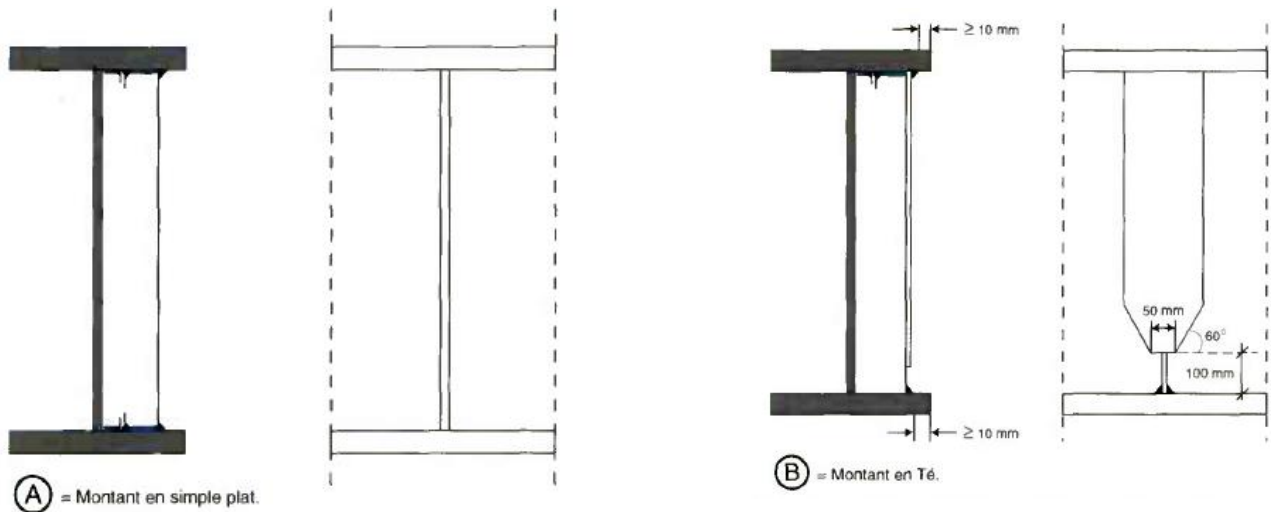
## 1.8. Dispositions constructives pour améliorer la tenue en fatigue assemblages métalliques [15]

### 1.8.1. Montants verticaux courants

La présence des montants verticaux donne souvent l'assemblage le plus pénalisant pour la résistance à la fatigue des semelles. Il faut cependant distinguer trois cas de figure selon que ces montants verticaux sont de simples raidisseurs d'âme, font partie de cadres d'entretoisement avec entretoises, ou font partie de cadres d'entretoisement avec pièces de pont.

Les montants verticaux seront de simples plats ou des profilés reconstitués en Té (voir Figure 1.13). La soudure doit se terminer à plus de 10 mm du bord de la plaque.

Le montant en Té (voir Figure 1.13) est plus pénalisant que le fer plat vis-à-vis des variations de contraintes normales dans la semelle, lorsque la semelle du Té est soudée à la semelle de la poutre.



**Figure 1.13.** Montants verticaux, Dispositions constructives.

### 1.8.1.1. Les raidisseurs d'âme

Les raidisseurs verticaux peuvent être en Té ou en simple plat. Le choix dépend de la rigidité nécessaire pour obtenir un raidissage rigide de l'âme de la poutre. Quand une section en Té est nécessaire, il est possible de ne pas assembler la semelle du Té aux semelles de la poutre. On retiendra les dispositions représentées à la partie basse de la Figure 1.13. Quand les raidisseurs verticaux courants sont de simples plats, il est possible de les arrêter avant les semelles de la poutre principale, en réduisant progressivement leur largeur aux extrémités. Cette disposition constructive est à éviter et il est préférable de souder ces raidisseurs sur les semelles des poutres pour mieux assurer le raidissage de l'âme et pour éviter des effets de flexion secondaire de l'âme, qui se concentreraient naturellement sur la petite longueur non raidie. Dans le cas contraire, la longueur non raidie doit rester suffisante.

### 1.8.1.2. Les montants des cadres d'entretoisement avec entretoises

Les montants en simple plat ne sont bien adaptés qu'aux ouvrages de dimension moyenne, et lorsque l'excentrement de l'axe de la voie lente par rapport à la poutre principale la plus proche n'est pas trop important.

Quand le simple plat est utilisé, la méthode d'assemblage avec une entretoise, qui consiste à ne pas souder le montant complet en atelier, mais à ajuster directement l'entretoise sur l'âme de la poutre sur le chantier, est fortement déconseillée. Cette disposition est en effet délicate à bien maîtriser, au niveau des

tolérances d'écartement des joints à souder sur le chantier. Elle présente de plus l'inconvénient de ne pas assurer correctement le raidissage des tronçons de poutres lors de leur transport.

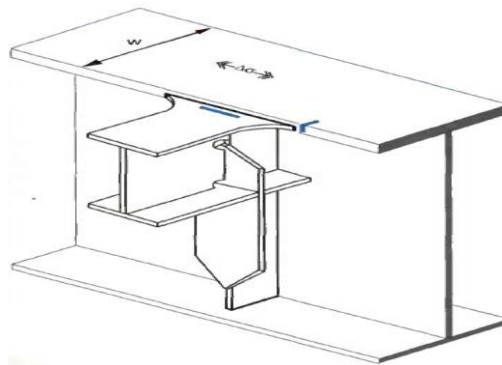
Il est souvent nécessaire d'utiliser des montants d'entretoisement en Té, plutôt que des montants en simple plat, pour obtenir une raideur et une résistance à la fatigue suffisantes du cadre d'entretoisement. La semelle du Té doit alors être soudée sous la semelle supérieure de la poutre principale, pour assurer la résistance à la fatigue de l'assemblage sous l'effet des variations de contraintes dans le montant, provoquées par l'encastrement de la dalle sur le cadre d'entretoisement. Par contre, on rappelle que cette soudure longitudinale réduit la résistance à la fatigue de la semelle supérieure. Celle-ci peut alors s'avérer insuffisante dans les zones où le béton est fissuré en service.

En partie inférieure du montant, la semelle du Té se termine par une réduction progressive de sa largeur, pour ne pas s'assembler sur la semelle de la poutre principale. Par contre l'âme du Té doit être obligatoirement soudée sur cette semelle inférieure.

En partie supérieure, sous la semelle de la poutre principale, l'extrémité du montant vertical, en simple plat ou en Té, doit être ajustée au contact pour assurer la résistance à la fatigue de l'assemblage si les soudures se font par cordons d'angle. Sinon, les soudures doivent être à pleine pénétration.

### 1.8.1.3. Les montants des cadres d'entretoisement avec pièces de pont

Une solution toujours possible est de prévoir des cadres d'entretoisement avec pièce de pont. Le montant vertical peut être un simple plat ou un Té. La semelle du Té est arrêtée progressivement en partie haute de montant, pour ne pas être soudée sous la semelle supérieure de la poutre principale (voir Figure 1.14). De plus, il faut généralement prévoir des goussets circulaires au raccordement de la semelle supérieure de la pièce de pont sur celle de la poutre principale. Cet assemblage permet de concilier au mieux la raideur et la résistance à la fatigue des cadres d'entretoisement, avec la résistance à la fatigue des poutres principales.



**Figure 1.14.** Montant vertical en Té avec semelle arrêlée progressivement.

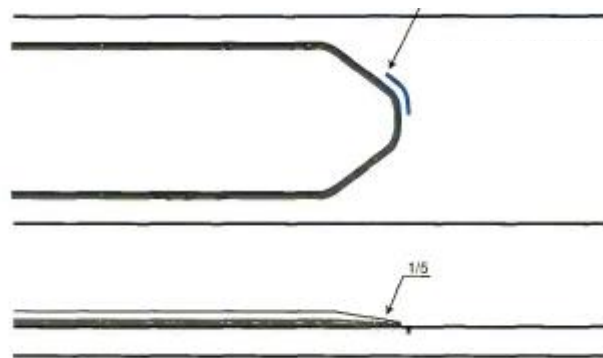
### 1.8.2. Montant d'appui - platines d'appui

Les raidisseurs verticaux sur appui sont très généralement en double T.

Il est rappelé de plus que les montants d'appui doivent être bien ajustés sur les semelles : un bon contact doit être assuré avant soudage par cordons d'angle ; à défaut, les soudures doivent être à pénétration garantie pour transmettre la totalité des efforts et vérifiées à la fatigue.

La soudure par cordon d'angle de la platine d'appui sous la semelle inférieure des poutres est un détail très pénalisant, puisque la classification correspond à celle d'un plat de recouvrement. Un relèvement de leur performance est possible en adoptant les mêmes dispositions constructives que celles conseillées pour les semelles additionnelles, parce que ces assemblages restent toujours comprimés (voir Figure 1.15).

Si nécessaire les platines d'appui peuvent aussi être assemblées par boulons H.R. pour bénéficier d'une meilleure performance.



**Figure 1.15.** Disposition pour semelle additionnelle.

### 1.8.3. Pièces de pont et entretoises

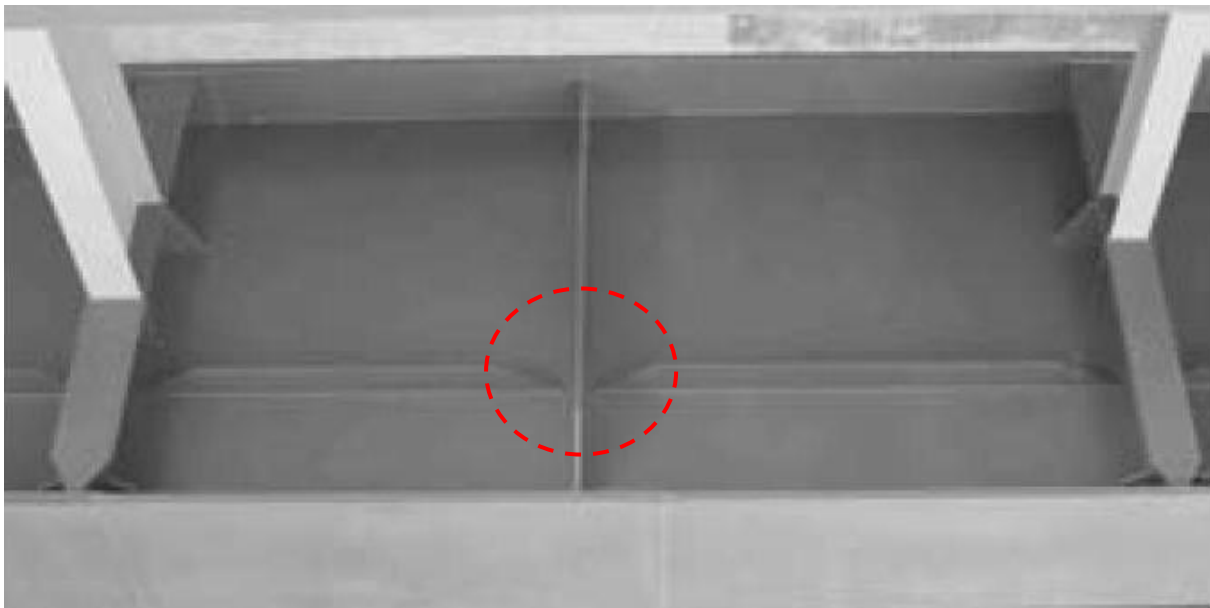
Cet assemblage est courant dans les zones de moment positif des ponts mixtes, car les variations de contrainte dans les semelles supérieures des poutres principales sont faibles. En zone de moment négatif, ou dans le cas d'assemblages entre semelles inférieures de pièces de pont ou d'entretoises avec semelles inférieures de poutres, il est souvent nécessaire d'adopter des raccords circulaires qui permettent d'atténuer la discontinuité géométrique. Le raccordement circulaire doit être bien exécuté pour bénéficier effectivement de l'amélioration de la performance.

Dans le cas de bipoutres droites, l'assemblage de la pièce de pont sur la semelle supérieure pourra être réalisé par cordons d'angle à pénétration partielle ; pour les pièces de pont en consoles et sur appuis, une soudure à pleine pénétration est souvent nécessaire. Il faut effectuer un calcul dans chaque cas.

Certaines conceptions d'ouvrages entraînent des variations de sollicitation plus importantes dans les éléments transversaux, et nécessitent donc une attention particulière pour la fatigue des assemblages. C'est le cas des pièces de pont prolongées en console à l'extérieur des poutres comme vu précédemment; c'est aussi le cas par exemple des entretoises des ponts multi-poutres, des pièces de pont et entretoises des ponts courbes...

#### 1.8.4. Raidisseurs longitudinaux

Le raidisseur longitudinal doit être arrêté en douceur, avec une pente de 1/4 par exemple, comme il est illustré sur la figure 1.16.



**Figure 1.16.** Extrémité d'un raidisseur longitudinal.

## CHAPITRE 2

### Vérifications à la fatigue des ponts-routes selon les Eurocodes

#### 2.1. Introduction

En 1975, la Commission des Communautés Européennes arrêta un programme d'actions dans le domaine de la construction, sur la base de l'Article 95 du Traité. L'objectif de ce programme était la levée des obstacles aux échanges commerciaux et l'harmonisation des spécifications techniques [7].

Dans le cadre de ce programme d'action, la Commission prit l'initiative d'établir un ensemble de règles techniques harmonisées pour le calcul des ouvrages de construction. Ces règles, dans un premier stade, serviraient d'alternative aux règles nationales en vigueur dans les Etats Membres et, à terme, les remplaceraient.

Pendant quinze ans, la Commission, avec l'aide d'un Comité Directeur comportant des Représentants des Etats Membres, pilota le développement du programme des Eurocodes, ce qui conduisit au cours des années 80 à la première génération de codes européens.

En 1989, la Commission et les Etats Membres de l'Union Européenne (UE) et de l'Association Européenne de Libre Echange (AELE) décidèrent, sur la base d'un accord entre la Commission et le CEN, de transférer au CEN par une série de Mandats l'élaboration et la publication des Eurocodes, afin de leur conférer par la suite un statut de Normes Européennes (EN). Ceci établit de facto un lien entre les Eurocodes et les dispositions de toutes les Directives du Conseil et/ou Décisions de la Commission concernant les normes européennes (par exemple la Directive du Conseil 89/106/CEE sur les Produits de Construction – DPC – et les Directives du Conseil 93/37/CEE, 92/50/CEE et 89/440/CEE sur les marchés publics de travaux et services ainsi que les Directives équivalentes de l'AELE destinées à la mise en place du marché intérieur).

Le programme des Eurocodes Structuraux comprend les normes suivantes, chacune étant en général constituée d'un certain nombre de Parties :

- ◆ EN 1990, Eurocode : Bases de calcul des structures ;
- ◆ EN 1991, Eurocode 1 : Actions sur les structures ;
- ◆ EN 1992, Eurocode 2 : Calcul des structures en béton ;
- ◆ EN 1993, Eurocode 3 : Calcul des structures en acier ;
- ◆ EN 1994, Eurocode 4 : Calcul des structures mixtes acier-béton ;

- ◆ EN 1995, Eurocode 5 : Calcul des structures en bois ;
- ◆ EN 1996, Eurocode 6 : Calcul des structures en maçonnerie ;
- ◆ EN 1997, Eurocode 7 : Calcul géotechnique ;
- ◆ EN 1998, Eurocode 8 : Calcul des structures pour leur résistance aux séismes ;
- ◆ EN 1999, Eurocode 9 : Calcul des structures en aluminium.

## 2.2. Charges de fatigue et combinaisons de charges

### 2.2.1. Les différents modèles de charge

La circulation du trafic sur les ponts engendre un spectre de contraintes qui peut conduire à la fatigue. Ce spectre dépend des charges d'essieu, de la géométrie des véhicules, de leur espacement, de la composition du trafic ainsi que de ses effets dynamiques. Cinq modèles de charges verticales de fatigue sont définis dans l'EN 1991-2 [1].

#### 2.2.1.1. Modèle de charge de fatigue 1 (analogue FLM1)

Le modèle 1 ou FLM1 (pour Fatigue Load Model 1) est bâti à partir du modèle de charge LM1 avec des intensités de charge légèrement réduites. Le modèle de charge 1 (LM1) consiste en deux systèmes partiels :

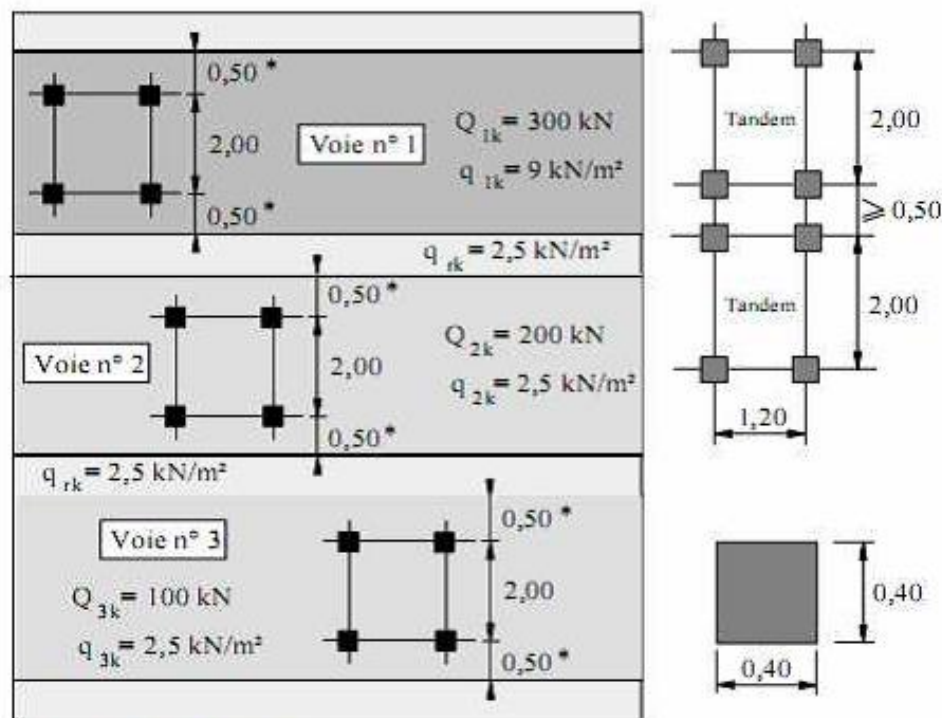
- ◆ des charges concentrées à doubles essieu (tandem : TS), chaque essieu ayant pour poids :  $\alpha_Q Q_k$ , où  $\alpha_Q$  sont des coefficients d'ajustement ;
- ◆ des charges uniformément réparties (système UDL), avec un poids au mètre carré de voie conventionnelle égale à :  $\alpha_q q_k$ .

où :  $\alpha_Q$  et  $\alpha_q$  sont des coefficients d'ajustement déterminés en fonction du trafic prévu et éventuellement des différentes classes d'itinéraires et dont les valeurs sont données dans l'annexe nationale.

#### 2.2.1.2. Modèle de charge de fatigue 2 (analogue FLM2)

Le modèle de charge de fatigue 2 consiste en un ensemble de camions idéalisés, appelés camions « fréquents ». Ils sont définis par le tableau 4.6 de l'EN 1991-2 [1] comme suit :

- ◆ Le nombre d'essieux et leur espacement ;
- ◆ La valeur fréquente de chaque charge d'essieu ;
- ◆ Les surfaces de contact des roues et la distance transversale entre les contraintes maximales et minimales sont déterminées à partir des effets les plus sévères produits par des camions différents, considérés séparément, circulant seuls le long de la voie appropriée.



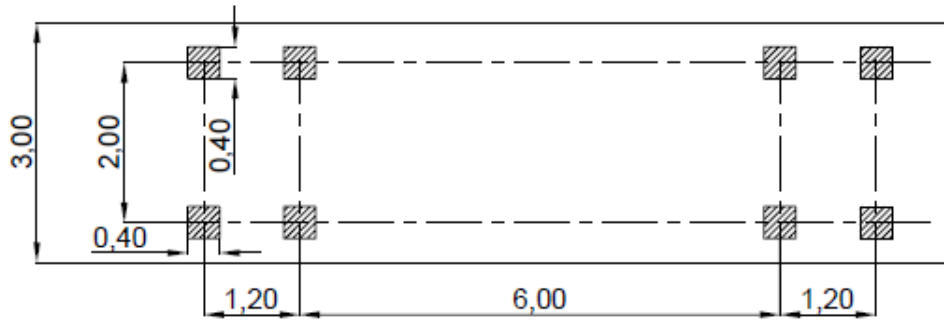
**Figure 2.1.** Modèle de charge FLM1

Les modèles de charges de fatigue 1 et 2 sont destinés à être utilisés pour vérifier si la durée de vie vis-à-vis la fatigue peut être considérée comme illimitée lorsqu'une limite de fatigue à amplitude de contrainte constante est fixée. C'est pourquoi ils conviennent pour les constructions en acier et peut être inadaptés pour d'autres matériaux. Le modèle de charge de fatigue 1 est généralement conservateur et recouvre automatiquement les effets du chargement de plusieurs voies. Le modèle de charge de fatigue 2 est plus précis que le modèle 1 lorsque la présence simultanée de plusieurs camions sur le pont peut être négligée dans les vérifications vis-à-vis de la fatigue. Si ce n'est pas le cas, il convient de ne l'utiliser que complété par des données supplémentaires. L'Annexe Nationale peut fixer les conditions d'emploi des modèles de charges de fatigue 1 et 2.

### 2.2.1.3. Modèle de charge de fatigue 3 (analogue FLM3)

Ce modèle consiste en quatre essieux, chacun ayant deux roues identiques. Sa géométrie est représentée par la figure 2.2. Le poids de chaque essieu est égal à 120 kN et la surface de contact de chaque roue est un carré de 40 m de côté.





**Figure 2.2.** Modèle de charge de fatigue 3

Les contraintes maximales et minimales ainsi que les variations de contraintes pour chaque cycle, c'est-à-dire différence algébrique, sont déterminées sous l'effet du déplacement du modèle le long du pont.

L'EN 1991-2[11] autorise de prendre en compte dans certains cas deux véhicules sur la même voie.

#### 2.2.1.4. Modèle de charge de fatigue 4 (analogue FLM4)

Le modèle de charges de fatigue 4 consiste en un ensemble de camions standard produisant ensemble des effets équivalents à ceux du trafic typique des routes européennes. L'ensemble de ces camions est adapté aux combinaisons de trafic prévues sur l'itinéraire concerné, comme défini dans les tableaux 4.7 et 4.8 de l'EN 1991-2 [1].

Chaque camion standard est défini par :

- ◆ Le nombre et l'espacement des essieux ;
- ◆ La charge équivalente de chaque essieu.






La procédure à effectuer dans les calculs est résumée ci-après :

- ◆ A partir du tableau 4.7, colonnes 4,5 ou 6 selon le cas, on choisit le pourcentage de chaque camion standard dans le flux de trafic ;
- ◆ On définit le nombre total annuel de véhicules à considérer pour l'ensemble de la chaussée,  $\Sigma N_{\text{obs}}$  ;
- ◆ Chaque camion standard est supposé parcourir le pont en l'absence de tout autre véhicule.

Le nombre de véhicules  $N_{\text{obs}}$  de véhicules lourds par voies lentes sont indiqués dans le tableau de l'EN 1991-1-1[2].

L'EN 1991-2 [1] prescrit d'utiliser la méthode de la « goutte d'eau » ou celle dite de réservoir afin de déterminer le nombre de cycles de variations des contraintes et le spectre au passage des camions sur le pont.

**Tableau 2.1.** Tables de répartitions des camions en fonction du trafic (Tableau 4.7 EC1-2 [1])

| TYPE DE VEHICULE  |                              |                                    | TYPE DE TRAFIC         |                        |                        |                       |
|---|------------------------------|------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| 1   | 2                            | 3                                  | 4                      | 5                      | 6                      | 7                     |
|   |                              |                                    | Longues distances      | Distance moyennes      | Trafic local           |                       |
| <b>CAMION</b>   | Espacement des essieux (m)   | Charges d'essieu équivalentes (KN) | Pourcentage de camions | Pourcentage de camions | Pourcentage de camions | Type de roue          |
|    | 4,5                          | 70<br>130                          | 20,0                   | 40,0                   | 80,0                   | A<br>B                |
|   | 4,20<br>1,30                 | 70<br>120<br>120                   | 5,0                    | 10,0                   | 5,0                    | A<br>B<br>B           |
|  | 3,20<br>5,20<br>1,30<br>1,30 | 70<br>150<br>90<br>90<br>90        | 50,0                   | 30,0                   | 5,0                    | A<br>B<br>C<br>C<br>C |
|  | 3,40<br>6,00<br>1,80         | 70<br>140<br>90<br>90              | 15,0                   | 15,0                   | 5,0                    | A<br>B<br>B<br>B      |
|  | 4,80<br>3,60<br>4,40<br>1,30 | 70<br>130<br>90<br>80<br>80        | 10,0                   | 5,0                    | 5,0                    | A<br>B<br>C<br>C<br>C |

### 2.2.1.5. Modèle de charge de fatigue 5 (élaboré à partir de données de trafic routier enregistré)

Le modèle de charge de fatigue 5 consiste en l'application directe des données de trafic enregistrées, complétées, le cas échéant, par des extrapolations statistiques et prospectives appropriées.

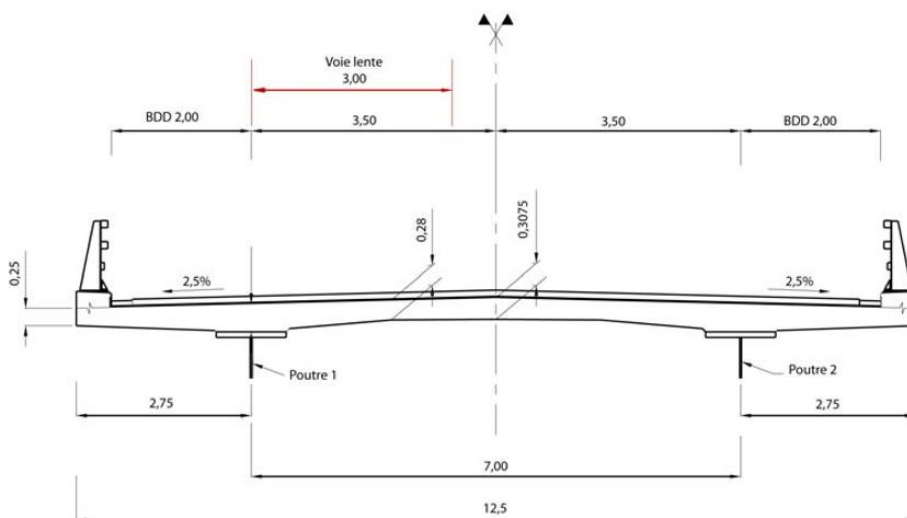
### 2.2.2. Positionnement des charges de fatigue

Pour les vérifications vis-à-vis de la fatigue, il convient de définir les catégories de trafic sur les ponts au mois par :

- ◆ Le nombre de voies lentes ;
- ◆ Le nombre  $N_{obs}$  de véhicules lourds (PTAC supérieur à 100 KN) observés ou estimés, par an et par voie lente (c'est-à-dire une voie principalement empruntée par les véhicules lourds).

**Tableau 2.2.** Nombre indicatif de véhicules lourds prévus par voie lente (Tableau 4.5 de l'EN1991-2 [1])

| Catégories de trafic |  | $N_{obs}$ par an et par voie lente |
|----------------------|--|------------------------------------|
| 1                    | Routes et autoroutes à 2 voies ou plus dans chaque sens, avec un trafic de camions élevé | $2.0 \times 10^6$                  |
| 2                    | Routes et autoroutes avec un trafic de camions moyen                                     | $0.5 \times 10^6$                  |
| 3                    | Routes principales avec un faible trafic de camions                                      | $0.125 \times 10^6$                |
| 4                    | Routes locales avec un faible trafic de camions  | $0.05 \times 10^6$                 |



**Figure 2.3.** Position de la voie lente de gauche à considérer pour l'étude des effets généraux

On peut toutefois être amené à envisager une zone de voie lente plus large, afin de tenir compte d'éventuelles variations ultérieures du profil en travers. (Figure 2.4).

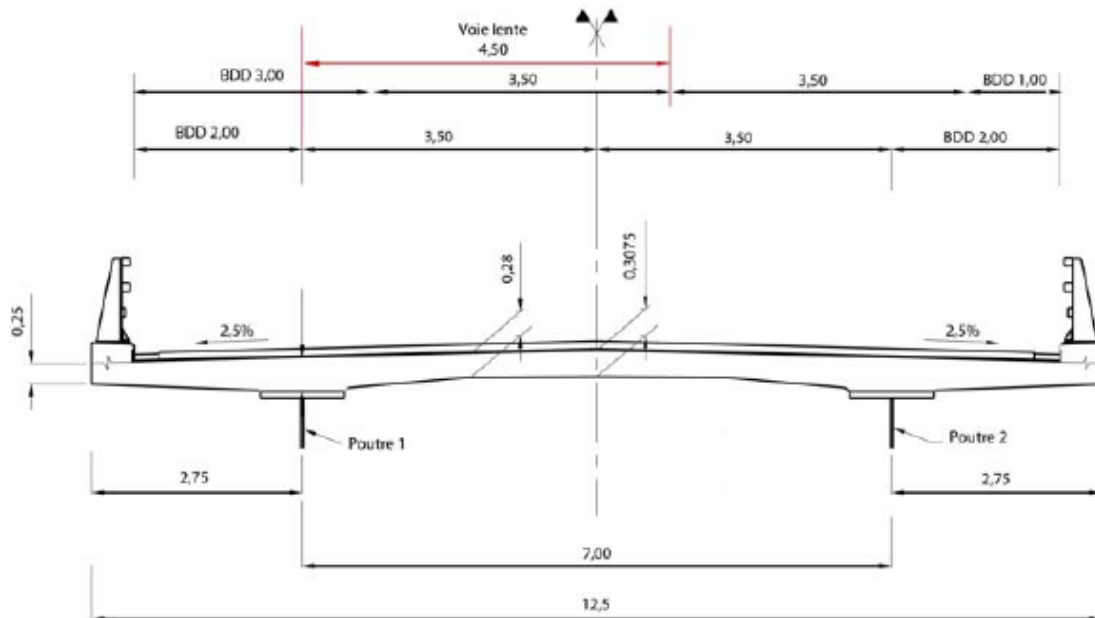


Figure 2.4. Zone de voie lente de gauche élargie.

### 2.2.3. Trafic concomitant

L'utilisation des modèles FLM1, FLM2 et FLM3 se fait sans trafic concomitant. Les modèles FLM5 ou FLM4 affiné correspondent à une simulation ou un enregistrement de trafic réel ; ils intègrent donc déjà les concomitances.

Pour le modèle FLM3, l'annexe nationale précise que la règle de l'article 4.6.3(3) de l'EC1-2 [1] n'est pas à appliquer. Cette règle prévoit la possibilité d'ajouter un petit camion derrière le camion calibré, semblable à celui-ci en géométrie mais avec 30 % de sa charge. Dans certains cas (sur appui notamment), les effets combinés de deux véhicules circulant sur la même voie peuvent être sensiblement plus élevés que ceux d'un unique véhicule.

### 2.2.4. Combinaison d'actions de fatigue et trafic concomitant

L'article 6.8.3 de l'EC2-1-1 [3] indique la combinaison d'actions à appliquer pour une vérification à la fatigue se décompose une combinaison de base  $C_0$  des charges non-cycliques similaire à la combinaison fréquente utilisée pour l'ELS et une charge cyclique de fatigue  $Q_{fat}$  qui peut principalement être l'action du trafic (convois FLM) ou l'action du vent.

$$C_0 + Q_{fat} \quad (2.1)$$

La combinaison de base est équivalente à la combinaison fréquente de l'ELS. Dans la plupart des cas, cette combinaison s'écrit sous la forme :

$$G_{k,sup}(\text{ou } G_{k,inf}) + (0 \text{ ou } S) + 0.6 \Delta\theta \quad (2.2)$$

où :

$G_{k,sup}$  : sollicitations caractéristiques sous charge permanente défavorable ;

$G_{k,inf}$  : sollicitations caractéristiques sous charge permanente favorable ;

S : sollicitations caractéristiques action dues au retrait du béton ;

$\Delta\theta$  : sollicitations caractéristiques dues au gradient thermique.

Comme indiqué dans l'article 6.8.3 (3) de l'EC2-1-1[3], on doit prendre en compte la combinaison de base la plus défavorable dans le temps.

### 2.3. Justifications à l'ELU de fatigue des ponts mixtes

La vérification à la fatigue consiste à s'assurer que la probabilité de ruine d'un ouvrage par propagation de fissure à l'intérieur d'un composant du tablier soumis à des variations répétées de contraintes reste faible. Les composants à vérifier en fatigue dans un pont mixte sont :

- ◆ La charpente métallique et ses connecteurs,
- ◆ Les armatures passives de la dalle,
- ◆ Le béton de la dalle.

L'EN1994-2 [4], § 6.8 définit les conditions de la vérification à la fatigue.

Les Eurocodes proposent trois approches pour la vérification de la résistance à la fatigue :

- ◆ Une méthode générale avec détermination du spectre d'étendues de contrainte en utilisant les modèles de charge de fatigue FLM4 ou FLM5 et un calcul d'endommagement ;
- ◆ Une méthode de l'étendue de contrainte équivalente, appelée par la suite, méthode équivalente, avec détermination de l'étendue de contrainte qui donnerait un endommagement équivalent en utilisant le modèle de charge de fatigue FLM3 pour les ponts routes ;
- ◆ Une méthode alternative (EC2-1-1 [3] §6.8.6) pour une vérification simplifiée des armatures passives avec utilisation d'une charge cyclique fréquente qui, plus précisément,

peut se faire avec la combinaison de charge fréquente, en faisant intervenir le modèle principal de charge LM1 pour les ponts routiers.

### 2.3.1. Méthode des étendues de contraintes équivalentes

#### 2.3.1.1. Format général de vérification

La vérification à la fatigue d'un composant du tablier consiste à vérifier l'inégalité suivante :

$$\gamma_F \Delta\sigma_E \leq \frac{\Delta\sigma_R}{\gamma_{fat}} \tag{2.3}$$

$\gamma_F$  est le coefficient partiel appliqué aux charges ;

$\Delta\sigma_E$  est l'étendue de contrainte équivalente d'amplitude constante ;

$\Delta\sigma_R$  résistance à la fatigue du composant étudié ;

$\gamma_{fat}$  est le coefficient partiel de résistance à la fatigue.

#### 2.3.1.2. Justification de la charpente

##### a) Catégorie de détail

L'EN 1993-1-9 [5] a prévu une classification des assemblages réels rencontrés dans les constructions les plus critiques vis-à-vis de la fatigue avec, pour certains, la prise en compte de leurs conditions d'exécution. La désignation numérique attribuée à un détail constructif particulier pour une direction donnée de contraintes afin d'indiquer la courbe de résistance à la fatigue à appliquer pour évaluer sa résistance (ce nombre correspond à la résistance de référence à la fatigue  $\Delta\sigma_c$  en N/mm<sup>2</sup>). La classification comporte huit tableaux de 8.1 à 8.8 dans l'EN 1993-1-9 [5]. Les principaux détails rencontrés le long d'un pont bipoutre mixte sont récapitulés sur la figure 2.5.

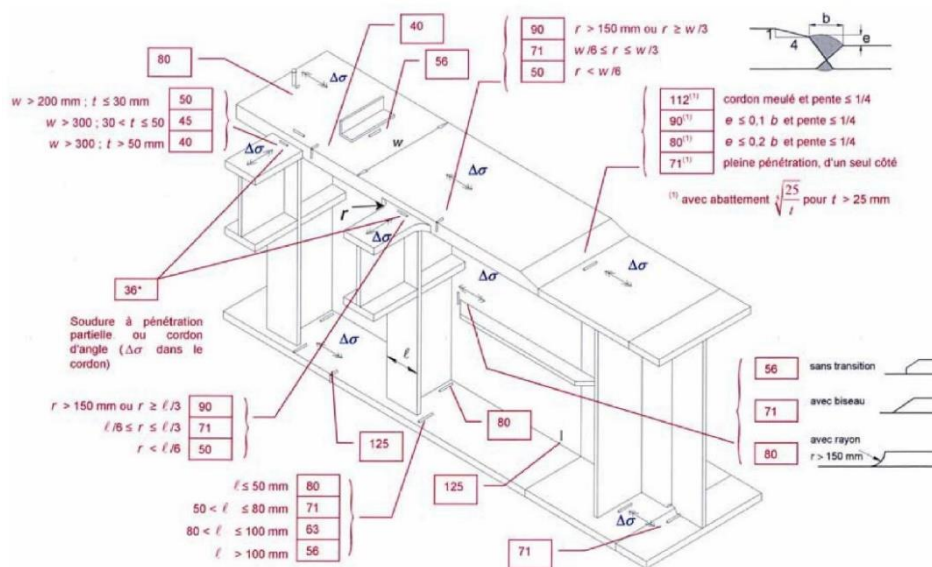


Figure 2.5. Détails classiques d'un bipoutre mixte (en MPa)

**b) Format de vérification**

La vérification à la fatigue d'un détail de structure soumise à des cycles d'étendues de contrainte d'amplitude constante  $\Delta\sigma$  consiste à vérifier, selon les composantes étudiées, les conditions suivantes :

- ◆ En cas de contraintes normales :

$$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2} \leq \frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}} \quad (2.4)$$

- ◆ En cas de contrainte de cisaillement :

$$\gamma_{Ff} \Delta\tau_{E,2} \leq \frac{\Delta\tau_c}{\gamma_{Mf}} \quad (2.5)$$

- ◆ En cas de combinaison d'étendue de contrainte  $\Delta\sigma_{E,2}$   $\Delta\tau_{E,2}$

$$\left( \frac{\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_c / \gamma_{Mf}} \right)^3 + \left( \frac{\gamma_{Ff} \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_c / \gamma_{Mf}} \right)^3 \leq 1 \quad (2.6)$$

où :

$\gamma_{Ff}$  : coefficient partiel appliqué aux charges ;

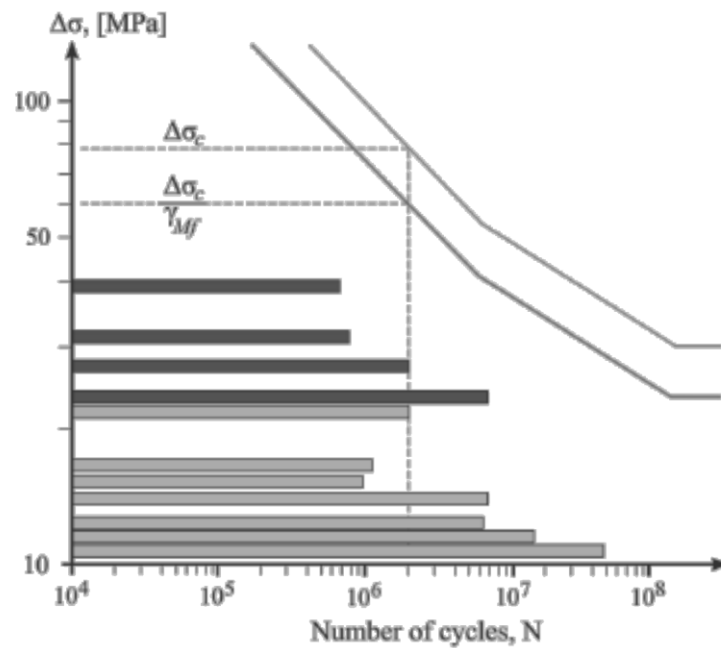
$\Delta\sigma_{E,2}$  : étendue de contrainte normale équivalente d'amplitude constante relative à 2 millions de cycles ;

$\Delta\sigma_c$  et  $\Delta\tau_c$  : valeur de référence de la résistance à la fatigue à 2 millions de cycles (catégorie de détail) ;

$\Delta\tau_{E,2}$  : étendue de contrainte de cisaillement équivalente d'amplitude constante relative à 2 millions de cycles ;

$\gamma_{Mf}$  : le coefficient partiel de résistance à la fatigue.

La figure 2.6 illustre un exemple de justification d'une catégorie de détail par la méthode des étendues des contraintes équivalentes.



**Figure 2.6.** Illustration de la méthode des étendues de contraintes équivalentes [8]

### c) Coefficients partiels

Le coefficient partiel sur les charges de fatigue est pris égal à  $\gamma_{FF} = 1,0$  (EN 1993-2 [6], §9.3).

Le coefficient partiel de sécurité pour la résistance à la fatigue de la charpente est pris égal à  $\gamma_{FF} = 1,35$  (Voir EN1933-1-9 [5], Tableau 3.1).

### d) Etendue de contraintes normales

Les effets du spectre d'étendues de contrainte normales peuvent être représentés par l'étendue de contrainte équivalente correspondant à 2 millions de cycles sous FLM3 est donnée par :

$$\Delta\sigma_{E,2} = \lambda\Phi \Delta\sigma_p = \lambda\Phi [\sigma_{\max,f} - \sigma_{\min,f}] \quad (2.7)$$

où :

$\Delta\sigma_p = \sigma_{\max,f} - \sigma_{\min}$  est l'étendue de contrainte maximale due au passage du camion du modèle FLM3;

$\sigma_{\max,f}$  et  $\sigma_{\min}$  sont calculées au niveau de la soudure ;

$\Phi$  est le coefficient de dommage équivalent d'impact ;

$\lambda$  est le coefficient de dommage équivalent.

### e) Calcul des sollicitations

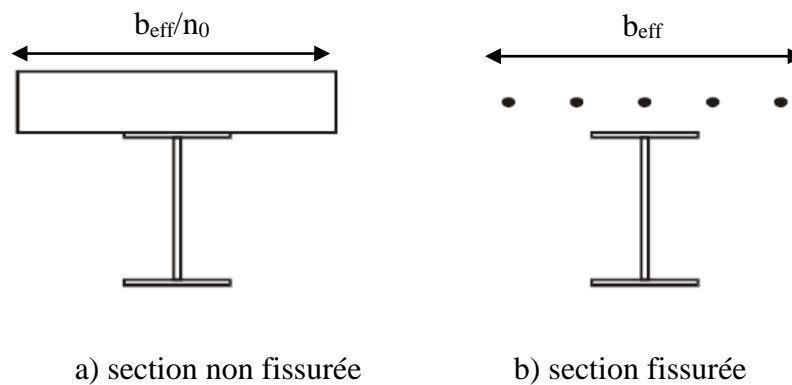
Les sollicitations sont issues d'une analyse globale élastique. L'analyse est faite dans les mêmes conditions que pour les vérifications de l'ouvrage en service en prenant en considération les zones



fissurées sur appui intermédiaire (EN1994-2 [4] §5.4.1 et §5.4.2). Le calcul des sollicitations est effectué à partir de la combinaison de base non cyclique accompagnée de l'effet du convoi de fatigue [EN1992-1-1[3] §6.8.3] comme il a été présenté dans le §2.2.4.

Dans une section mixte acier-béton, les moments positifs sont repris par une section résistante mixte homogénéisée composée de la dalle et de la poutre métallique. Sous moment négatif, la section résistante est composée de la section de la poutre métallique et de la section de l'armature de la dalle disposée dans la largeur efficace comme il est montré sur la figure 2.7.

Pour homogénéiser la section mixte (non fissurée), on divise la largeur efficace de la dalle, telle que définie dans la clause 4.2.2.2 de l'EN 1994-2 [4], par un coefficient d'équivalence de courte durée  $n_0 = E_a / E_{cm}$  (de l'ordre de 6.16) avant de l'ajouter à l'aire de charpente métallique.



**Figure 2.7.** Sections résistantes des poutres mixtes.

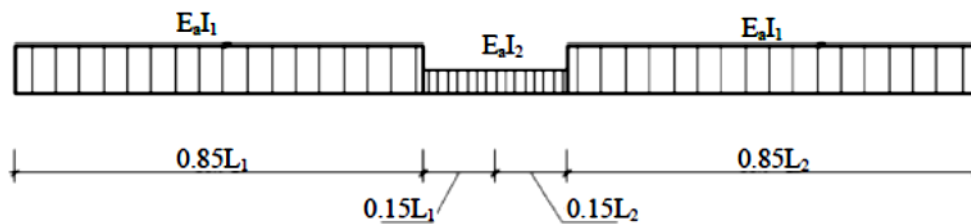
Pour déterminer les zones de part et d'autre de chaque appui intermédiaire, l'EN 1994-2 [4] propose deux méthodes.

La première méthode, applicable pour tous les types de ponts à poutres mixtes, consiste à effectuer deux analyses distinctes :

- ◆ Dans une première analyse, on détermine l'enveloppe des sollicitations pour les combinaisons caractéristiques, en incluant les effets à long terme et en utilisant la rigidité en flexion des sections équivalentes en acier non fissurées  $E_a I_1$ . Cette analyse est dite "analyse non fissurée".
- ◆ Dans une deuxième analyse dite "analyse fissurée", on détermine les sollicitations en adoptant dans les régions où la contrainte, obtenue de l'analyse non fissurée, dépasse deux fois la résistance moyenne à la traction du béton  $f_{ctm}$ , une rigidité réduite égale à  $E_a I_2$ .  $I_2$  étant l'inertie de flexion de la poutre métallique et des armatures tendues situées dans la largeur participante

$b_{\text{eff}}^-$  définie sur appui. Cette distribution de rigidité peut être utilisée pour les états limites ultimes et pour les états limites de service.

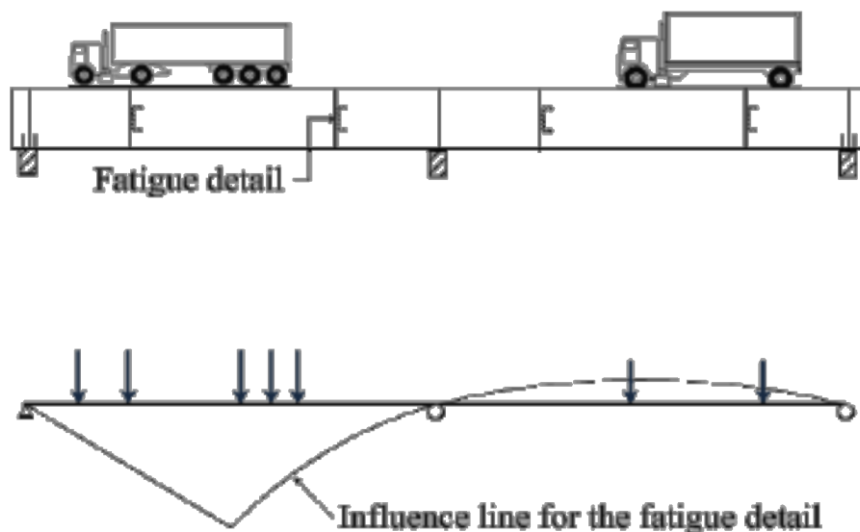
La deuxième méthode est applicable pour les poutres continues avec semelle en béton non précontrainte disposée au-dessus de la section en acier, et lorsque tous les rapports de portée entre appuis des travées continues adjacentes (courte/longue) sont d'au moins 0,6. L'effet de la fissuration peut être pris en compte en utilisant la rigidité en flexion  $E_a I_2$  sur 15% de la portée de part et d'autre de chaque appui intermédiaire, et la rigidité non fissurée  $E_a I_1$  partout ailleurs (Figure 2.8).



**Figure 2.8.** Distribution des rigidités

#### f) Calcul des contraintes normales

Les contraintes sont calculées pour chaque catégorie de détail en déterminant les positions défavorable (donnant  $\sigma_{s,\text{max}}$ ) et favorable (donnant  $\sigma_{s,\text{min}}$ ) l'ouvrage. La figure 2.9 illustre l'utilisation des lignes d'influence pour déterminer les positions les plus défavorables.



**Figure 2.9.** Utilisation des lignes d'influence pour la détermination de  $\sigma_{s,\text{max}}$  et  $\sigma_{s,\text{min}}$

L'amplitude de contrainte  $\Delta\sigma_p$  s'obtient par  $\Delta\sigma_p = [\sigma_{\max,f} - \sigma_{\min,f}]$  où les contraintes  $\sigma_{\max,f}$  et  $\sigma_{\min,f}$  sont calculées à partir de  $M_{Ed,\max,f}$  et  $M_{Ed,\min,f}$  avec le coefficient d'équivalence à court terme  $n_0 = 6,16$ . Avec les conventions de signe de l'EN1994-2 [4] §6.8, le moment maximal  $M_{Ed,\max,f}$  est celui qui engendre l'effort de traction maximal dans la dalle.

Pour le calcul des contraintes, 3 cas sont à envisager [10] :

◆ **1<sup>er</sup> cas**

$M_{Ed,\min,f}$  et  $M_{Ed,\max,f}$  induisent des contraintes de traction dans la dalle. Alors les contraintes  $\sigma_{\max,f}$  et  $\sigma_{\min,f}$  sont déterminées, en considérant les caractéristiques fissurées de la section mixte, à partir des formules suivantes:

$$\sigma_{\max,f} = M_{a,Ed} \frac{V_a}{I_a} + M_{c,Ed} \frac{V_2}{I_2} + M_{FLM3,\max} \frac{V_2}{I_2} \quad (2.8)$$

$$\sigma_{\min,f} = M_{a,Ed} \frac{V_a}{I_a} + M_{c,Ed} \frac{V_2}{I_2} + M_{FLM3,\min} \frac{V_2}{I_2} \quad (2.9)$$

En décomposant  $M_{Ed,\max,f}$  (ou  $M_{Ed,\min,f}$ ) en  $M_{a,Ed}$  repris par la section en fonctionnement de charpente seule,  $M_{c,Ed}$  issu de la combinaison de base non cyclique et repris par la section en fonctionnement mixte fissuré, et enfin  $M_{FLM3,\max}$  (ou  $M_{FLM3,\min}$ ) dû au passage du convoi FLM3 et repris par la section en fonctionnement mixte fissuré, l'amplitude de contrainte est calculé par la formule :

$$\Delta\sigma = \Delta M_{FLM3} \frac{V_2}{I_2} \quad (2.10)$$

Dans ce premier cas, l'amplitude de contraintes est indépendante de l'état de contraintes sous combinaison de base non cyclique.

◆ **2<sup>ème</sup> cas**

$M_{Ed,\min,f}$  et  $M_{Ed,\max,f}$  induisent des contraintes de compression dans la dalle. Alors les contraintes  $\sigma_{\max,f}$  et  $\sigma_{\min,f}$  sont déterminées, en considérant les caractéristiques fissurées, à partir des formules suivantes :

$$\sigma_{\max,f} = M_{a,Ed} \frac{V_a}{I_a} + M_{c,Ed} \frac{V_1}{I_1} + M_{FLM3,\max} \frac{V_1}{I_1} \quad (2.11)$$

$$\sigma_{\min,f} = M_{a,Ed} \frac{V_a}{I_a} + M_{c,Ed} \frac{V_1}{I_1} + M_{FLM3,\min} \frac{V_1}{I_1} \quad (2.12)$$

Finalement, l'amplitude de contrainte s'écrit :

$$\Delta\sigma = \Delta M_{FLM3} \frac{V_1}{I_1} \quad (2.13)$$

Dans ce deuxième cas, l'amplitude de contraintes est aussi indépendante de l'état de contraintes sous combinaison de base non cyclique.

◆ **3<sup>ème</sup> cas**

$M_{Ed,max,f}$  induit des contraintes de traction dans la dalle et  $M_{Ed,min,f}$  induit des contraintes de compression dans la dalle. Alors les contraintes s'écrivent :

$$\sigma_{max,f} = M_{a,Ed} \frac{V_a}{I_a} + M_{c,Ed} \frac{V_2}{I_2} + M_{FLM3,max} \frac{V_2}{I_2} \quad (2.14)$$

$$\sigma_{min,f} = M_{a,Ed} \frac{V_a}{I_a} + M_{c,Ed} \frac{V_1}{I_1} + M_{FLM3,min} \frac{V_1}{I_1} \quad (2.15)$$

Finalement, l'amplitude de contrainte s'écrit :

$$\Delta\sigma = M_{c,Ed} \left[ \frac{V_2}{I_2} - \frac{V_1}{I_1} \right] + M_{FLM3,max} \frac{V_2}{I_2} - M_{FLM3,min} \frac{V_1}{I_1} \quad (2.16)$$

Dans ce troisième cas, l'amplitude de contraintes n'est pas indépendante de l'état de contraintes sous combinaison de base non cyclique.

Dans ces formules :

$\frac{V_a}{I_a}$  est le module de flexion de l'acier de charpente seule ;

$\frac{V_1}{I_1}$  est le module de flexion de la section mixte non fissurée (avec  $n_{eq} = n_0$ );

$\frac{V_2}{I_2}$  est le module de flexion de la section mixte fissurée.

**g) Calcul des contraintes de cisaillement**

Les contraintes de cisaillement à une fibre quelconque de la section transversale de la poutre métallique sont calculées à partir de la formule suivante :

$$\Delta\tau_{E,2} = \frac{\Delta V \cdot S_G}{I_{Gs} \cdot t_w} \quad (2.17)$$

où :

$$\Delta V = V_{max} - V_{min} ;$$

$S_G$  : moment statique, par rapport à l'axe neutre, de la partie de la section située sur sa partie supérieure ;

$I_{sG}$  : moment d'inertie de la section droite de la poutre seule par rapport à l'axe neutre ;

$t_w$  : épaisseur de l'âme de la poutre.

### h) Coefficient de dommage équivalent

Le coefficient de dommage équivalent  $\lambda$  est donné par :

$$\lambda = \prod_{i=1}^4 \lambda_i \leq \lambda_{\max} \quad (2.18)$$

#### a. Coefficient $\lambda_1$

Le facteur  $\lambda_1$  prend en compte les effets de l'endommagement dû au volume de trafic en fonction de la longueur  $L$  de la ligne d'influence de la sollicitation considérée. Il contient également un « facteur de passage » de  $N_0$  cycles par an à  $2 \cdot 10^6$  cycles en 100 ans.

Suivant l'emplacement de la section étudiée et le type de sollicitations, des abaques issus de l'EN1993-2 [6] fournissent la valeur de  $\lambda_1$  correspondante.

- ◆ Pour le moment, on obtient :

| Lieu de la section      | Longueur de la ligne d'influence                       | Valeur de $\lambda_1$      |
|-------------------------|--|----------------------------|
| En travée de rive       | $L = L_t \text{ de rive}$                              | $2,55 - [0,7 (L-10) / 70]$ |
| Sur appui intermédiaire | $L = (L_t \text{ de rive} + L_{t\text{centrale}}) / 2$ | $1,70 + [0,5(L-30) / 50]$  |
| En travée centrale      | $L = L_t \text{ centrale}$                             | $2,55 - [0,7 (L-10) / 70]$ |

- ◆ Pour l'effort tranchant, on obtient :

| Lieu de la section      | Longueur de la ligne d'influence | Valeur de $\lambda_1$      |
|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| En travée de rive       | $L = 0,4 L_t \text{ de rive}$    | $2,55 - [0,7 (L-10) / 70]$ |
| Sur appui intermédiaire | $L = L_t \text{ centrale}$       | $1,70 + [0,5(L-30) / 50]$  |
| En travée centrale      | $L = 0,4 L_t \text{ centrale}$   | $2,55 - [0,7 (L-10) / 70]$ |

**b. Coefficient  $\lambda_2$** 

$\lambda_2$  rend compte de la composition du trafic :

$$\lambda_2 = \frac{Q_{m1}}{Q_0} \left( \frac{N_{obs}}{N_0} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (2.19)$$

où :

- ◆  $N_{obs}$  est le nombre total annuel des poids-lourds circulant sur la voie lente (voir EN 1993-2 [6] §9.2.2(2)) ;

$Q_{m1}$  est le poids moyen (kN) des poids-lourds circulant sur la voie lente, obtenu à partir de :

$$Q_{m1} = \left( \frac{\sum n_i Q_i^5}{\sum n_i} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (2.20)$$

- ◆  $Q_i$  est le poids (kN) du poids-lourd  $i$  circulant sur la voie lente, tel que spécifié par l'autorité compétente ;
- ◆  $n_i$  est le nombre de poids-lourds de poids  $Q_i$  circulant sur la voie lente, tel que spécifié par l'autorité compétente.

Le nombre indicatif de véhicules lourds prévus par an et par voie lente doit être donné par le cahier des charges du projet. A défaut de cahier des charges, on peut retenir les hypothèses suivantes :

- ◆ une catégorie de trafic 2 (soit "route et autoroute avec un trafic de camions moyens"). Le nombre indicatif de véhicules lourds prévus par voie lente est alors de  $N_{obs} = 0,5 \cdot 10^6$  ;
- ◆ une composition du trafic moyenne distance définie pour le modèle de charge de fatigue 4 (FLM4). Le poids moyen  $Q_{m1}$  des camions par voie lente est alors  $Q_{m1} = 445$  kN.
- ◆ les valeurs de référence pour  $Q_0$  et  $N_0$  valent :  $Q_0 = 480$  kN (poids de FLM3) et  $N_{obs} = 0,5 \cdot 10^6$ .

**c. Coefficient  $\lambda_3$** 

$\lambda_3$  est le coefficient qui rend compte de la durée de vie de calcul du pont ;

$$\lambda_3 = \left( \frac{t_{Ld}}{100} \right)^{1/5} \quad (2.21)$$

**Tableau2.3.** Valeurs de  $\lambda_3$

|                                  |       |       |       |       |       |      |       |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| Durée de vie de calcul en années | 50    | 60    | 70    | 80    | 90    | 100  | 120   |
| Coefficient $\lambda_3$          | 0,871 | 0,903 | 0,931 | 0,956 | 0,979 | 1,00 | 1,037 |

**d. Coefficient  $\lambda_4$** 

$\lambda_4$  prend en compte les effets du trafic lourd sur les autres voies lentes définies au projet. Dans le cas d'une seule voie lente,  $\lambda_4 = 1,0$ . Dans le cas présent, le coefficient dépend de l'influence transversale de chaque voie lente sur les sollicitations dans les poutres principales :

$$\lambda_4 = \left[ 1 + \frac{N_2}{N_1} \left( \frac{\eta_2 Q_{m2}}{\eta_1 Q_{m1}} \right)^5 + \frac{N_3}{N_1} \left( \frac{\eta_3 Q_{m3}}{\eta_1 Q_{m1}} \right)^5 + \dots + \frac{N_k}{N_1} \left( \frac{\eta_k Q_{mk}}{\eta_1 Q_{m1}} \right)^5 \right]^{1/5} \quad (2.22)$$

où :

K est le nombre de voies supportant un trafic de poids lourds ;

$N_j$  est le nombre de poids-lourds par an sur la voie j ;

$Q_{mj}$  est le poids moyen des poids-lourds sur la voie j ;

$\eta_j$  est la valeur de la ligne d'influence au centre de la voie j pour la sollicitation qui produit l'étendue de variation de contrainte.

$$\eta = \frac{1}{2} - \frac{e}{b}$$

avec :

e excentricité de la charge FLM3 par rapport à l'axe de l'ouvrage ;

b distance entre les poutres principales.

**e. Coefficient limite  $\lambda_{\max}$** 

Pour le moment de flexion, le coefficient de dommage  $\lambda$  doit rester inférieur à une valeur maximale  $\lambda_{\max}$  donnée par le tableau ci-dessous (et obtenue par lecture d'abaques de l'EN1993-2 [6]).

| Lieu de la section      | Longueur de la ligne d'influence                       | Valeur de $\lambda_{\max}$ |
|-------------------------|--|----------------------------|
| En travée de rive       | $L = L_t$ de rive                                      | 2.0                        |
| Sur appui intermédiaire | $L = (L_t \text{ de rive} + L_{t\text{centrale}}) / 2$ | $1,80 + [0,9(L-30) / 50]$  |
| En travée centrale      | $L = L_t$ centrale                                     | 2.0                        |

Pour l'effort tranchant, l'EN1993-2 [6] ne définit pas de valeur limite.

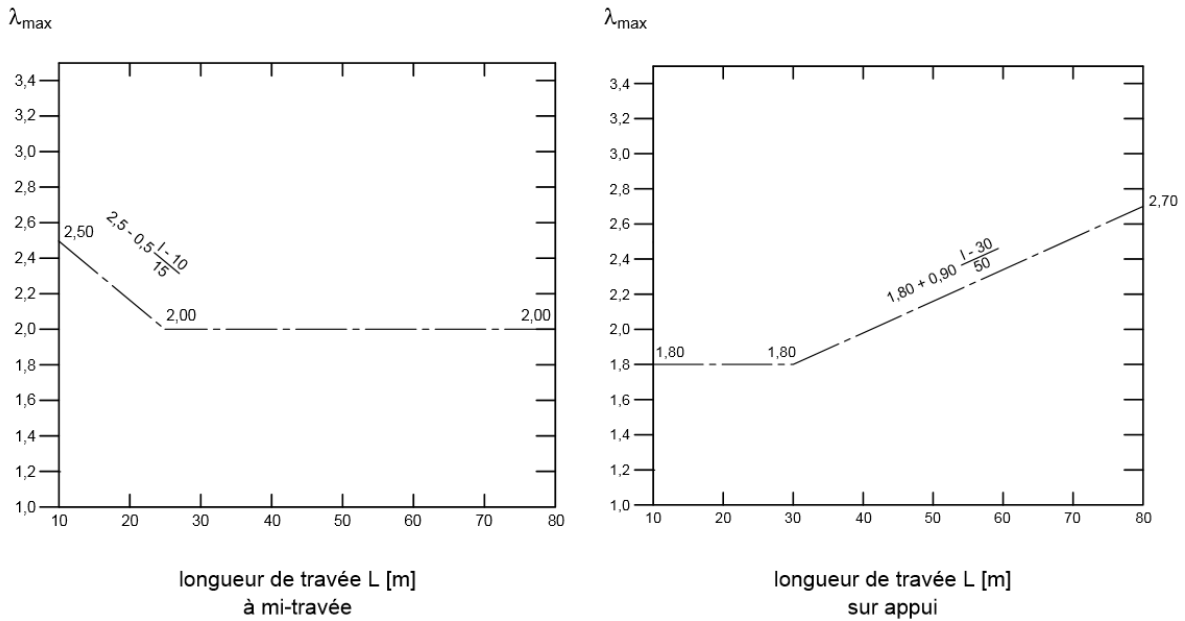


Figure 2.10.  $\lambda_{max}$  pour les moments dans les ponts routiers

i) Coefficient de dommage équivalent d'impact  $\Phi$

Les modèles 1 à 4 tiennent compte d'une majoration dynamique correspondant à une bonne qualité de revêtement. A proximité des joints de dilatation ou de chaussée, on applique à toutes les charges un coefficient de majoration dynamique supplémentaire défini à l'article 4.6.1 alinéa (6) de l'EC1-2 [1] (EN1994-2 [4] §6.8.6.14(7)) :

$$\Phi = 1.3 \left[ 1 - \frac{D}{26} \right] \geq 1.0 \tag{2.23}$$

où

D (en mètre) est la distance entre le détail vérifié en fatigue et le joint de chaussée .

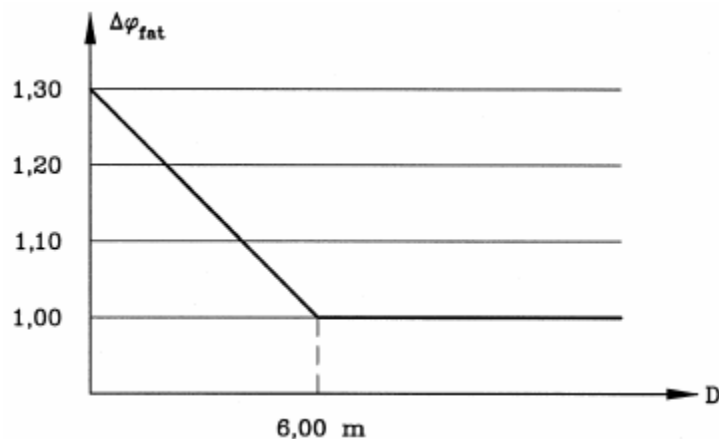


Figure 2.11. Variation du coefficient d'impact en fonction de la distance du joint de dilatation



**j) Calcul des contraintes principales**

Les contraintes principales à une fibre quelconque de la section transversale de la poutre métallique sont calculées à partir de la formule suivante :

$$\Delta\sigma_{\text{principal}} = \frac{\Delta\sigma}{2} + \sqrt{\left(\frac{\Delta\sigma}{2}\right)^2 + \Delta\tau^2} \quad (2.24)$$

**k) Résistance à la fatigue**

Comme mentionné au §2.3.1.2.2. La résistance à la fatigue pour les étendues de contraintes nominales est représentée par une série de courbes  $(\log \Delta\sigma_R) - (\log N)$  et  $(\log \Delta\tau_R) - (\log N)$  (courbes S-N), correspondant à des catégories de détails constructif typiques. Chaque catégorie de détail constructif est désignée par un nombre qui représente, en  $N/\text{mm}^2$ , la valeur de référence  $\Delta\sigma_c$  ou  $\Delta\tau_c$  pour la résistance à la fatigue à 2 millions de cycles (EN 1993-1-9 [5] §7.1).

Les courbes de résistance à la fatigue, définies en échelle bi-logarithmiques sont caractérisées pour les variations des contraintes normales par :

$N < 5 \times 10^6$  cycles : droite de pente  $-1/3$ , dite de constante de pente 3, traduisant la relation  $N \times \Delta\sigma^3 = \text{constante}$  ;

$5 \times 10^6 < N < 1 \times 10^8$  cycles : droite de pente  $-1/5$ , dite de constante de pente 5, traduisant la relation  $N \times \Delta\sigma^5 = \text{constante}$  ;

$N > 1 \times 10^8$  : droite horizontale.

La résistance à  $5 \times 10^6$  cycles (ou  $N_p$  cycles) est appelée limite de fatigue (ou limite d'endurance) sous amplitude constante et est représentée par  $\Delta\sigma_D$ . Sa valeur, pour des étendues de contrainte normale et par suite des définitions précédentes, est reliée à la catégorie du détail par :

$$\frac{N_D \Delta\sigma_D^3}{N_c \Delta\sigma_c^3} \leq 1 \quad (2.25)$$

d'où :

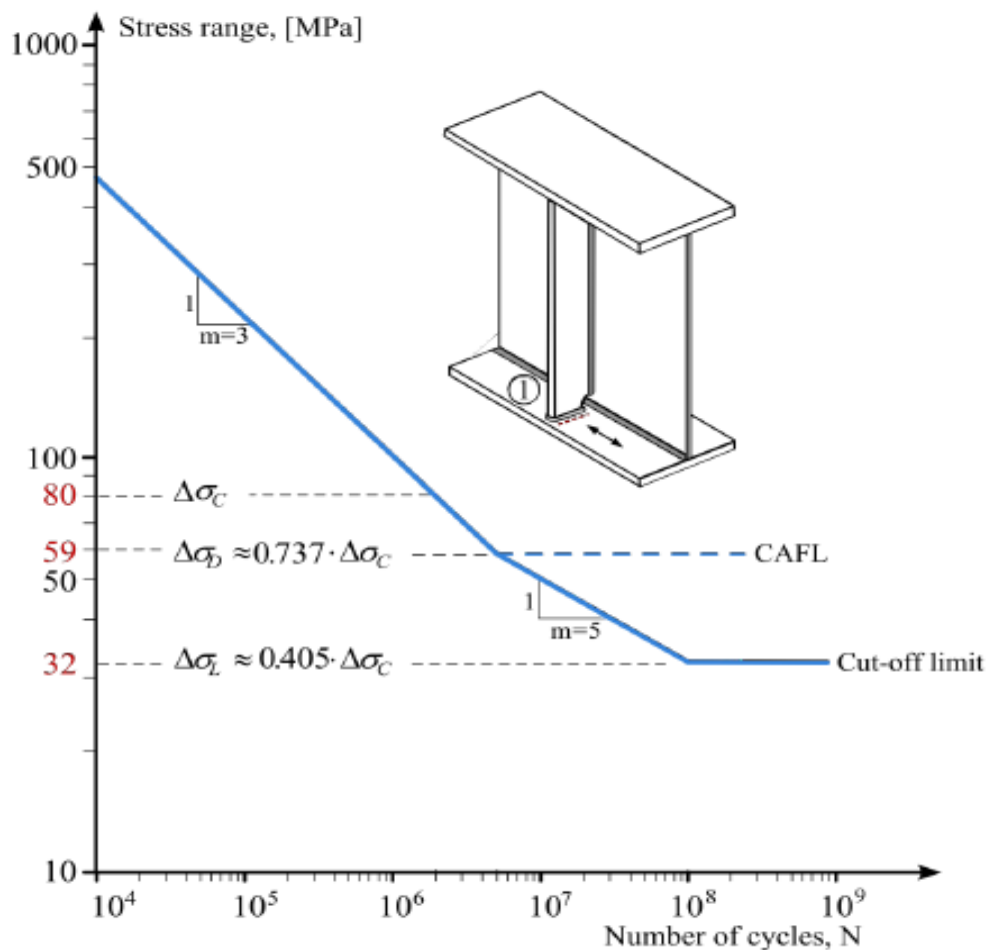
$$\Delta\sigma_D = (2/5)^{1/3} \Delta\sigma_c = 0.737 \Delta\sigma_c \quad (2.26)$$

Si tous les cycles de variations de contraintes se situent en dessous de cette valeur, la propagation ne s'initie pas.

Par contre, avec des étendues de contrainte variables, la limite d'endurance disparaît (ou n'existe plus) dès lors que certains cycles se situent au-dessus de cette valeur, ce qui est le cas pour les ouvrages réels. L'interprétation des essais permet de définir une deuxième portion de droite positionnée entre cinq millions et cent millions de cycles. Au-delà du seuil de cent millions de cycles et pour des étendues de contrainte inférieures à la valeur de résistance correspondante, appelée limite de troncature, représentée par  $\Delta\sigma_L$ , la courbe est tronquée : ces étendues de contrainte considérées comme faibles ne créent pas de dommage. Sa valeur, pour des étendues de contrainte normales, et par suite des définitions précédentes, est reliée à la catégorie du détail et la limite d'endurance par les relations suivantes :

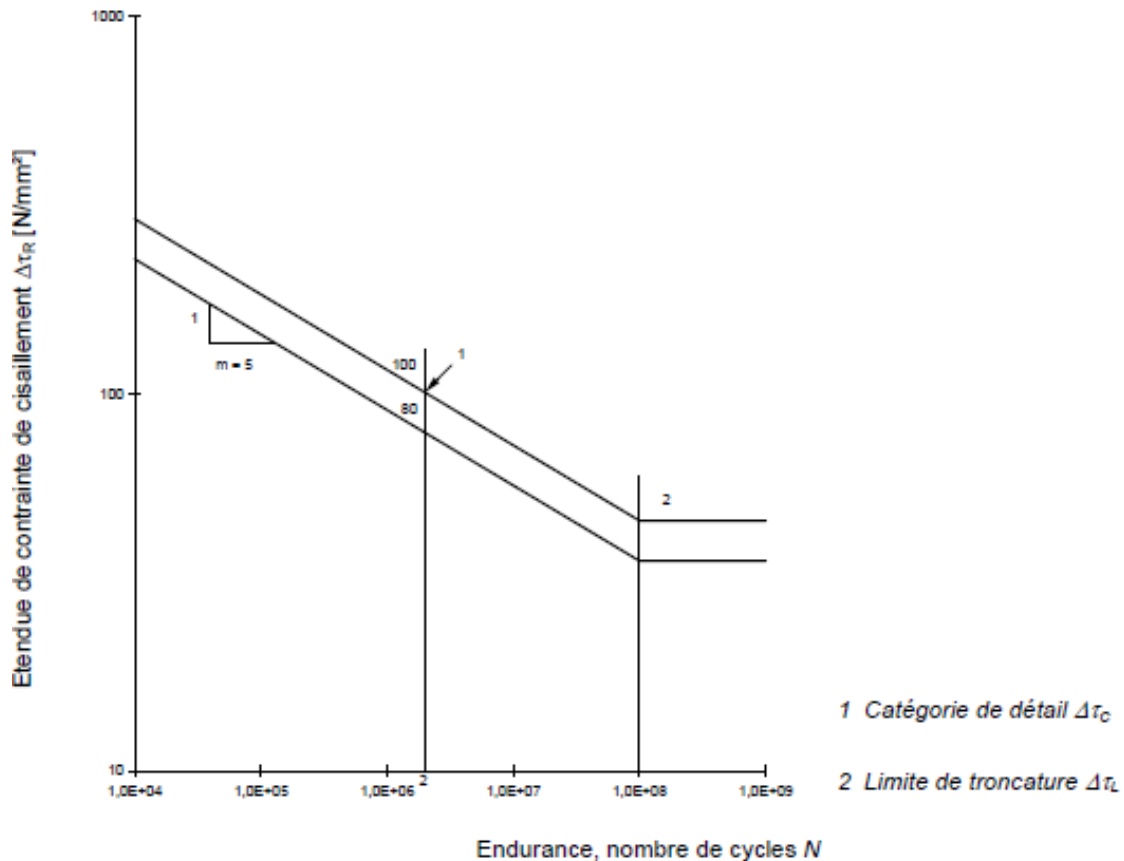
$$\Delta\sigma_L = (5/100)^{1/5} \Delta\sigma_{LD} = (5/100)^{1/5} \times (2/5)^{1/3} \Delta\sigma_c = 0.405 \Delta\sigma_c \quad (2.27)$$

La figure 2.12 illustre l'allure de la courbe de résistance à la fatigue pour des étendues de contraintes normales de la catégorie de détail n°1.



**Figure 2.12.** Courbe de résistance à la fatigue de la catégorie de détail 1

Pour des étendues de contrainte de cisaillement, la courbe  $\Delta\tau$ - $N$  adoptée comporte seulement les deux tronçons de droite l'une de pente  $-1/5$  et l'autre horizontale, comme il est représenté sur la figure 2.13 (Fig. 7.2 de l'EN 1993-1-9 [5]). Seule deux courbes de résistance pour deux catégories de détail, 100 et 80, sont considérées et ne comportent pas de limite d'endurance.



**Figure 2.13.** Courbes de résistance à la fatigue pour les étendues de contrainte de cisaillement

La limite de troncature correspondante est reliée à la catégorie de détail par :

$$\Delta\tau_L = 0.405 \Delta\tau_C \quad (2.28)$$

Il a été établi expérimentalement que pour des épaisseurs supérieures à 25 mm et pour des cordons de soudure transversaux, donc perpendiculaires à la direction de la contrainte normale, la résistance en fatigue diminue lorsque l'épaisseur augmente. Une correction sur la valeur de la résistance en fatigue doit être apportée en multipliant la catégorie du détail par le facteur adimensionnel  $k_s$  (EN 1993-1-9 [5] §7.2.2) comme indiqué dans les tableaux 8.1 à 8.10.

### 2.3.1.3. Justification du hourdis

#### 2.3.1.3.1. Format de vérification

La justification à la fatigue d'une section en béton armé ou précontraint, consiste essentiellement à préserver de la rupture des armatures tendues soumises à des variations répétées de contrainte, sous l'effet de charges cycliques pendant la durée d'utilisation de l'ouvrage.

La vérification à la fatigue des armatures passives longitudinales consiste à justifier un critère de format équivalent à celui utilisé pour la charpente (et supposant donc l'utilisation du convoi de fatigue FLM3) :

$$\gamma_{F,fat} \Delta\sigma_{S,eq}(N^*) \leq \frac{\Delta\sigma_{Rsk}(N^*)}{\gamma_{S,fat}} \quad (2.29)$$

où :

$N^* = 10^6$  cycles de fatigue ;

$\Delta\sigma_{Rsk}(N^*)$  est l'étendue de contrainte pour  $N^*$  cycles, donnée par les courbes S-N concernées (Figure 6.30 et Tableaux 6.3N et 6.4N de l'EN 1992-1-1 [3]) ;

$\gamma_{F,fat} = 1,0$  est le coefficient partiel relatif aux charges FLM3 ;

$\gamma_{S,fat} = 1,15$  est le coefficient partiel relatif aux matériaux ;

$\Delta\sigma_{S,eq}(N^*) = \lambda_s(\sigma_{s,max,f} - \sigma_{s,min,f})$  est l'étendue de contrainte normale équivalente dans les armatures vis-à-vis de l'endommagement pour différents types d'armatures, correspondant au nombre de cycles de chargement  $N^*$ .

Le coefficient de correction  $\lambda_s$ , comme pour la charpente, comprend l'influence de la portée, du volume de trafic annuel, de la durée d'utilisation de projet, des différentes voies de circulation, du type de trafic et de la rugosité du revêtement. Le calcul d'est détaillé dans l'Annexe NN de l'EN 1994-2 [4].

Les charges d'essieu du modèle de charge de fatigue 3 doivent être multipliées par les coefficients suivants :

- ◆ 1,75 pour une vérification au droit des appuis intermédiaires des ponts continus ;
- ◆ 1,40 pour une vérification dans d'autres zones.

#### 2.3.1.3.2. Amplitude des contraintes $\Delta\sigma_{s,p}$

Les contraintes  $\sigma_{s,max,f}$  et  $\sigma_{s,min,f}$  sont calculées avec un coefficient d'équivalence à court terme  $n_0 = 6,16$ , à partir des sollicitations de flexion  $M_{Ed,min,f}$  et  $M_{Ed,max,f}$ . Le moment maximal  $M_{Ed,max,f}$  est celui qui engendre l'effort de traction maximal dans la dalle.

Comme pour la charpente métallique, trois cas sont à envisager :

♦ **1<sup>er</sup> cas :**

$M_{Ed,max,f}$  et  $M_{Ed,min,f}$  induisent des contraintes de traction dans la dalle (béton fissuré). Alors les contraintes dans les armatures s'écrivent :

$$\sigma_{s,max,f} = \sigma_{s,max,f,0} + \Delta\sigma_{s,f} \quad (2.30)$$

avec :

$$\Delta\sigma_{s,f} = 0.2 \frac{f_{xtm}}{\alpha_{st} \rho_s} \quad (2.31)$$

$$\text{où: } \alpha_{st} = \frac{A_l}{A_a I_a}$$

$\sigma_{s,max,f,0}$  est la contrainte dans les armatures calculées à partir de  $M_{Ed,max,f} = M_{a,Ed,max,f} + M_{c,Ed,max,f}$  en négligeant la participation du béton fissuré à la section résistante :

$$\sigma_{s,max,f,0} = M_{c,Ed,max} \frac{v_2}{I_2} \quad (2.32)$$

$A_a$  et  $I_a$  sont l'aire et l'inertie de la section mixte fissurée efficace (charpente seule).

$\rho_s$  est le pourcentage d'armatures longitudinales dans l'aire de béton comprise dans la largeur efficace de dalle.

♦ **2<sup>ème</sup> cas :**

$M_{Ed,max,f}$  et  $M_{Ed,min,f}$  induisent des contraintes de compression dans la dalle. Alors les contraintes s'écrivent :

$$\sigma_{s,max,f} = M_{c,Ed,max} \frac{v_1}{I_1} \quad (2.33)$$

$$\sigma_{s,min,f} = M_{c,Ed,min} \frac{v_1}{I_1} \quad (2.34)$$

Par différence  $\sigma_{s,max,f} - \sigma_{s,min,f}$ , l'influence de la combinaison de base non cyclique disparaît et il ne reste que le terme dû au convoi FLM3 calculé avec  $n_{eq} = 6,16$  :

$$\Delta\sigma_{s,p} = \Delta M_{FLM3} \frac{v_1}{I_1} \quad (2.35)$$

♦ 3<sup>ème</sup> cas :

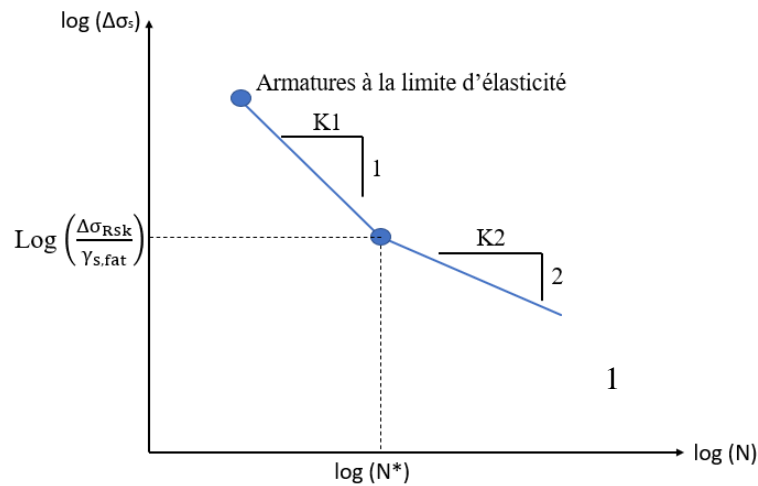
$M_{Ed,max,f}$  induit des contraintes de traction dans la dalle et  $M_{Ed,min,f}$  induit des contraintes de compression dans la dalle. Alors les contraintes s'écrivent :

$$\sigma_{s,max,f} = \sigma_{s,max,f,0} \frac{V_2}{I_2} \quad (2.36)$$

comme dans le premier cas ;

$$\sigma_{s,min,f} = \sigma_{s,min,f,0} \frac{V_1}{I_1} \quad (2.37)$$

comme dans le deuxième cas.



**Figure 2.14.** Courbe S-N pour armatures de béton armé et pour armatures de précontrainte

### 2.3.1.4. Justification de la connexion

#### a) Format de vérification

Pour les goujons soudés sur une semelle en acier toujours comprimée sous l'effet de la combinaison d'actions adéquate, la vérification en fatigue est effectuée en satisfaisant le critère suivant (Clause 6.8.7.2

(1) EN 1994-2 [4]) :

$$\gamma_{FF} \Delta\tau_{E,2} \leq \frac{\Delta\tau_c}{\gamma_{Mf,s}} \quad (2.38)$$

où :

$\Delta\tau_{E,2}$  est l'étendue de contrainte constante de cisaillement équivalente, pour 2 millions de cycles ;

$\Delta\tau_c$  est la valeur de référence de la résistance à la fatigue à 2 millions de cycles définie par la clause 6.8.3 de l'EN 1994-2 [4] ;

$$\gamma_{Ff} = 1 ;$$

$$\gamma_{Mf,s} = 1.25 .$$

La catégorie de détail à 2 millions de cycles est  $\Delta\tau_c = 90$  MPa.

Lorsque la semelle supérieure est tendue sous la combinaison ELU de fatigue, des fissures de fatigue sont susceptibles de s'y propager sous les variations de  $\Delta\sigma_p$ , au niveau du détail que constitue la soudure du goujon sur sa face supérieure. Les deux critères supplémentaires suivants doivent être vérifiés :

- ◆ Un critère dans la semelle :

$$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2} \leq \frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}} \quad (2.39)$$

- ◆ Un critère d'interaction :

$$\frac{\gamma_{Ff} \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_c/\gamma_{Mf,s}} + \frac{\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_c/\gamma_{Mf}} \leq 1 \quad (2.40)$$

### b) Etendue de contrainte de cisaillement équivalente $\Delta\tau_{E,2}$

Pour la vérification des goujons basée sur des étendues de contrainte nominale, l'étendue de contrainte constante de cisaillement équivalente  $\Delta\tau_{E,2}$ , (Clause 6.8.5.1(1) de l'EN 1994 [4]) :

$$\Delta\tau_{E,2} = \lambda_v \Delta\tau \quad (2.41)$$

où :

$\lambda_v$  est le coefficient de dommage équivalent dépendant des spectres du chargement de fatigue et de la pente  $m$  de la courbe de résistance en fatigue ;

$\Delta\tau$  est l'étendue de contrainte de cisaillement due au chargement de fatigue, relative à l'aire de la tige du goujon en utilisant le diamètre nominal  $d$  de la tige.

Le coefficient de dommage équivalent  $\lambda_v$  pour les goujons à tête en cisaillement est déterminé de façon similaire) ceux de la charpente et les aciers passifs à partir de la formule :

$$\lambda_v = \lambda_{v,1} \times \lambda_{v,2} \times \lambda_{v,3} \times \lambda_{v,4} \quad (2.42)$$

où :

$\lambda_{v,1} = 1,55$  pour les ponts routes ;

$$\lambda_{v,2} = \frac{Q_{m1}}{Q_0} \left( \frac{N_{obs}}{N_0} \right)^{\frac{1}{8}} \quad (2.43)$$

$\lambda_{v,3} = 1$

$$\lambda_{v,4} = \left[ 1 + \frac{N_2}{N_1} \left( \frac{\eta_2 Q_{m2}}{\eta_1 Q_{m1}} \right)^8 \right]^{\frac{1}{8}} \quad (2.44)$$

### c) Résistance à la fatigue

La courbe de résistance à la fatigue d'un goujon à tête soudé, représentée sur la figure 2.15 (Voir Figure 6.25 de l'EN 1994-2 [4]), pour un béton de masse volumique normale par l'expression :

$$(\Delta\tau_R)^m N_R = (\Delta\tau_c)^m N_c \quad (2.45)$$

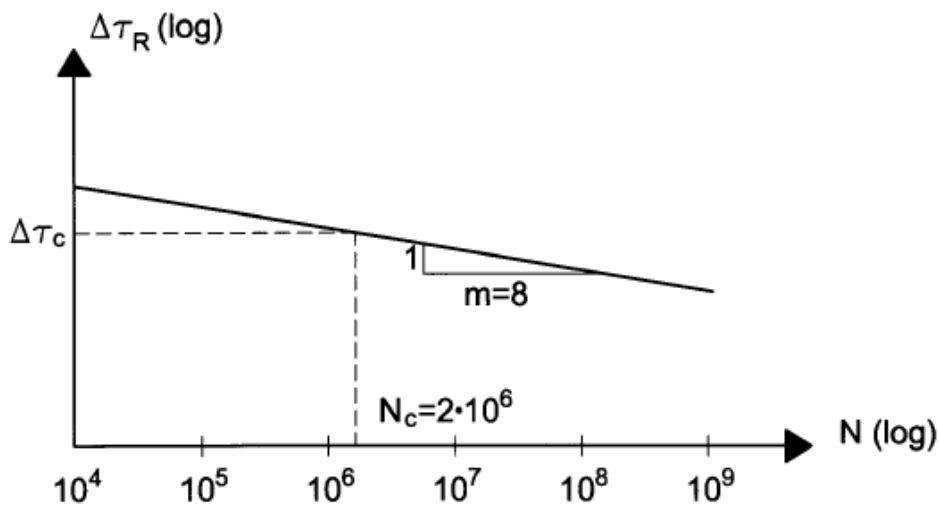
où :

$\Delta\tau_R$  est la résistance à la fatigue relative à la section de la tige du goujon, en utilisant le diamètre nominal de la tige ;

$\Delta\tau_c$  est la valeur de référence à 2 millions de cycles, égale à 90 N/mm<sup>2</sup> ;

$m$  est la pente de la courbe de résistance à la fatigue, correspondant à la valeur  $m = 8$ ;

$N_R$  est le nombre de cycles d'étendue constante de contraintes.



**Figure 2.15.** Courbe de résistance à la fatigue pour les goujons à tête dans les dalles pleines [4]



### 2.3.2. Méthode générale

Cette procédure de vérification est définie par les clauses 6.8.4 de l'EC2-1-1[3] et l'Annexe A de l'EC3-1-9 [5]. Elle consiste à faire un calcul d'endommagement à partir de cycles d'étendues de contrainte et utilise les courbes de résistance à la fatigue S-N.

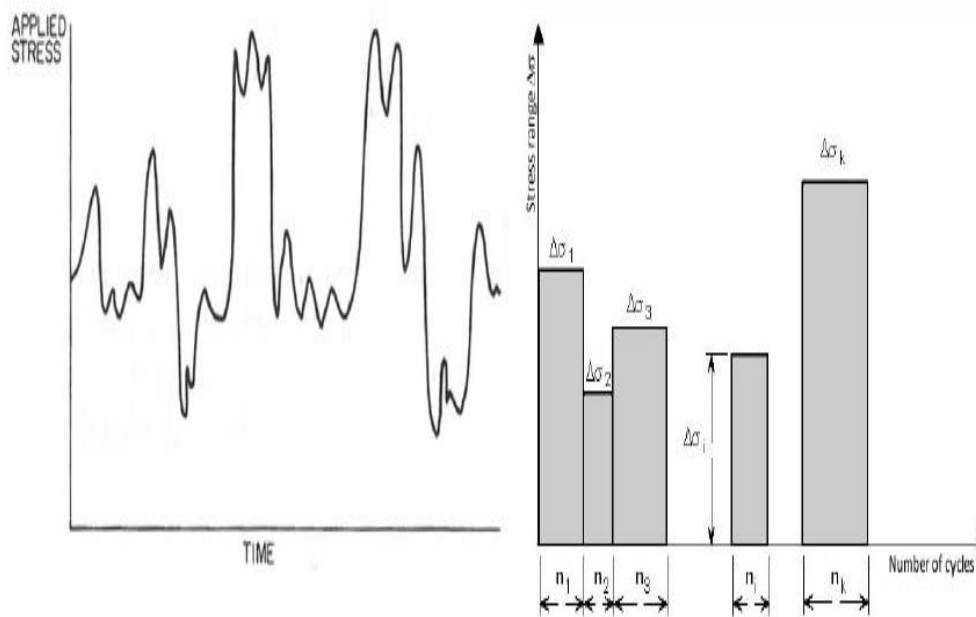
#### 2.3.2.1. Spectre des étendues de contrainte

Le trafic est connu soit suite à des enregistrements de trafic réel (Modèle FLM5), soit suite à une modélisation de ce trafic, en se basant sur d'autres trafics similaires connus (Modèles LM1, LM2, FLM3 et FLM4).

Le passage de chaque camion sur l'ouvrage donne lieu à des variations de contrainte qui peuvent présenter différentes étendues dans l'élément étudié. Pour chaque camion, les étendues  $\Delta\sigma_{s1}$ ,  $\Delta\sigma_{s2}$ , ...  $\Delta\sigma_{sj}$ , ... peuvent être obtenues en appliquant la méthode du "réservoir" ou celle de la "goutte d'eau".

La méthode la plus commune pour présenter une histoire des contraintes variables est d'utiliser l'histogramme des contraintes. Dans cet histogramme les contraintes sont classées par entendue.

Ce concept est à l'origine de la méthode Palmgren-Miner que les Eurocodes utilisent dans le cas des amplitudes de contraintes variables.



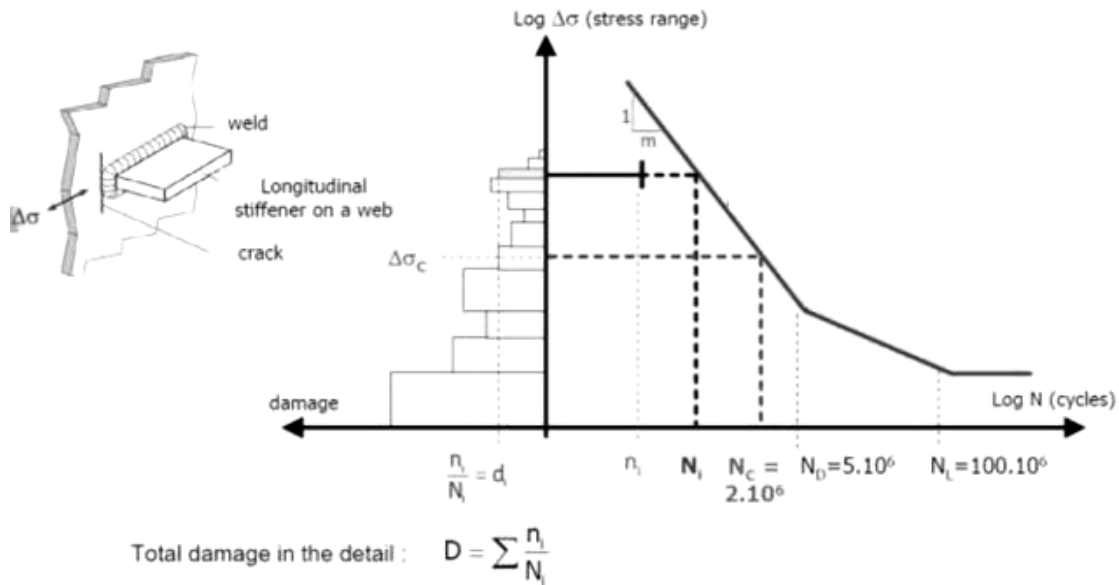
**Figure 2.16.** Spectre des étendues de contrainte à amplitude variable

#### 2.3.2.2. Méthode Palmgren-Miner

La méthode de Palmgren-Miner [11] est basée sur l'endommagement cumulatif. Cette loi est obtenue par l'hypothèse de la sommation linéaire des endommagements pour chaque domaine de contrainte.

Le critère de Palmgren-Miner, illustré par la figure 2.16, s'exprime par :

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \leq 1 \tag{2.46}$$



**Figure 2.17.** Le critère de Palmgren-Miner

où :  $n_i$  et  $N_i$  sont respectivement le nombre de cycles avec amplitude constante des contraintes  $\Delta\sigma_i$  et le nombre totale de cycles d'endommagement sous amplitude constante des contraintes  $\Delta\sigma_i$ .

### 2.3.2.3. Critères de vérification des Eurocodes

#### a) Cas de la charpente

La vérification à la fatigue à partir de l'endommagement cumulé peut être satisfaite par l'un des deux critères suivants :

- ♦ Sur la base du cumul d'endommagement :

$$D_d = \sum_{i=1}^k \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}} \leq 1 \tag{2.47}$$

où :

$n_{Ei}$  est le nombre d'occurrences de cycles d'étendue de contrainte  $\gamma_{FF} \Delta\sigma_i$  pour la plage  $i$  du spectre pondéré est calculé par la formule suivante :

$$n_{Ei} = N_{obs} \times D_{vie} \times PC \tag{2.48}$$

où :

$N_{obs}$  : nombre indicatif de véhicules lourds prévus par voie lente (Tableau 2.2) ;

$D_{vie}$  : durée de vie de l'ouvrage ;

$PC$  : pourcentage de camions (Tableau 2.1).

$N_{Ri}$  est l'endurance (en cycles) obtenue avec la courbe pondérée  $\Delta\sigma_c/\gamma_{Mf} - N_R$ , pour une étendue de contrainte  $\gamma_{Ff} \Delta\sigma_i$ .

$$N_{Ri} = \begin{cases} \left( \frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Ft} \times \gamma_{Mf} \times \Delta\sigma_i} \right)^3 \times 2 \times 10^6 & \text{si } N_{Ri} \leq 5 \times 10^6 \\ \left( \frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_{Ft} \times \gamma_{Mf} \times \Delta\sigma_i} \right)^5 \times 5 \times 10^6 & \text{si } 5 \times 10^6 < N_{Ri} \leq 100 \times 10^6 \end{cases} \quad (2.49)$$

$$\text{où : } \Delta\sigma_D = 0.737 \Delta\sigma_C$$

Sur la base de l'étendue de contrainte :

$$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2} = \sqrt[3]{D_d} \frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}} \quad (2.50)$$

### b) Cas des armatures

Pour chaque  $\Delta\sigma_{si}$  du spectre d'étendues de contrainte on calcule, en tenant compte de  $\gamma_{S,fat}$ , la valeur  $N_i$  correspondante pour calculer l'endommagement causé par  $n_i$  cycles d'application de  $\Delta\sigma_{si}$ . Les expressions de  $N$  en fonction de  $\Delta\sigma_s$  s'obtiennent aisément à partir des équations des demi-droites :

$$\diamond \Delta\sigma_{S,,equ}(N^*) \geq \frac{\Delta\sigma_{Rsk}}{\gamma_{S,fat}} \quad (2.51)$$

$$N = N^* \left( \frac{1}{\gamma_{S,fat}} \frac{\Delta\sigma_{Rsk}}{\Delta\sigma_s} \right)^{k1} \quad (2.52)$$

$$\diamond \Delta\sigma_{S,,equ}(N^*) \geq \frac{\Delta\sigma_{Rsk}}{\gamma_{S,fat}} \quad (2.53)$$

$$N = N^* \left( \frac{1}{\gamma_{S,fat}} \frac{\Delta\sigma_{Rsk}}{\Delta\sigma_s} \right)^{k2} \quad (2.54)$$

Dans le cas où toutes les étendues de contrainte sont limitées par  $\Delta\sigma_s < \Delta\sigma_{Rsk} / \gamma_{S,fat}$ , ce qui se traduit par un positionnement sur la seule demi-droite de pente  $1/k_2$ , seule la deuxième expression de  $N$  est à utiliser. L'endommagement  $D_{Ed}$  pour des armatures soumises à un spectre d'étendues de contrainte  $[(\Delta\sigma_{si}; n_i)_i]$  peut alors se calculer par la relation explicite suivante :

$$D_{Ed} = \frac{1}{N^*} \left( \frac{\gamma_{S,fat}}{\Delta\sigma_{Rsk}} \right)^{k2} \times \sum_i n_i (\Delta\sigma_{si})^{k2} \quad (2.55)$$

## CHAPITRE 3

### Application à un bipoutre mixte

#### 3.1. Présentation de l'ouvrage

L'ouvrage d'art à projeter est un pont routier enjambant le cours d'eau Oued El Hay situé dans la commune d'El Kantara de la wilaya de Biskra, section évitement d'El Kantara lot Sud, Pk265+300. Cet ouvrage s'inscrit dans le cadre du projet de dédoublement sur 18 km de la RN 3 entre El Kantara et les limites administratives de la wilaya de Batna. Cet ouvrage long de 151.27 m permet d'éliminer un "point noir" de la circulation souvent perturbée, sur cet axe, par les crues de Oued El Hay durant les périodes de précipitations. Le projet doit satisfaire les critères de fonctionnalité, d'environnement et de culture locale.

##### 3.1.1. Description du tablier

Suite à l'analyse de l'Avant-Projet Sommaire réalisée par la SAPTA (Société Algérienne des Ponts et Travaux d'Art), la solution retenue est un bipoutre mixte symétrique à trois travées continues. Les travées de rive ont une portée de 45.38 m et la travée centrale a une portée de 60.51 m. La figure 3.1 illustre la coupe longitudinale de l'ouvrage.

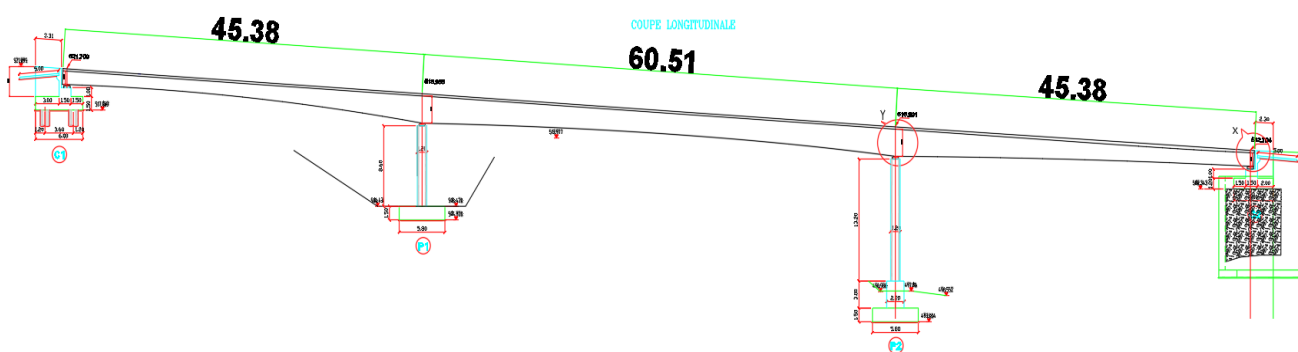


Figure 3.1. Coupe longitudinale.

En coupe transversale, le tablier est constitué de deux poutres métalliques latérales espacées de 5.5 m et reliées sur piles et culées ainsi que tous les 7.653 m en travée courante par des entretoises en PRS. Le

tablier supporte une route à 2 voies de circulation de 3.0 m de large chacune. Les voies sont bandées par une bande dérasée droite (BDD) et une bande dérasée gauche (BDG) ayant chacune 1 m de largeur. La figure 3.2 illustre la coupe transversale du tablier.

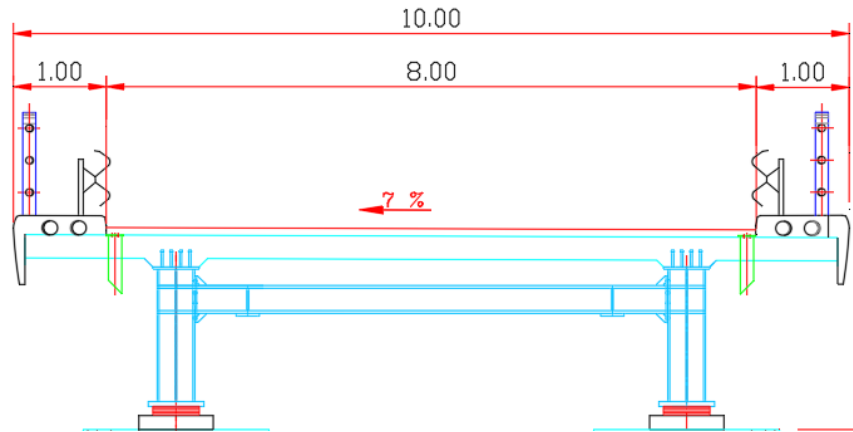


Figure 3.2. Coupe transversale.

### 3.1.2. Répartition des matières

La répartition des matières pour une poutre principale, représentée sur la figure 3.3, est celle retenue par le bureau d'étude chargé de l'étude de l'ouvrage réel (SAPTA). Dans ce mémoire on se contente de justifier la conception retenue vis-à-vis de la résistance des poutres principales à la fatigue.

Chacune des deux poutres principales a été conçue avec une variation parabolique de la hauteur et des variations des dimensions des semelles supérieur et inférieur et de l'âme. Six changements de section ont été adoptés pour les travées de rive et 7 changements de section ont été adoptés pour la travée centrale.

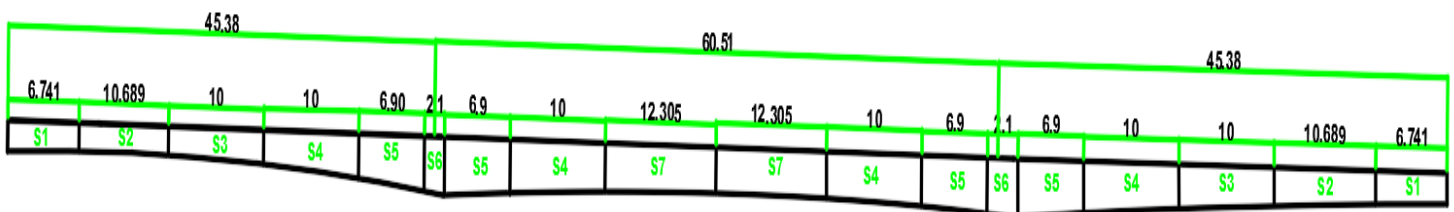
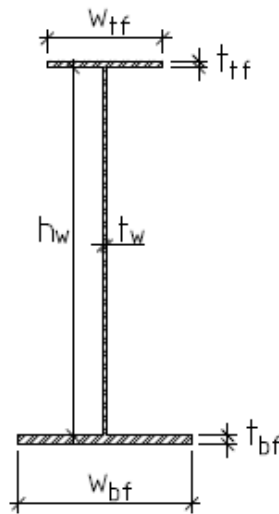


Figure 3.3. Répartition des sections transversales dans une poutre principale.

Les poutres principales et les entretoises sont des profilés reconstitués soudés dont une section typique est représentée sur la figure 3.4. Les dimensions des différentes parois au niveau des différents tronçons

des poutres principales et des entretoises sont présentées dans le tableau 3.1.  $E_{travée}$ ,  $E_{pile}$  et  $E_{culée}$  désignent respectivement les entretoises en travée, sur pile et sur culée.



**Figure 3.4.** Notations utilisées.

**Tableau 3.1.** Dimensions des parois des sections transversales (en mm).

| Sections     | $W_{tf}$ | $t_{tf}$ | $h_w$     | $t_w$ | $W_{bf}$ | $T_{bf}$ |
|--------------|----------|----------|-----------|-------|----------|----------|
| S1           | 550      | 20       | 1500      | 18    | 650      | 30       |
| S2           | 550      | 30       | 1500÷1679 | 18    | 650      | 50       |
| S3           | 550      | 40       | 1679÷1960 | 18    | 650      | 50       |
| S4           | 550      | 60       | 1960÷2594 | 18    | 650      | 70       |
| S5           | 600      | 70       | 2594÷2867 | 18    | 700      | 80       |
| S6           | 650      | 70       | 3000      | 18    | 750      | 80       |
| S7           | 650      | 40       | 2867÷2376 | 18    | 750      | 50       |
| $E_{travée}$ | 500      | 30       | 1000      | 18    | 500      | 30       |
| $E_{pile}$   | 600      | 50       | 1800      | 20    | 600      | 50       |
| $E_{culée}$  | 550      | 40       | 1500      | 18    | 550      | 40       |

### 3.2. Données du trafic

Les données recueillis auprès de la direction des travaux publics de la Wilaya de BISKRA sont les suivantes :

- ◆ Comptage de référence (année 2005)

- ◆ Trafic journalier moyen annuel (TJMA) en 2005 ( $TJMA_{2005}$ ) = 5571 v/j
- ◆ Taux d'accroissement 4%
- ◆ Mise en service (Année 2015)
- ◆ Trafic journalier moyen annuel (TJMA) en 2015 ( $TJMA_{2015}$ ) =  $5571 \times (1.04)^{10} = 8247$  v/j
- ◆ Poids lourds journalier moyen annuel en 2015 ( $PLJMA_{2015}$ ) =  $8247 \times 0.24 = 1946$  pl/j

### 3.3. Matériaux

L'EN1994-2 [4] limite les caractéristiques des matériaux quand ils sont utilisés dans une structure mixte :

- Bétons de classe C20/25 à C60/75 (ou pour les bétons légers : LC20/25 à LC60/75) ;
- Aciers de nuance S235 à S460.

Par ailleurs, l'EN1992-1-1 [3] limite l'emploi de ses règles de calcul (dimensionnement et dispositions constructives) aux armatures passives de limite d'élasticité comprise entre 400 et 600 MPa.

Seuls les connecteurs goujons sont traités par l'EN1994-2 [4]. Les autres types de connecteurs sont renvoyés dans l'Annexe Nationale (cas des connecteurs cornières).

#### 3.3.1. Caractéristique mécanique des aciers

L'acier de charpente est de nuance S355. Son module d'élasticité  $E_a = 210\,000$  MPa. La limite élastique et la résistance ultime de l'acier de construction correspondantes en fonction de l'épaisseur des parois sont données par l'EN10025-3 [12] et sont présentées dans le tableau 4.2.

**Tableau 3.2.** Variation de  $f_y$  et  $f_u$  en fonction de l'épaisseur de la paroi de l'acier S355

| t(mm) | $\leq 16$ | $< 16$<br>$\leq 40$ | $< 40$<br>$\leq 63$ | $< 63$<br>$\leq 80$ | $< 80$<br>$\leq 100$ | $< 100$<br>$\leq 150$ |
|-------|-----------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|
| $f_y$ | 355       | 345                 | 335                 | 325                 | 315                  | 295                   |
| $f_u$ | 470       | 470                 | 470                 | 470                 | 470                  | 450                   |

### 3.3.2. Béton

Le béton normal de classe C35/45 est utilisé pour le béton du hourdis. Les caractéristiques de résistance et de déformations sont déterminées à partir du tableau 3.1 de l'EN 1992-1 [3]. Les principales caractéristiques mécaniques en sont les suivantes :

- Le béton est dosé à  $400 \text{ kg/m}^3$  de ciment CPA 325, avec un contrôle strict ;
- La masse volumique du béton armé :  $\gamma = 25 \text{ KN/m}^3$  ;
- La résistance caractéristique à la compression sur cylindre :  $f_{ck} = 35 \text{ MPa}$  ;
- Le module d'élasticité :  $E_{cm} = 22\,000 (f_{cm}/10) \times 0.3 = 34\,077 \text{ MPa}$ .

Pour les calculs des effets du retrait on retient les valeurs suivantes [13] :

- RH : humidité relative = 42% ;
- Ciment de prise normale ;
- Rayon moyen :  $h_0 = 2A_c/u = 722 \text{ mm}$ .

avec :

$A_c$  est l'aire de la section du béton ;

$u$  est le périmètre exposé à la dessiccation qui s'obtient en soustrayant au périmètre réel ;  
 $p = 20.6 \text{ m}$  les longueurs qui ne sont pas en contact direct avec l'atmosphère (c'est-à-dire la largeur des semelles métalliques supérieures ainsi que la largeur de la chape d'étanchéité).

### 3.3.3. Armatures passives

Les armatures passives utilisées sont des barres à haute adhérence (HA) de classe B avec une limite d'élasticité  $f_{sk} = 500 \text{ MPa}$ . [13]

Dans l'EN1992-1-1 [13], on a  $E_s = 200\,000 \text{ MPa}$  pour le module d'élasticité des aciers passifs. Cependant, par simplification par rapport au module utilisé pour la charpente, l'EN1994-2 [14] autorise de prendre  $E_s = E_a = 210\,000 \text{ MPa}$ .

### 3.3.4. Connecteurs

Les goujons sont réalisés à partir d'un acier de nuance S235J2G3 suivant norme EN 10025 [12] dont la résistance caractéristique à la rupture vaut  $f_u = 450 \text{ MPa}$ .



### 3.4. Actions et combinaisons d'actions

#### 3.4.1. Actions permanentes

Le poids volumique de l'acier est pris égal à  $77 \text{ kN/m}^3$ , celui du béton égal à  $25 \text{ kN/m}^3$ . [13]

Les superstructures sont constituées par tous les éléments du tablier qui n'interviennent pas dans la résistance mécanique de l'ouvrage. Le tableau 3.3 donne les valeurs nominales et pondérées des charges de superstructure par mètre linéaire et par mètre carré agissant sur le tablier.

#### 3.4.2. Gradient de température

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). Dans ce projet, on adopte :  $\Delta T_{M,heat} = 18^\circ$  [13].

**Tableau 3.3.** Poids propre des superstructures et des équipements

|                     | Valeur nominale       | Coefficient majorateur | Coefficient minorateur | Valeur caractéristique maxi | Valeur caractéristique mini |
|---------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Etanchéité          | $0.75 \text{ KN/m}^2$ | 1.4                    | 0.8                    | $1.05 \text{ KN/m}^2$       | $0.6 \text{ KN/m}^2$        |
| Couche de roulement | $2 \text{ KN/m}^2$    | 1.4                    | 0.8                    | $2.8 \text{ KN/m}^2$        | $1.6 \text{ KN/m}^2$        |
| Garde-corps         | $0.1 \text{ KN/m}$    | 1                      | 1                      | $0.1 \text{ KN/m}$          | $0.1 \text{ KN/m}$          |
| Glissière           | $0.65 \text{ KN/m}$   | 1                      | 1                      | $0.65 \text{ KN/m}$         | $0.65 \text{ KN/m}$         |
| Trottoir            | $5 \text{ KN/m}^2$    | 1                      | 1                      | $5 \text{ KN/m}^2$          | $5 \text{ KN/m}^2$          |

### 3.5. Modélisation du tablier

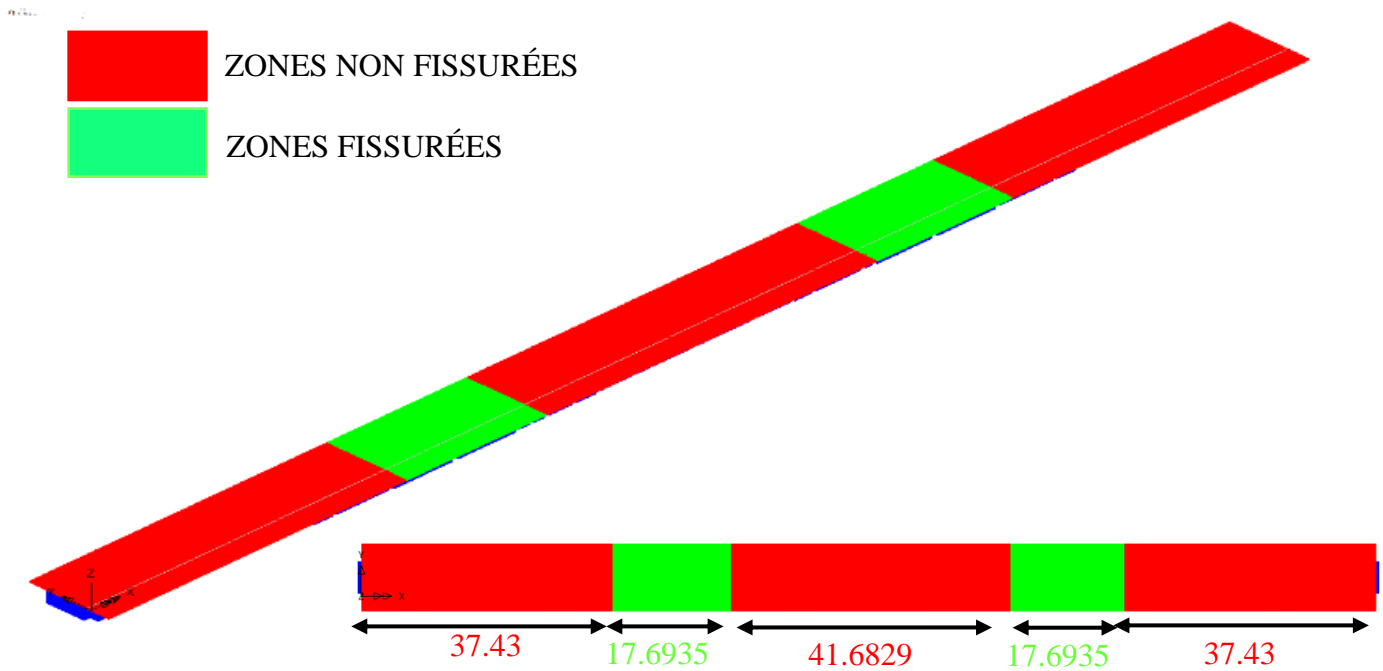
L'analyse globale du tablier a été réalisée en utilisant le logiciel LUSAS 14 [14]. LUSAS [14] est un logiciel de calcul et de dimensionnement des structures par éléments finis adapté aux ouvrages de génie civil et particulièrement aux ponts. Il permet en un même environnement la saisie graphique des données, dans un environnement à trois dimensions (définition de la géométrie, maillage conditions aux limites, chargements de la structure, etc.) et visualiser graphiquement les résultats de l'analyse (déformée, diagrammes des efforts internes, modes propres etc.).

Le logiciel offre les possibilités d'analyse suivantes :

- ◆ Analyse statique linéaire ;
- ◆ Analyse P-Delta ;
- ◆ Analyse statique non linéaire ;
- ◆ Analyse dynamique.

### 3.5.1. Géométrie

Le tablier, à 3 travées continues, est constitué par un réseau de poutres en acier reliées à une dalle en béton armé. La géométrie des poutres est représentée par des segments de droite, celle de la dalle est définie par des surfaces. Les lignes et les surfaces sont définies selon la variation des sections transversales des poutres principales, de la position des entretoises et des zones fissurées de moment négatif au droit des appuis intermédiaires (Figure 3.5). La géométrie du modèle numérique est admise être localisée au niveau du feuillet moyen de la dalle.



**Figure 3.5.** Géométrie du tablier

Cependant, la dalle et les poutres sont définies par les mêmes nœuds et la fibre neutre des poutres et des entretoises ne sont pas dans le feuillet moyen de la dalle. Pour tenir compte de la connexion entre la dalle et les poutres, LUSAS [14] permet un **offset** des poutres pour calculer l'augmentation de raideur due à l'excentrement des poutres par rapport à la position du modèle (théorème de Huygens). Cet offset est défini dans le repère propre des éléments,

c'est à dire la distance entre la fibre neutre du modèle et la position réelle de la fibre neutre dans la structure. LUSAS [14] permet aussi un offset de la dalle si le modèle numérique est localisé au niveau du centre de gravité des poutres ou ailleurs (Figure 3.6).

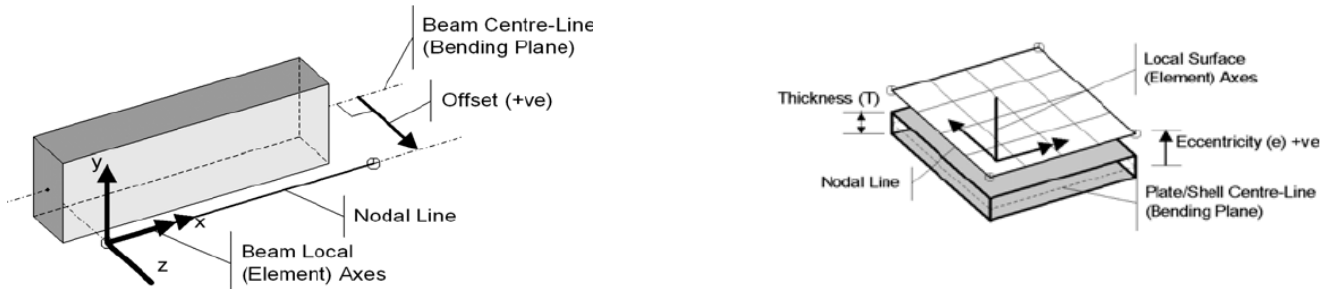


Figure 3.6. Offset des poutres et de la dalle [14]

### 3.5.2. Maillage

Le maillage consiste à adopter le type et le nombre d'éléments de manière à ce que le modèle numérique reproduit aussi fidèlement que possible le comportement réel de la structure.

Les poutres principales et les entretoises sont modélisées à l'aide des éléments de poutres épaisses 3D (**Thick beam BMS3** selon la désignation LUSAS [14]). L'élément fini de poutre est un élément à définition linéique, qui n'est décrit que par sa fibre neutre et deux nœuds. Chaque nœud possède 6 degrés de liberté 3 translations ( $u, v, w$ ) et 3 rotations ( $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ ) telle qu'il est illustré sur la figure 3.7.

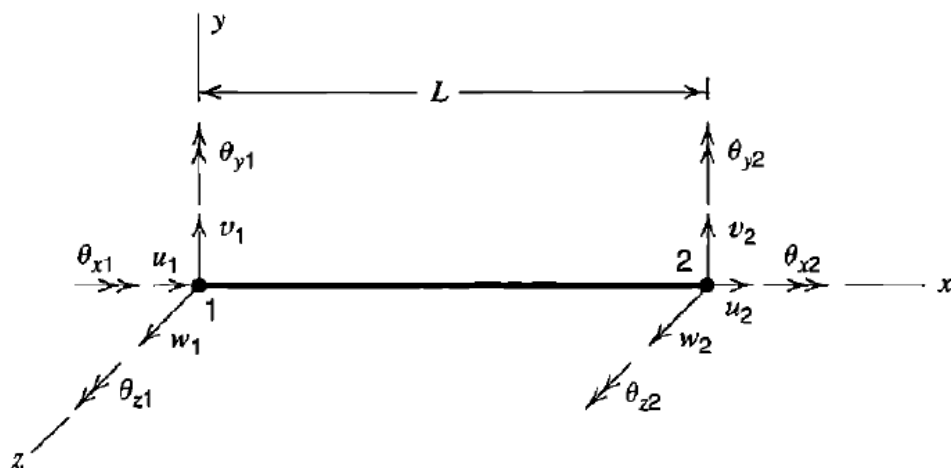
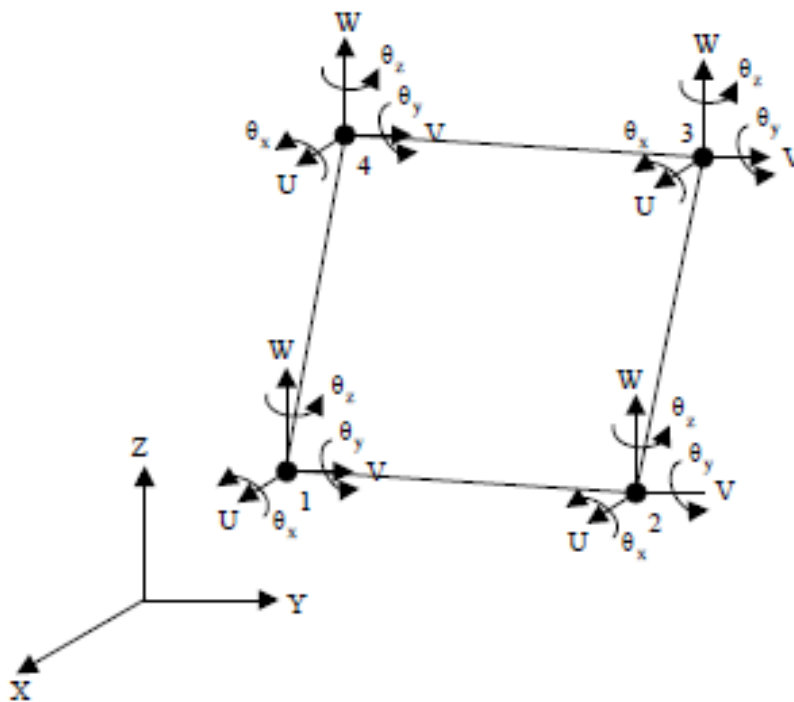


Figure 3.7. Degrés de liberté d'un élément de poutre 3D

Les poutres épaisses dites poutres de Timoshenko tiennent compte des déformations due à l'effort tranchant, sans gauchissement (les sections restent planes après déformation mais non normale à la ligne moyenne).

Le hourdis est modélisé par les éléments quadrangulaires de coque épaisse à 4 nœuds (**Thick shell elements QTS4 selon la désignation LUSAS**) comme il illustré sur la figure 3.8. Les éléments de coque épaisse sont des éléments surfaciques tridimensionnels prenant en compte simultanément les effets de membrane, de flexion et du cisaillement transverse (théorie de Reissner Mindlin ). Chaque nœud possède 6 degrés de liberté (deux translations dans le plan ( $u, v$ ), une translation hors plan ( $w$ ) et 3 rotations ( $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ )).

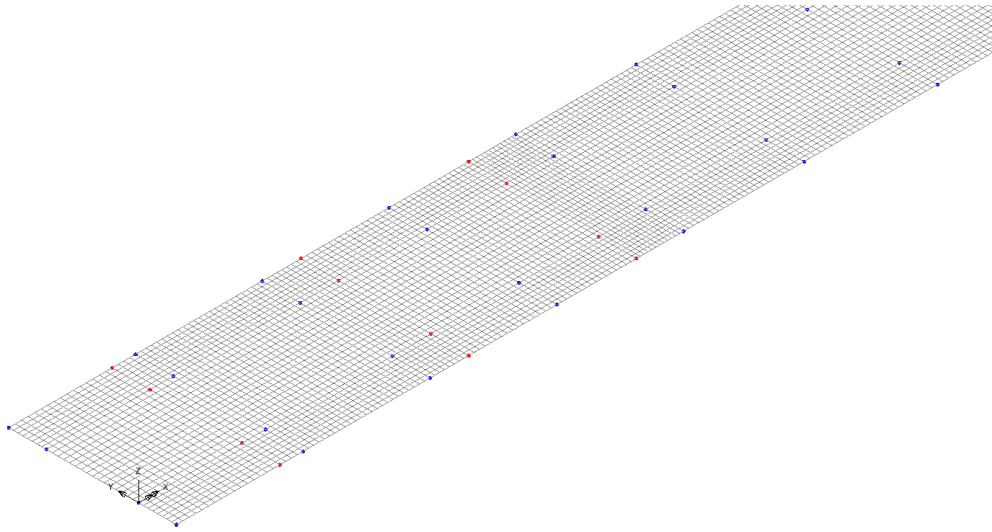


**Figure 3.8.** Degrés de liberté d'un élément de coque mince ou épaisse

En général, le degré de liberté de rotation dans le plan  $\theta_z$  (drilling DOF) n'est pas alimenté en raideur ; dans son repère propre, l'élément ne possède que 5 degrés de liberté : 2 pour la membrane  $u$  et  $v$  et 3 pour la plaque  $w, \theta_x$  et  $\theta_y$ .

La discrétisation des surfaces est effectuée à partir de celle des lignes afin d'éviter un décalage entre les nœuds de lignes et des surfaces. Aussi, la taille des éléments adoptés est choisie pour avoir la meilleure

adéquation possible entre la qualité des résultats fournis et les temps de calculs. La figure 3.9 illustre le maillage adopté du tablier :



**Figure 3.9.** Maillage du tablier

### 3.5.3. Conditions aux limites et chargement

Dans le cadre de ce mémoire nous avons admis que le tablier est simplement appuyé au niveau des piles et des culées.

Les sollicitations dues aux poids propres des poutres principales et du hourdis sont évaluées automatiquement par le logiciel LUSAS [14] sur la base des dimensions nominales et de la masse volumique des matériaux en utilisant l'option « dead load » dans le menu du chargement.

Dans la boîte de dialogue « Structural Loading », l'option "Patch" est utilisé pour introduire des charges linéiques (gardes-corps et glissière) ou surfaciques (chaussée et trottoirs). On définit deux points pour positionner une charge linéique et 4 points pour positionner une charge surfacique.

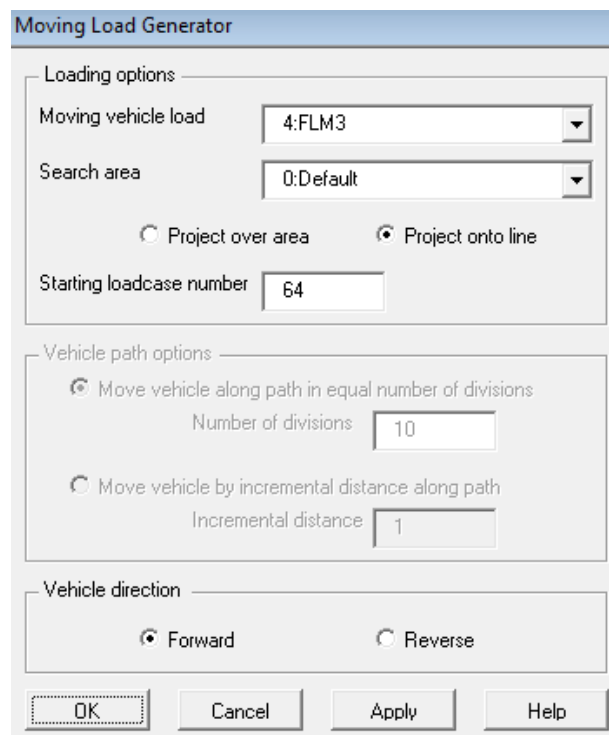
Le gradient de température peut être défini dans les directions x, y et z. Dans le cas présent nous avons retenu un gradient de température vertical dans le béton de la dalle égale à  $dT/dz = 18/d = 18/30 = 0,6$ . Le logiciel LUSAS [14] va ensuite multiplier le gradient thermique par le coefficient de dilatation thermique du béton pris égal à  $10^{-5}$  par °C pour calculer les déformations et les moments de flexion.

Dans ces calculs, un gradient thermique linéaire suivant la hauteur de la dalle a été considéré. Si on considère une variation non linéaire, des éléments volumiques doivent être utilisés.

Dans cette étude les effets du retrait sont négligés devant ceux produits par les charges permanentes pour les justifications à la fatigue.

Dans le module « Bridge » LUSAS [14] permet d'introduire les charges roulantes des camions FLM3 et FLM4, composés de charges concentrées et positionnées au centre de l'une des voies lentes de la chaussée. Ceci qui permet d'obtenir l'enveloppe des sollicitations associés au passage des camions sur le pont.

On commence par introduire la position initiale du camion à partir des points d'application et l'intensité des charges concentrées à partir de l'option « Discrete Structural Loading ». Dans la boîte de dialogue « Moving Load Generator » disponible dans le module « Bridge » on indique la valeur du pas de charge et le sens de la circulation (Figure 3.10).



**Figure 3.10.** LUSAS Moving Load

## 3.6. Justification à la fatigue

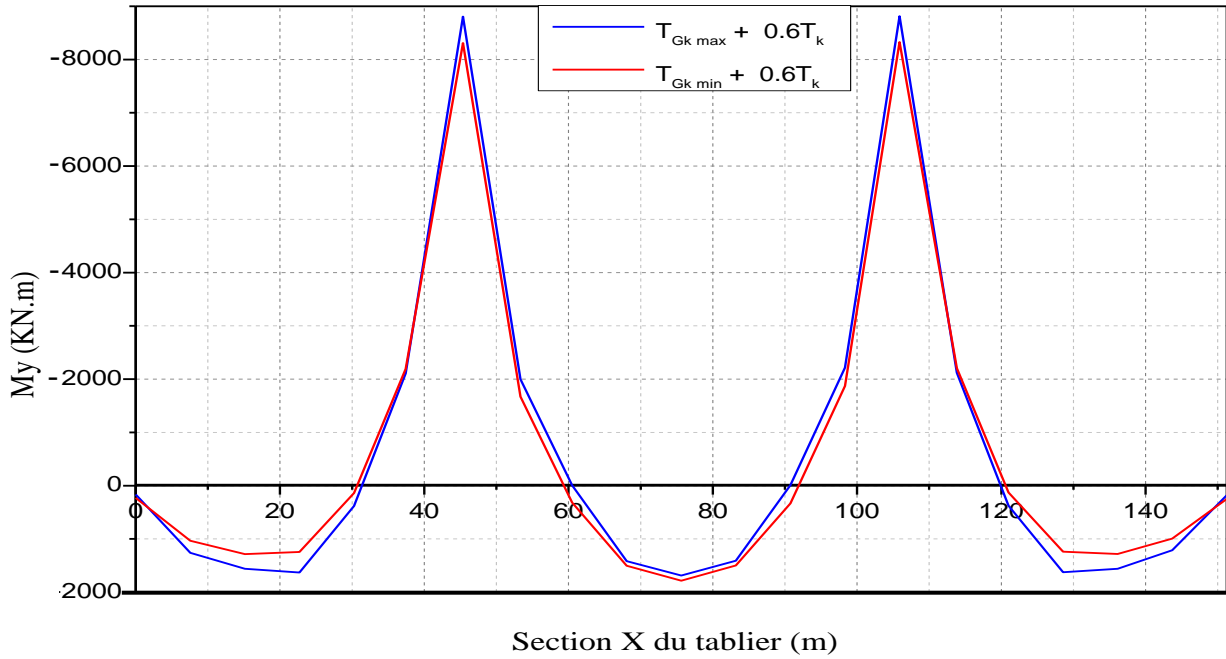
### 3.6.1. Sollicitations sous combinaison cyclique et non cyclique

La figure 3.11, montre les courbes des moments obtenues pour la combinaison de base non cyclique :

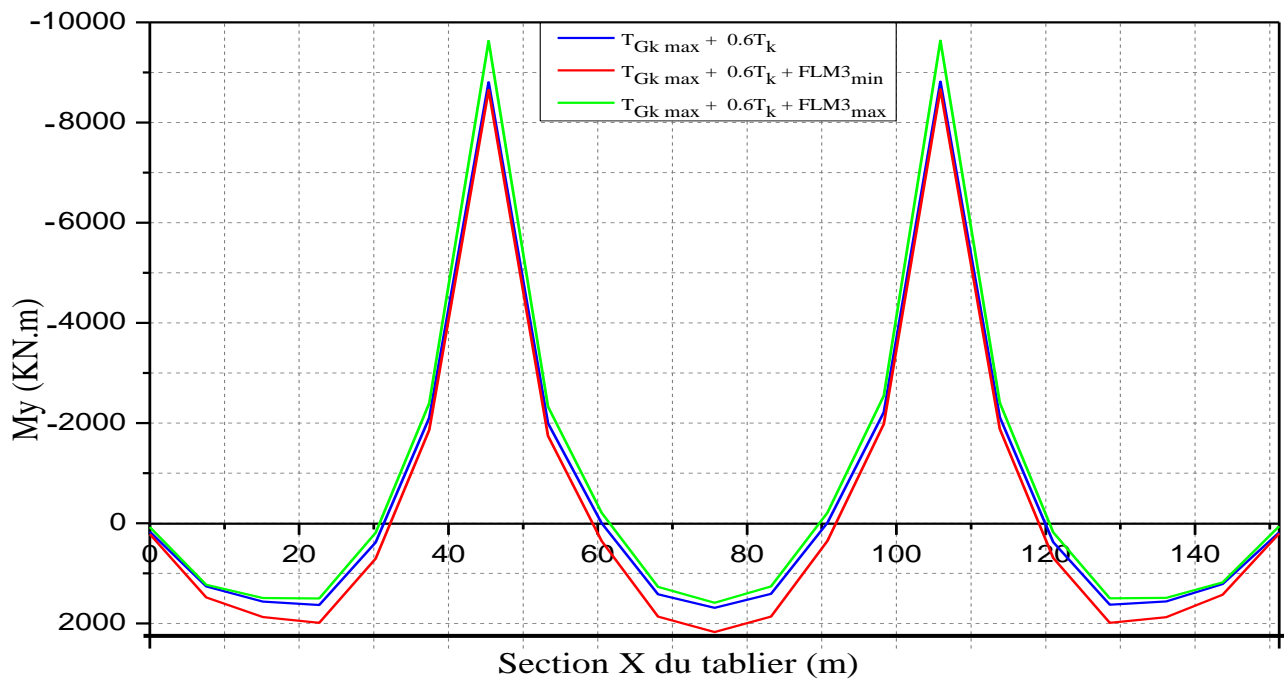
$$G_{k,sup}(\text{ou } G_{k,inf}) + 0.6 T_k$$

Les moments fléchissants dus au retrait S ont été négligés.

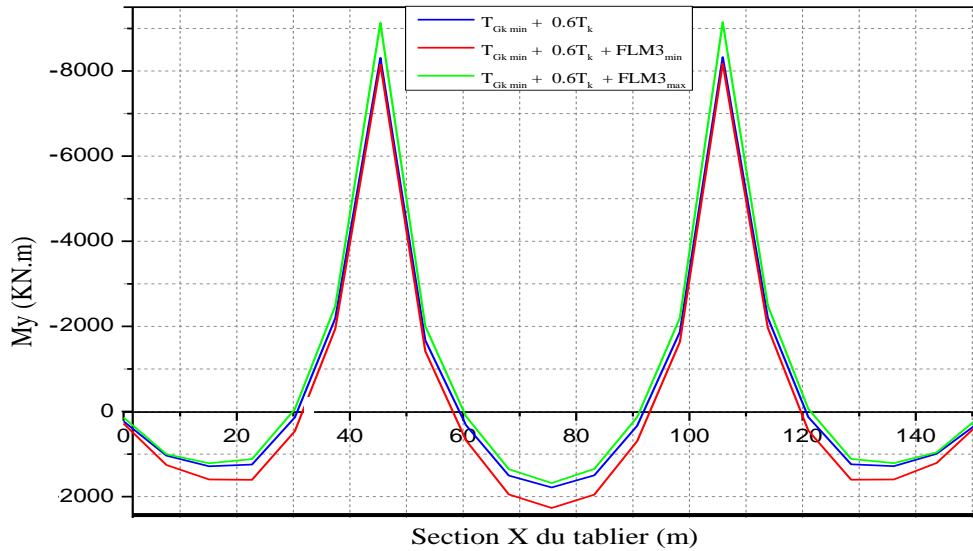
Les figures 3.12 et 3.13, représentent les courbes enveloppes des moment  $M_{Ed,min,f}$  et  $M_{Ed,max,f}$  obtenues par le passage du convoi de fatigue FLM3, à partir de l'état des sollicitations maximales et minimales et les combinaisons de base non cyclique.



**Figure 3.11.** Moments sous combinaison de base non cyclique



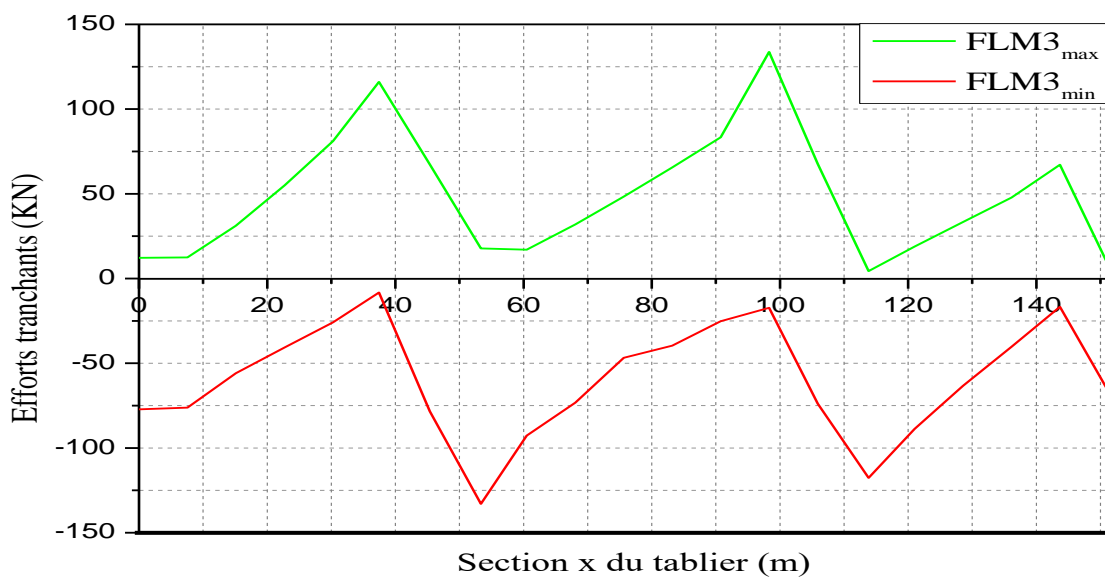
**Figure 3.12.** Moments enveloppes sous combinaison de base (valeur maximale) et FLM3



**Figure 3.13.** Moments enveloppes sous combinaison de base (valeur minimale) et FLM3

On en déduit de ces diagrammes que quel que soit la position du camion FLM3 le signe des contraintes engendrées dans la dalle est gouverné par celui engendré par la combinaison de base (ou non cyclique) indépendamment du signe obtenu avec le camion FLM3. En d’autres termes, la dalle sera tendue dans les zones au droit des appuis intermédiaires et comprimée dans les sections en travée courante et au droit des culées. Par conséquent les amplitudes de contraintes normales  $\Delta\sigma_p$  le long de l’ouvrage sont calculées avec l’inertie fissurée dans les zones d’appui et avec les inerties non fissurées dans les sections courantes sous moment positif.

La figure 3.14 représente les courbes de l’effort tranchant  $T_{Ed,min,f}$  et  $T_{Ed,max,f}$  obtenues par le passage du convoi de fatigue FLM3.



**Figure 3.14.** Efforts tranchants sous FLM3



### 3.6.2. Caractéristiques géométriques

Le tableau 3.4, donne les caractéristiques géométriques des sections fissurées et non fissurées des différentes sections de la poutre calculées à partir du logiciel LUSAS [14].

On désigne par :

$v'_1$  : distance entre le centre de gravité et la face inférieure de la semelle supérieure de la section non fissurée ;

$v_1$  : distance entre le centre de gravité et la face supérieure de la semelle inférieure de la section non fissurée ;

$v'_2$  : distance entre le centre de gravité et la face inférieure de la semelle supérieure de la section non fissurée ;

$v_2$  : distance entre le centre de gravité et la face supérieure de la semelle inférieure de la section non fissurée ;

$I_1$  : inertie de la section non fissurée ;

$I_2$  : inertie de la section fissurée.

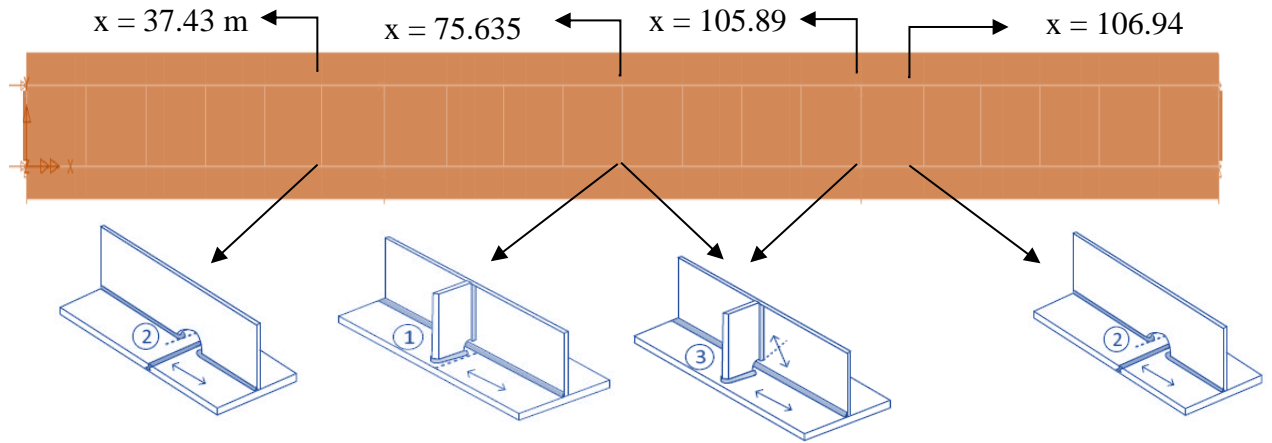
**Tableau 3.4.** Caractéristiques géométriques des sections mixtes

| Sections | $I_1$ (m <sup>4</sup> ) | $I_2$ (m <sup>4</sup> ) | $v_1$ (mm)  | $v'_1$ (mm) | $v_2$ (mm) | $v'_2$ (mm) |
|----------|-------------------------|-------------------------|-------------|-------------|------------|-------------|
| S1       | 0,0688427               | 0.0204700               | 339,9392423 | 1110,060758 | 828,34806  | 621,65194   |
| S2       | 0,116682                | 0.0368652               | 428,7042512 | 1170,295749 | 952,99541  | 646,00459   |
| S3       | 0,159904                | 0.0586239               | 479,7589661 | 1390,241034 | 1040,2257  | 829,77427   |
| S4       | 0,349189                | 0.1459050               | 677,2297147 | 1786,770285 | 1350,6447  | 1113,3553   |
| S5       | 0,488613                | 0.2183580               | 794,6518111 | 1922,348189 | 1481,0578  | 1235,9422   |
| S6       | 0,561763                | 0.2574740               | 847,980184  | 2002,019816 | 1549,9904  | 1300,0096   |
| S7       | 0,260477                | 0.1024420               | 589,6260478 | 1696,373952 | 1262,6512  | 1023,3488   |

A partir des caractéristiques géométriques, on calcul les contraintes maximales et minimales.

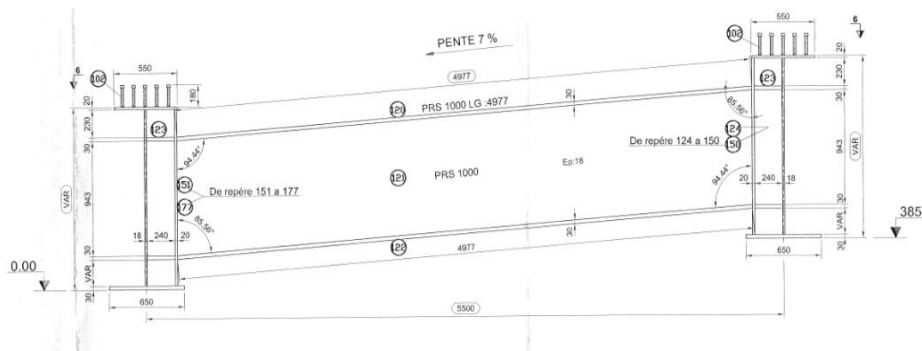
### 3.6.3. Catégories de détail étudiées

Dans cette étude, on se limite à la justification des catégories de détails dans les sections représentées sur la figure 3.15 :

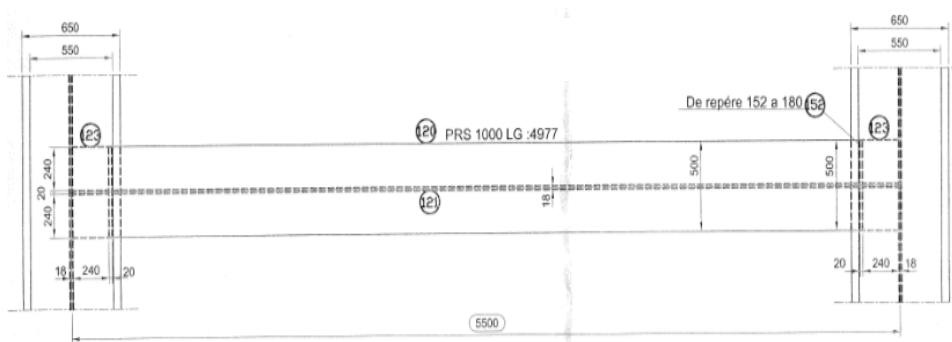


**Figure 3.15.** Les catégories de détail considérées pour les vérifications à l'ELU de fatigue

- ◆ **Détail constructif 1 :** soudure transversale de l'âme du montant vertical en T sur la semelle inférieure à l'abscisse  $x = 75.635$  m (au droit de l'entretoise courante située au milieu de la travée centrale de section transversale S7) ;



**Figure 3.16.** Coupe transversale sur entretoise courante.



**Figure 3.17.** Vue en plan sur entretoise courante.

- ◆ **Détail constructif 2** : soudure transversale de l'âme du montant vertical en T, au droit de l'entretoise sur la pile P2, sur la semelle supérieure de la poutre de section transversale S6 à l'abscisse  $x = 105.89$  m ;

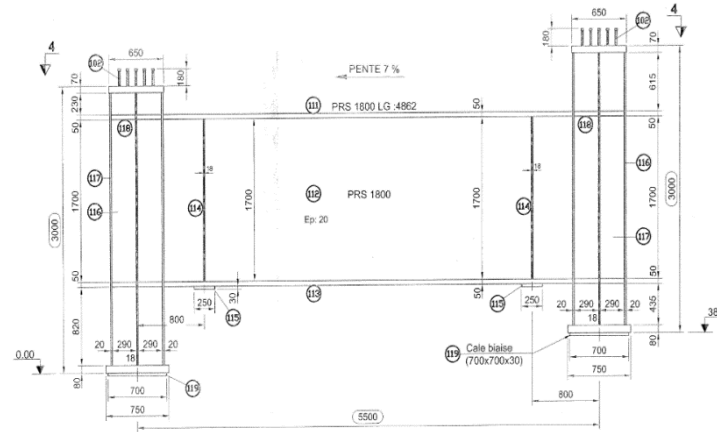


Figure 3.18. Coupe transversale sur entretoise sur Pile

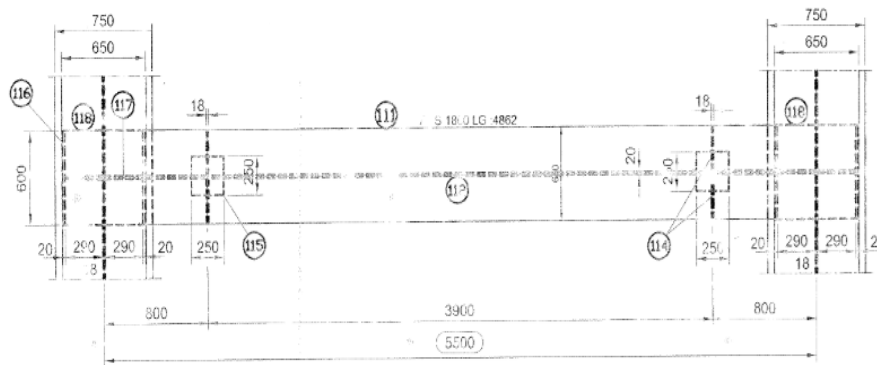
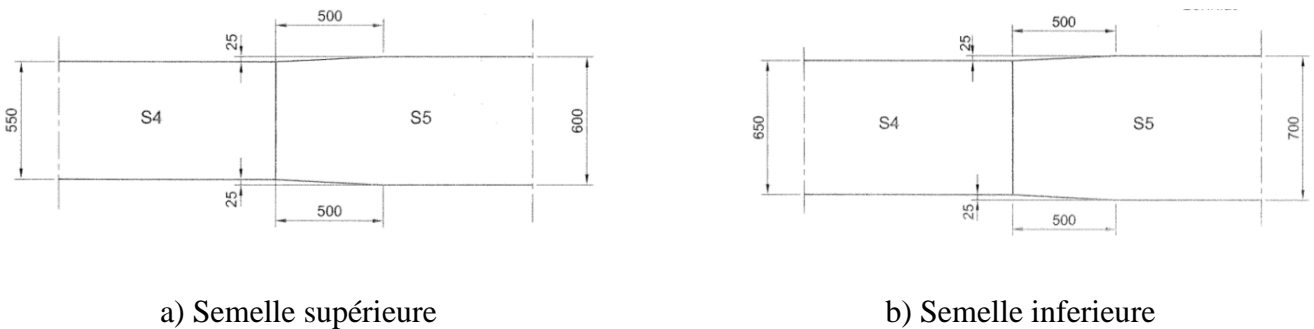


Figure 3.19. Vue en plan sur entretoise sur Pile

- ◆ **Détail constructif 3** : soudure bout à bout de la semelle inférieure pour le changement d'épaisseur entre les sections S4 et S5 de 650 mm à 700 mm à l'abscisse  $x = 37.43$  m ;

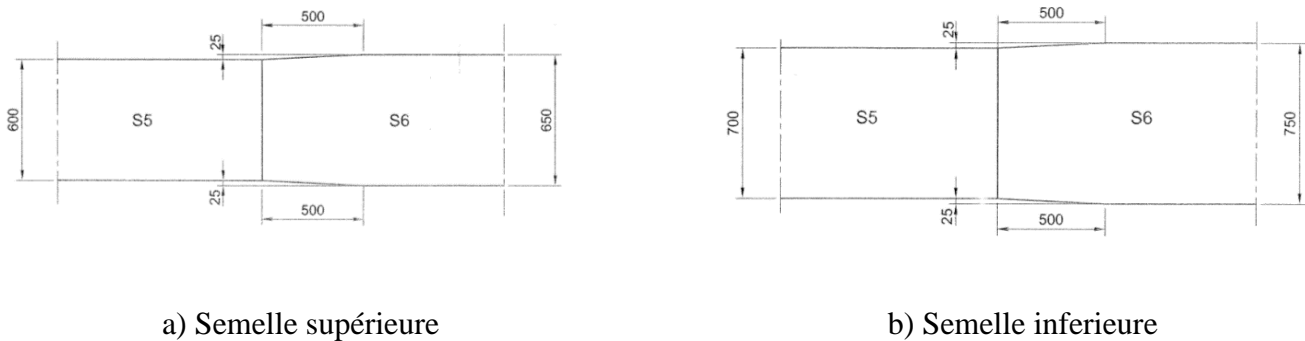


a) Semelle supérieure

b) Semelle inférieure

Figure 3.20. Variation de la largeur des semelles entre les sections S4 et S5 des poutres principales

- ◆ **Détail constructif 4** : soudure bout à bout de la semelle inférieure pour le changement d'épaisseur entre les sections S5 et S6, située en zone fissurée, de 700 mm à 750 mm à l'abscisse  $x = 106.94$  m.



**Figure 3.21.** Variation de la largeur des semelles entre les sections S6 et S5 des poutres principales

Pour les raidisseurs verticaux soudés sur une poutre laminée ou reconstituée soudée, les catégories de résistance à la fatigue  $\Delta\sigma_c$  et  $\Delta\tau_c$  pour les contraintes nominales sont données au Tableau 8.4 de l'EN 1993-1-9 [6] (Catégorie de détail 80, détail constructif 7) ;

Pour les soudures transversales bout à bout sans trou de souris, les catégories de résistance à la fatigue  $\Delta\sigma_c$  et  $\Delta\tau_c$  pour les contraintes nominales sont données au Tableau 8.3 de l'EN 1993-1-9 [6] (Catégorie de détail 80 détail constructif 9).

Pour chaque détail considéré, la justification en fatigue est effectuée en comparant la valeur de contraintes équivalente à 2 millions de cycles ( $\Delta\sigma_{E,2}$  et/ou  $\Delta\tau_{E,2}$ ) avec la résistance à la fatigue de chaque détail en tenant compte du facteur partiel de résistance en fatigue ( $\gamma_{Mf}$ ).

### 3.6.4. Justification par la méthode simplifiée des étendues de contrainte équivalentes

Cette méthode est exposée au § 2.3.1, où le convoi FLM3 est utilisé pour les justifications en fatigue. Selon les contraintes auxquelles les catégories de détail sont sollicitées, les conditions suivantes doivent être vérifiées :

- ◆ En cas de contraintes normales :

$$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2} \leq \frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}}$$

- ◆ En cas de contrainte de cisaillement :

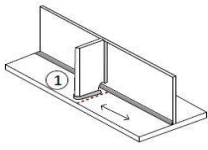
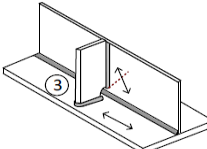
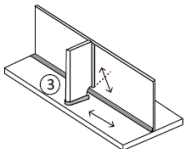
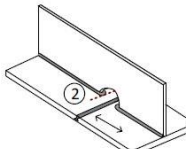
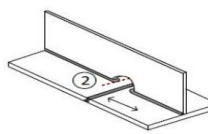
$$\gamma_{Ff} \Delta\tau_{E,2} \leq \frac{\Delta\tau_c}{\gamma_{Mf}}$$

◆ En cas de combinaison d'étendue de contrainte  $\Delta\sigma_{E,2}$   $\Delta\tau_{E,2}$

$$\left(\frac{\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_c/\gamma_{Mf}}\right)^3 + \left(\frac{\gamma_{Ff} \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_c/\gamma_{Mf}}\right)^5 \leq 1$$

Les résultats issus des vérifications sont présentés dans le tableau 3.5. Les calculs relatifs au calcul du coefficient  $\lambda$  sont détaillés dans l'Annexe B. L'historique des contraintes, obtenues par le passage du convoi de fatigue FLM3 sont présentés dans l'Annexe C.

**Tableau 3.5.** Résumés des calculs de justification des assemblages des poutres principales sous les camions FLM3

| Détail constructif  | 1<br>L'abscisse x = 75.635 m  |  | 2<br>L'abscisse x = 105.89 m  | 3<br>L'abscisse x = 37.43 m   | 4<br>L'abscisse x = 106.94 m  |
|---|---|--|---|---|---|
|   |  |  |  |  |  |
| $\lambda$<br>Moment de flexion  | 1.751   |  | 1.648   | 1.879   | 1.751   |
| $\Delta\sigma_{E,2}$ (MPa)  | 63,12337544   |  | 67,81141802   | 49,63515542   | 60,51603596   |
| $\Delta\sigma_c$ (catégorie de détail)  | 80  | 80   | 80  | 71  | 71  |
| $\frac{\gamma_{Mf}\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_c}$   | 1,06520696  | 1,06520696   | 1,144317679   | 0,94376704  | 1,150657022   |
| $\lambda$<br>Effort tranchant   | 2.058   |  | 1.973   | -   | -   |
| $\Delta\tau_{E,2}$ (MPa)  | 14,82034038   |  | 16,65286428   | -   | -   |
| $\Delta\tau_c$ (catégorie de détail)  | 80  |  | 80  | -   | -   |
| $\frac{\gamma_{Mf}\gamma_{Ff}\Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_c}$   | 0,250093244   |  | 0,281017085   | -   | -   |
| $\left(\frac{\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_c/\gamma_{Mf}}\right)^3 + \left(\frac{\gamma_{Ff}\Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_c/\gamma_{Mf}}\right)^5$ | 1,209632365   |  | 1,500194127   | -   | -   |

On constate que seulement la sections  $x = 37.43$  m de catégorie de détail 2 vérifie l'état limite de fatigue, toutes les autres catégories de détail étudiées ne vérifient pas l'état limite de fatigue avec la méthode des étendues de contraintes équivalentes. Les poutres principales doivent être redimensionnées. Ceci peut s'expliquer par le fait que les poutres ont été dimensionnées sans tenir compte des états limites de fatigue ou en utilisant les anciennes normes CM66 et additive 80.

### 3.6.5. Justification par la méthode Palmgren-Miner

Cette méthode est exposée § 2.3.2.2. Pour rappel, la vérification à partir de l'endommagement cumulé consiste à vérifier le critère suivant :

- ◆ Sur la base du cumul d'endommagement :

$$D_d = \sum_{i=1}^k \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}} \leq 1$$

avec :

$$n_{Ei} = N_{\text{obs}} \times D_{\text{vie}} \times \text{PC}$$

$$N_{\text{obs}} = 0.5 \times 10^6 \text{ par an et par voie lente, pour une catégorie de trafic 2 (Voir tableau 2.2)}$$

$$D_{\text{vie}} = 100 \text{ ans}$$

Les valeurs du pourcentage de camion PC selon la catégorie du trafic et leur type sont définis dans le tableau 2.1.

$$N_{Ri} = \begin{cases} \left( \frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Ft} \times \gamma_{Mf} \times \Delta\sigma_i} \right)^3 \times 2 \times 10^6 & \text{si } N_{Ri} \leq 5 \times 10^6 \\ \left( \frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_{Ft} \times \gamma_{Mf} \times \Delta\sigma_i} \right)^5 \times 5 \times 10^6 & \text{si } 5 \times 10^6 < N_{Ri} \leq 100 \times 10^6 \end{cases}$$

$$\text{où : } \Delta\sigma_D = 0.737 \Delta\sigma_C$$

Tous les paramètres de la formule ont été définis dans le chapitre 2.

Dans l'Annexe D sont présentés les historiques des contraintes et les cycles qui leur sont associés appliquées à chacun des catégories de détail obtenues par le passage l'ensemble des camions du convoi de fatigue FLM4.

Pour les contraintes principales :

$$\Delta\sigma_{\text{principal}} = \frac{\Delta\sigma}{2} + \sqrt{\left(\frac{\Delta\sigma}{2}\right)^2 + \Delta\tau^2} \quad (2.24)$$

Les résultats issus des vérifications sont présentés dans les tableaux 3.6, 3.7, 3.8 et 3.9.



**Tableau 3.6.** Vérification de la soudure bout à bout de la semelle inférieure (Section x = 37.43 m).

|         |        |             |                |                      |                 | FLM 4<br>N <sub>obs</sub> = 500 000 |                |                                 |   |
|---------|--------|-------------|----------------|----------------------|-----------------|-------------------------------------|----------------|---------------------------------|---|
|         |        |             |                |                      |                 | MOYENNE DISTANCE                    |                |                                 |   |
| POINT   | CAMION | Cycle n=°   | $\Delta\sigma$ | $\Delta\sigma_{c,x}$ | N <sub>Ri</sub> | PC (%)                              | n <sub>i</sub> | n <sub>i</sub> /N <sub>Ri</sub> | D |
| X=37.43 | A      | 1           | 2,479935691    | 71                   | -               | 40                                  | 10000000       | 0                               | 0 |
|         | A      | 2           | 8,784983153    | 71                   | -               | 40                                  | 10000000       | 0                               |   |
|         | A      | 3           | 7,306974532    | 71                   | -               | 40                                  | 10000000       | 0                               |   |
|         | A      | 4           | 1,219596071    | 71                   | -               | 40                                  | 10000000       | 0                               |   |
|         | B      | 1           | 3,753992896    | 71                   | -               | 10                                  | 2500000        | 0                               |   |
|         | B      | 2           | 17,39182722    | 71                   | -               | 10                                  | 2500000        | 0                               |   |
|         | B      | 3           | 17,54850536    | 71                   | -               | 10                                  | 2500000        | 0                               |   |
|         | B      | 4           | 2,906580386    | 71                   | -               | 10                                  | 2500000        | 0                               |   |
|         | C      | 1           | 3,461017025    | 71                   | -               | 30                                  | 7500000        | 0                               |   |
|         | C      | 2           | 17,39182722    | 71                   | -               | 30                                  | 7500000        | 0                               |   |
|         | C      | 3           | 17,54850536    | 71                   | -               | 30                                  | 7500000        | 0                               |   |
|         | C      | 3           | 2,906580386    | 71                   | -               | 30                                  | 7500000        | 0                               |   |
|         | D      | 1           | 2,403100938    | 71                   | -               | 15                                  | 3750000        | 0                               |   |
|         | D      | 2           | 14,15892741    | 71                   | -               | 15                                  | 3750000        | 0                               |   |
|         | D      | 3           | 13,91345062    | 71                   | -               | 15                                  | 3750000        | 0                               |   |
|         | D      | 4           | 2,297156862    | 71                   | -               | 15                                  | 3750000        | 0                               |   |
| E       | 1      | 2,403100938 | 71             | -                    | 5               | 1250000                             | 0              |                                 |   |
| E       | 2      | 14,15892741 | 71             | -                    | 5               | 1250000                             | 0              |                                 |   |
| E       | 3      | 13,91345062 | 71             | -                    | 5               | 1250000                             | 0              |                                 |   |
| E       | 4      | 2,297156862 | 71             | -                    | 5               | 1250000                             | 0              |                                 |   |

**Tableau 3.7.** Vérification de la soudure transversale de l'âme des montants verticaux courants en T sur la semelle inférieure (Section  $x = 75,635$  m).

|          |        |             |                |                      |                 | FLM 4<br>N <sub>obs</sub> = 500 000 |                |                                 |             |
|----------|--------|-------------|----------------|----------------------|-----------------|-------------------------------------|----------------|---------------------------------|-------------|
|          |        |             |                |                      |                 | MOYENNE DISTANCE                    |                |                                 |             |
| POINT    | CAMION | Cycle n=°   | $\Delta\sigma$ | $\Delta\sigma_{c,x}$ | N <sub>Ri</sub> | PC (%)                              | n <sub>i</sub> | n <sub>i</sub> /N <sub>Ri</sub> | D           |
| X=75.635 | A      | 1           | 2,34388199     | 80                   | -               | 40                                  | 10000000       | 0                               | 2,501263799 |
|          | A      | 2           | 17,3171774     | 80                   | -               | 40                                  | 20000000       | 0                               |             |
|          | A      | 3           | 2,63928401     | 80                   | -               | 40                                  | 10000000       | 0                               |             |
|          | B      | 1           | 3,591766335    | 80                   | -               | 10                                  | 2500000        | 0                               |             |
|          | B      | 2           | 26,52637965    | 80                   | 60492095,71     | 10                                  | 5000000        | 0,08265543                      |             |
|          | B      | 3           | 4,094769361    | 80                   | -               | 10                                  | 2500000        | 0                               |             |
|          | C      | 1           | 4,343471821    | 80                   | -               | 30                                  | 7500000        | 0                               |             |
|          | C      | 2           | 38,14676897    | 80                   | 9835574,692     | 30                                  | 15000000       | 1,52507611                      |             |
|          | C      | 3           | 6,290179361    | 80                   | -               | 30                                  | 7500000        | 0                               |             |
|          | D      | 1           | 4,343471821    | 80                   | -               | 15                                  | 3750000        | 0                               |             |
|          | D      | 2           | 38,14676897    | 80                   | 9835574,692     | 15                                  | 7500000        | 0,76253806                      |             |
|          | D      | 3           | 6,290179361    | 80                   | -               | 15                                  | 3750000        | 0                               |             |
|          | E      | 1           | 3,361041291    | 80                   | -               | 5                                   | 1250000        | 0                               |             |
|          | E      | 2           | 33,41028057    | 80                   | 19084813,58     | 5                                   | 2500000        | 0,13099421                      |             |
| E        | 3      | 5,651038543 | 80             | -                    | 5               | 1250000                             | 0              |                                 |             |

**Tableau 3.8.** Vérification de la soudure transversale de l'âme des montants verticaux courants en T sur la semelle inférieure (Section x = 105.89 m).

|          |        |             |                |                      |                 | FLM 4<br>N <sub>obs</sub> = 500 000 |                |                                 |             |
|----------|--------|-------------|----------------|----------------------|-----------------|-------------------------------------|----------------|---------------------------------|-------------|
|          |        |             |                |                      |                 | MOYENNE DISTANCE                    |                |                                 |             |
| POINT    | CAMION | Cycle n=°   | $\Delta\sigma$ | $\Delta\sigma_{c,x}$ | N <sub>Ri</sub> | PC (%)                              | n <sub>i</sub> | n <sub>i</sub> /N <sub>Ri</sub> | D           |
| X=105.89 | A      | 1           | 3,246792886    | 80                   | -               | 40                                  | 10000000       | 0                               | 2,851653013 |
|          | A      | 2           | 18,76388484    | 80                   | -               | 40                                  | 10000000       | 0                               |             |
|          | A      | 3           | 12,68745379    | 80                   | -               | 40                                  | 20000000       | 0                               |             |
|          | A      | 4           | 15,14021046    | 80                   | -               | 40                                  | 10000000       | 0                               |             |
|          | B      | 1           | 4,976257009    | 80                   | -               | 10                                  | 2500000        | 0                               |             |
|          | B      | 2           | 29,0758411     | 80                   | 38232007,48     | 10                                  | 2500000        | 0,065390236                     |             |
|          | B      | 3           | 19,07892174    | 80                   | -               | 10                                  | 5000000        | 0                               |             |
|          | B      | 4           | 23,46557291    | 80                   | -               | 10                                  | 2500000        | 0                               |             |
|          | C      | 1           | 6,021089353    | 80                   | -               | 30                                  | 7500000        | 0                               |             |
|          | C      | 2           | 45,10665359    | 80                   | 4534995,137     | 30                                  | 7500000        | 1,653805522                     |             |
|          | C      | 3           | 23,04589903    | 80                   | -               | 30                                  | 15000000       | 0                               |             |
|          | C      | 4           | 36,48568192    | 80                   | 12287858,4      | 30                                  | 7500000        | 0,610358596                     |             |
|          | D      | 1           | 4,534437745    | 80                   | -               | 15                                  | 3750000        | 0                               |             |
|          | D      | 2           | 35,82565733    | 80                   | 13462251,46     | 15                                  | 3750000        | 0,278556675                     |             |
|          | D      | 3           | 17,64816576    | 80                   | -               | 15                                  | 7500000        | 0                               |             |
|          | D      | 4           | 28,9868103     | 80                   | 38822758,89     | 15                                  | 3750000        | 0                               |             |
|          | E      | 1           | 4,660991312    | 80                   | -               | 5                                   | 1250000        | 0                               |             |
|          | E      | 2           | 40,92397192    | 80                   | 6921490,803     | 5                                   | 1250000        | 0,180596931                     |             |
| E        | 3      | 18,27004666 | 80             | -                    | 5               | 2500000                             | 0              |                                 |             |
| E        | 4      | 33,14576334 | 80             | 19858590,03          | 5               | 1250000                             | 0,062945053    |                                 |             |

**Tableau 3.9.** Vérification de la soudure bout à bout de la semelle inférieure (Section x = 106.94 m)

|          |        |           |                |                      |                 | FLM 4<br>N <sub>obs</sub> = 500 000 |                |                                 |             |
|----------|--------|-----------|----------------|----------------------|-----------------|-------------------------------------|----------------|---------------------------------|-------------|
|          |        |           |                |                      |                 | MOYENNE DISTANCE                    |                |                                 |             |
| POINT    | CAMION | Cycle n=° | $\Delta\sigma$ | $\Delta\sigma_{c,x}$ | N <sub>Ri</sub> | PC (%)                              | n <sub>i</sub> | n <sub>i</sub> /N <sub>Ri</sub> | D           |
| X=106.94 | A      | 1         | 8,586375792    | 71                   | -               | 40                                  | 10000000       | 0                               | 0,232828888 |
|          | A      | 2         | 9,681722894    | 71                   | -               | 40                                  | 20000000       | 0                               |             |
|          | A      | 3         | 4,030878805    | 71                   | -               | 40                                  | 10000000       | 0                               |             |
|          | B      | 1         | 13,45568491    | 71                   | -               | 10                                  | 2500000        | 0                               |             |
|          | B      | 2         | 15,00825587    | 71                   | -               | 10                                  | 5000000        | 0                               |             |
|          | B      | 3         | 6,247650737    | 71                   | -               | 10                                  | 2500000        | 0                               |             |
|          | C      | 1         | 14,23259617    | 71                   | -               | 30                                  | 7500000        | 0                               |             |
|          | C      | 2         | 23,24744291    | 71                   | -               | 30                                  | 15000000       | 0                               |             |
|          | C      | 3         | 9,188564553    | 71                   | 64424995,33     | 30                                  | 7500000        | 0,232828888                     |             |
|          | D      | 1         | 9,799554808    | 71                   | -               | 15                                  | 3750000        | 0                               |             |
|          | D      | 2         | 18,41829819    | 71                   | -               | 15                                  | 7500000        | 0                               |             |
|          | D      | 3         | 7,206723822    | 71                   | -               | 15                                  | 3750000        | 0                               |             |
|          | E      | 1         | 10,55106694    | 71                   | -               | 5                                   | 1250000        | 0                               |             |
|          | E      | 2         | 21,07374098    | 71                   | -               | 5                                   | 2500000        | 0                               |             |
|          | E      | 3         | 8,062075905    | 71                   | -               | 5                                   | 1250000        | 0                               |             |

**Tableau 3.10.** Vérification de la soudure transversale de l'âme des montants verticaux courants en T sur la semelle inférieure (Section x = 105.89 m)

|          |        |             |                  |                      |                 | FLM 4<br>N <sub>obs</sub> = 500 000 |                |                                 |            |
|----------|--------|-------------|------------------|----------------------|-----------------|-------------------------------------|----------------|---------------------------------|------------|
|          |        |             |                  |                      |                 | MOYENNE DISTANCE                    |                |                                 |            |
| POINT    | CAMION | Cycle n=°   | $\Delta\sigma_p$ | $\Delta\sigma_{c,x}$ | N <sub>Ri</sub> | PC (%)                              | n <sub>i</sub> | n <sub>i</sub> /N <sub>Ri</sub> | D          |
| X=105.89 | A      | 1           | 4,98681333       | 80                   | -               | 40                                  | 10000000       | 0                               | 3,16818337 |
|          | A      | 2           | 29,2107352       | 80                   | 37357353,3      | 40                                  | 10000000       | 0,26768492                      |            |
|          | A      | 3           | 18,4743538       | 80                   | -               | 40                                  | 20000000       | 0                               |            |
|          | A      | 4           | 23,5886221       | 80                   | -               | 40                                  | 10000000       | 0                               |            |
|          | B      | 1           | 4,98681333       | 80                   | -               | 10                                  | 2500000        | 0                               |            |
|          | B      | 2           | 29,21073517      | 80                   | 37357353,3      | 10                                  | 2500000        | 0,06692123                      |            |
|          | B      | 3           | 18,47435381      | 80                   | -               | 10                                  | 5000000        | 0                               |            |
|          | B      | 4           | 23,58862207      | 80                   | -               | 10                                  | 2500000        | 0                               |            |
|          | C      | 1           | 6,03384078       | 80                   | -               | 30                                  | 7500000        | 0                               |            |
|          | C      | 2           | 45,29485525      | 80                   | 4167198,19      | 30                                  | 7500000        | 1,67459288                      |            |
|          | C      | 3           | 23,08177428      | 80                   | -               | 30                                  | 15000000       | 0                               |            |
|          | C      | 4           | 36,65569807      | 80                   | 12005522,4      | 30                                  | 7500000        | 0,62471251                      |            |
|          | D      | 1           | 4,544044614      | 80                   | -               | 15                                  | 3750000        | 0                               |            |
|          | D      | 2           | 35,98160188      | 80                   | 13173041,7      | 15                                  | 3750000        | 0,28467229                      |            |
|          | D      | 3           | 17,78983143      | 80                   | -               | 15                                  | 7500000        | 0                               |            |
|          | D      | 4           | 29,12832277      | 80                   | 37888825,6      | 15                                  | 3750000        | 0                               |            |
|          | E      | 1           | 4,670868318      | 80                   | -               | 5                                   | 1250000        | 0                               |            |
|          | E      | 2           | 41,11895935      | 80                   | 6758930,2       | 5                                   | 1250000        | 0,18494051                      |            |
| E        | 3      | 18,32385072 | 80               | -                    | 5               | 2500000                             | 0              |                                 |            |
| E        | 4      | 33,32433906 | 80               | 19332179,3           | 5               | 1250000                             | 0,06465903     |                                 |            |

Comme c'est le cas pour la méthode des étendues de contraintes équivalentes, on constate que seule la catégorie de détail 2 à la section d'abscisse  $x = 106.94$  m vérifie l'état limite vis-à-vis de la fatigue lorsqu'on utilise la méthode de l'endommagement cumulé.

A noter, que les coefficients d'endommagement  $D_i = 0$  correspondent à des étendues de contraintes faibles situées sous la limite de troncature (Art A4 de l'EN 1993-1-9 [5]).

**Tableau 3.11.** Comparaison des vérifications avec les deux méthodes.

| Section<br>Méthode | $x = 37.43$ m | $x = 75.635$ m | $x = 105.89$ m |              | $x = 106.94$ m |
|--------------------|---------------|----------------|----------------|--------------|----------------|
| $\lambda$          | Vérifiée      | Non Vérifiée   | Non Vérifiée   |              | Non Vérifiée   |
| Palmgren-Miner     | Vérifiée      | Non Vérifiée   | $\sigma$       | $\sigma_p$   | Vérifiée       |
|                    |               |                | Non Vérifiée   | Non Vérifiée |                |

## Conclusion

La justification à la fatigue de l'ossature métallique d'un pont mixte à la fatigue est un rude et long exercice qui fait appel non seulement aux sciences des matériaux et la mécanique des structures mais aussi à des connaissances approfondies concernant les dispositions constructives adéquates pour augmenter les performances des différents types d'assemblages.

Les ponts sont des ouvrages qui sont soumis à des charges répétées pouvant causer leur endommagement. Pour cette raison, les normes modernes telles que les Eurocodes proposent des méthodes pratiques pour diminuer les effets de fatigue sur les éléments les plus sensibles désignés par catégorie de détail. Le principe de ces méthodes consiste à prédire l'histoire du chargement auquel le pont peut être soumis durant toute sa mise en service en prenant compte des données du trafic enregistrées puis à calculer les étendues de contraintes dans les sections considérées ainsi que le nombre de cycle correspondant à chacune des étendues de contrainte. Les Eurocodes proposent aussi pour chaque catégorie de détail la courbe donnant le nombre de cycle à la rupture en fonction de l'étendue de contrainte (courbe de Wöhler). Les Eurocodes proposent deux approches pour vérifier l'état limite ultime vis-à-vis de la fatigue.

La première approche consiste à vérifier que, pour le nombre de cycles obtenu avec le camion type FLM3, l'étendue de contrainte maximale est inférieure à la résistance de la catégorie de détail étudiée.

La deuxième approche consiste utiliser le principe de l'endommagement cumulatif pour vérifier que la somme des nombres de cycles avec amplitude constante des contraintes produits par les camions du convoi de fatigue FLM 4 est inférieure au nombre de cycles causant l'endommagement sous amplitude de contrainte constante.

Pour tenir compte des incertitudes liées aux charges, au calcul des efforts internes et des résistances, les méthodes proposées sont fondées sur l'approche semi-probabiliste utilisant les coefficients partiels de sécurité.

Les deux méthodes ont été utilisées pour justifier des assemblages dans les poutres principales d'un pont mixte existant. Les résultats obtenus montrent que pour la plupart des assemblages étudiés, l'état limite de fatigue n'est pas vérifié. Ceci était un peu prévisible car à notre connaissance les vérifications vis-à-vis les états limites de fatigue ne sont pas pris en compte par les bureaux d'étude lors du dimensionnement des ponts. Ceci a été aussi constaté dans les mémoires de calcul des ponts disponibles

en ligne. La non prise en compte des vérifications vis-à-vis des états de fatigue peut causer à long terme des désordres ou un endommagement dans les parties les plus sensibles de l'ouvrage entraînant des coûts additionnels de réparation et de maintenance ou une perturbation du trafic.

Les études réalisées au cours de ce mémoire m'a permis d'approfondir mes connaissances en termes de modélisation par éléments finis et de dimensionnement par les Eurocodes. Cette étude m'a aussi permis de m'initier à la modélisation par éléments finis par le logiciel LUSAS qui est très utile pour la modélisation des ouvrages de génie civil et particulièrement des ponts et qui pourrait m'être utile dans mes travaux futurs.

Je recommande pour les travaux de mémoires futurs de considérer les justifications vis-à-vis de la fatigue de la dalle et de la connexion dalle-poutre.



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] EN 1991-2 : Eurocode 1, Actions sur les structures. Partie 2, Actions sur les ponts, dues au trafic. Mars 2004.
- [2] EN 1991-1-1 : Eurocode 1, Actions sur les structures. Partie 1-1, Actions générales – Poids volumiques, poids propres, charges d'exploitation des bâtiments. Mars 2003.
- [3] EN 1992-1-1 : Eurocode 2, Calcul des structures en béton. Partie 1-1, Règles générales et règles pour les bâtiments. Octobre 2005.
- [4] EN 1994-2 : Eurocode 4, Calcul des structures mixtes acier/béton. Partie 2 : Règles générales et règles pour les ponts. Février 2006.
- [5] EN 1993-1-9 (P22-319-1) : Eurocode 3, Calcul des structures en acier. Partie 1-9 : Fatigue. Décembre 2005.
- [6] EN 1993-2 : Eurocode 3, Calcul des structures en acier. Partie 2 : Ponts métalliques. Mars 2007 (+ AC :2009).
- [7] Al-Emrani M. and Aygül M. (2014), Fatigue design of steel and composite bridges, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- [8] EN 1990 : Eurocodes structuraux, Bases de calcul des structures. Mars 2003.
- [9] EN 1994-1-1 : Eurocode 4, Calcul des structures mixtes acier/béton. Partie 1- 1 : Règles générales et règles pour les bâtiments. Juin 2005
- [10] Sétra : Guide méthodologique – Eurocodes 3 et 4 – Application aux ponts routiers mixtes acier-béton. Sétra, Juillet 2007.  
<https://www.academia.edu>
- [11] Miner M. A. (1945), Cumulative damage in fatigue. Journal of Applied Mechanics, 67, A159-A164.

- [12] EN 10025-3 (2005), Technical delivery conditions for normalized/normalized rolled weldable fine grain structural steels.  
<https://www.boutique.afnor.org>
- [13] Saket A. et Khataoui A. (2019), Etude aux Eurocodes du Tablier d'un Bipoutre Mixte, Mémoire de Master, Université Larbi Tébessi de Tébessa.
- [14] Lusas 14. Manuals Finite element analysis Ltd. Version 13.5. UK. 2006.
- [15] Guide de conception et de justifications ponts métalliques et mixtes résistance à la fatigue (1996), Centre des Techniques d'Ouvrages d'Art.  
<https://www.cerema.fr/fr/.../ponts-mtalliques-mixtes-resistance-fatigue>.
- [16] EN 1992-1-1 (P18-711-1) : Eurocode 2, Calcul des structures en béton. Partie 1-1, Règles générales et règles pour les bâtiments. Octobre 2005.
- [17] Sétra : Guide méthodologique – Eurocodes 2 – Application aux ponts-routes en béton. Sétra, Juillet 2008.  
<http://dtrf.setra.fr> > pdf-page > Dtrf.
- [18] EN 1993-1-1: Eurocode 3. Calcul des structures en acier. Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments. Octobre 2005.
- [19] Dahlvik M. and Eriksson J. (2014), Load effect modelling in fatigue design of composite bridges, MSc thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden.  
<http://kth.diva-portal.org> > record.
- [20] Molinaro H. et Rattiez H. (2018), Fatigue de la charpente métallique d'un pont mixte.  
<https://eduscol.education.fr> > files > pedagogiques
- [21] Marc Blétry 2007 Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux.
- [22] Wohler, A. “ Uber die Festigkeitsversuche mit Eisen und Stahl, ” Z. Bauwesen, 8 (1858) 641 ; 10 (1860) 583 ; 13 (1863) 233 ; 16 (1866) 67 ; 20 (1870) 73.

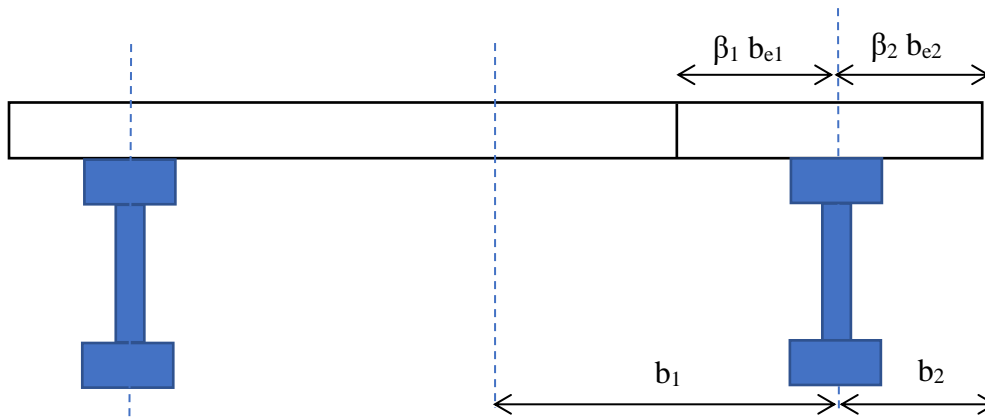
- [23] EN 1992-2 : Eurocode 2, Calcul des structures en béton. Partie 2, Ponts en béton, Calcul des dispositions constructives. Mai 2006.
- [24] Soltani MR., (2018), Cours de conception avancée des ponts, Université de Tébessa.
- [25] Labed A., (2017), Cours de constructions métalliques, Université de Tébessa.

## **Annexe A**

### **Largeurs efficaces des poutres**

♦ **Calcul de largeur efficace de la dalle «  $b_{eff}$  »**

La figure A.3, illustre les différentes notions pour le calcul de largeur efficace de la dalle  $b_{eff}$



**Figure A.3.** Largeur efficace de la dalle

$$b_{eff} = b_0 + \beta_1 b_{e1} + \beta_2 b_{e2}$$

• **Sections en travées de rive :**

$$\beta_1 = \beta_2 = 1$$

$$L_e = 0.85 L_1 = 0.85 \times 45.38 = 38.573 \text{ m}$$

$$b_{e1} = \min (L_e/8 ; b_1) = \min (4.821625 ; 2.75) = 2.75 \text{ m}$$

$$b_{e2} = \min (L_e/8 ; b_2) = \min (5.1541875 ; 2.25) = 2.25 \text{ m}$$

$$b_{eff} = 5 \text{ m}$$

• **Sections sur appuis intermédiaires :**

$$\beta_1 = \beta_2 = 1$$

$$L_e = 0.25 (L_1 + L_2) = 0.25 \times (45.38 + 60.51) = 26.4725 \text{ m}$$

$$b_{e1} = \min (L_e/8 ; b_1) = \min (3.3091 ; 2.75) = 2.75 \text{ m}$$

$$b_{e2} = \min (L_e/8 ; b_2) = \min (3.3091 ; 2.25) = 2.25 \text{ m}$$

$$b_{eff} = 5 \text{ m}$$

• **Sections en travée centrale :**

$$\beta_1 = \beta_2 = 1$$

$$L_e = 0.7 L_2 = 0.7 \times 60.51 = 42.357 \text{ m}$$

$$b_{e1} = \min (L_e/8 ; b_1) = \min (5.29463 ; 2.75) = 2.75 \text{ m}$$

$$b_{e2} = \min (L_e/8 ; b_2) = \min (5.29463 ; 2.25) = 2.25 \text{ m}$$

$$b_{eff} = 5 \text{ m}$$

- **Sections sur culées :**

$$L_e = 0.85 L_1 = 0.85 \times 45.38 = 38.573 \text{ m}$$

$$\beta_1 = 0.55 + 0.025 (L_e / b_1) = 0.55 + 0.025 \times \frac{38.573}{2.75} = 0.974813$$

$$\beta_2 = 0.55 + 0.025 (L_e / b_2) = 0.55 + 0.025 \times \frac{38.573}{2.25} = 0.978589$$

$$b_{e1} = \min (L_e / 8 ; b_1) = \min (4.821625 ; 2.75) = 2.75 \text{ m}$$

$$b_{e2} = \min (L_e / 8 ; b_2) = \min (4.821625 ; 2.25) = 2.25 \text{ m}$$

$$b_{\text{eff}} = 4.8826 \text{ m}$$

## **Annexe B**

### **Calcul des coefficients $\lambda$**

Les coefficients  $\lambda_i$  de la charpente métallique sont calculés selon l'EN 1993-2 [6] §9.5.2, et sont exposés dans § 2.3.1.2.8 de ce mémoire.

### a) Coefficient $\lambda_1$

Le coefficient  $\lambda_1$  est calculé à partir des abaques issus de l'EN1993-2 [6] suivant l'emplacement de la section étudiée et le type de sollicitations.

Pour le moment de flexion, on obtient :

- Travée de rive :  $L = L_{\text{de rive}} = 45,38 \text{ m}$   

$$\lambda_1 = 2.55 - \left[ 0.7 \times \frac{L-10}{70} \right] = 2.55 - \left[ 0.7 \times \frac{45.38-10}{70} \right] = 2.20$$
- Sur appui intermédiaire :  $L = \frac{(L_{\text{de rive}} + L_{\text{t centrale}})}{2} = \frac{(45.38 + 60.51)}{2} = 52.945$   

$$\lambda_1 = 1.70 + \left[ 0.5 \times \frac{L-30}{50} \right] = 1.70 + \left[ 0.5 \times \frac{52.945-30}{50} \right] = 1.93$$
- En travée centrale :  $L = L_{\text{t Centrale}} = 60.51 \text{ m}$   

$$\lambda_1 = 2.55 - \left[ 0.7 \times \frac{L-10}{70} \right] = 2.55 - \left[ 0.7 \times \frac{60.51-10}{70} \right] = 2.05$$

Pour l'effort tranchant, on obtient :

- Travée de rive :  $L = 0.4 \times L_{\text{de rive}} = 0.4 \times 45.38 = 18.152 \text{ m}$   

$$\lambda_1 = 2.55 - \left[ 0.7 \times \frac{L-10}{70} \right] = 2.55 - \left[ 0.7 \times \frac{18.152-10}{70} \right] = 2.47$$
- Sur appui intermédiaire :  $L = L_{\text{t Centrale}} = 60.51 \text{ m}$   

$$\lambda_1 = 1.70 + \left[ 0.5 \times \frac{L-30}{50} \right] = 1.70 + \left[ 0.5 \times \frac{60.51-30}{50} \right] = 2.31$$
- En travée centrale :  $L = 0.4 \times L_{\text{t Centrale}} = 0.4 \times 60.51 = 24.204 \text{ m}$   

$$\lambda_1 = 2.55 - \left[ 0.7 \times \frac{L-10}{70} \right] = 2.55 - \left[ 0.7 \times \frac{24.204-10}{70} \right] = 2.41$$

### b) Coefficient $\lambda_2$

$\lambda_2$  rend compte de la composition du trafic :

$$\lambda_2 = \frac{Q_{m1}}{Q_0} \left( \frac{N_{obs}}{N_0} \right)^{\frac{1}{5}}$$

- Une catégorie de trafic 2 (soit "route et autoroute avec un trafic de camions moyens"). Le nombre indicatif de véhicules lourds prévus par voie lente est alors de  $N_{obs} = 0,5.10^6$  ;



- Une composition du trafic moyenne distance définie pour le modèle de charge de fatigue 3 (FLM3). Le poids moyen  $Q_{m1}$  des camions par voie lente est alors  $Q_{m1} = 410$  kN ;
- Les valeurs de référence pour  $Q_0$  et  $N_0$  valent :  $Q_0 = 480$  kN (poids de FLM3) et  $N_{0bs} = 0,5 \cdot 10^6$ .

$$\lambda_2 = \frac{Q_{m1}}{Q_0} \left( \frac{N_{obs}}{N_0} \right)^{\frac{1}{5}} = \frac{410}{480} \left( \frac{0,5 \times 10^6}{0,5 \times 10^6} \right)^{\frac{1}{5}} = 0,854$$

**c) Coefficient  $\lambda_3$**

$\lambda_3$  est le coefficient qui rend compte de la durée de vie de calcul du pont  $t_{Ld}$ .

$$\lambda_3 = \left( \frac{t_{Ld}}{100} \right)^{1/5}$$

D'après les données fournies par la DTP de la wilaya de Biskra, la durée de vie de calcul du pont est de 100 ans.

$$\lambda_3 = \left( \frac{t_{Ld}}{100} \right)^{1/5} = \left( \frac{100}{100} \right)^{1/5} = 1$$

**d) Coefficient  $\lambda_4$**

$\lambda_4$  prend en compte les effets du trafic lourd sur les autres voies lentes définies au projet.

$$\lambda_4 = \left[ 1 + \frac{N_2}{N_1} \left( \frac{\eta_2 Q_{m2}}{\eta_1 Q_{m1}} \right)^5 + \frac{N_3}{N_1} \left( \frac{\eta_3 Q_{m3}}{\eta_1 Q_{m1}} \right)^5 + \dots + \frac{N_k}{N_1} \left( \frac{\eta_k Q_{mk}}{\eta_1 Q_{m1}} \right)^5 \right]^{1/5}$$

Dans le cas d'une seule voie lente  $\lambda_4 = 1,0$ .

**e) Coefficient limite  $\lambda_{max}$**

$\lambda_{max}$  est calculé à partir de la figure 9.6 de l'EN 1993-2 [6].

Pour le moment de flexion :

- En travée de rive :  $L = L_{de\ rive} = 45,3$  m

$$\lambda_{max} = 2,0$$

- Sur appui intermédiaire :  $L = \frac{(L_{de\ rive} + L_{t\ centrale})}{2} = \frac{(45,38 + 60,51)}{2} = 52,945$  m

$$\lambda_{\max} = 1.80 - \left[ 0.9 \times \frac{L-30}{50} \right] = 1.80 + \left[ 0.9 \times \frac{52.945-30}{50} \right] = 2.213$$

- En travée centrale :  $L = L_{t \text{ centrale}} = 60.51 \text{ m}$

$$\lambda_{\max} = 2.0$$

#### f) Calcul de Coefficient $\lambda$

$\lambda$  est calculé à partir de l'équation 9.9 de l'EN 1993-2 [6].

$$\lambda = \prod_{i=1}^4 \lambda_i = \lambda_1 \times \lambda_2 \times \lambda_3 \times \lambda_4$$

- En travée de rive :

$$\lambda = 1.879 < \lambda_{\max} = 2.0 \quad \text{OK.}$$

- Sur appui intermédiaire :

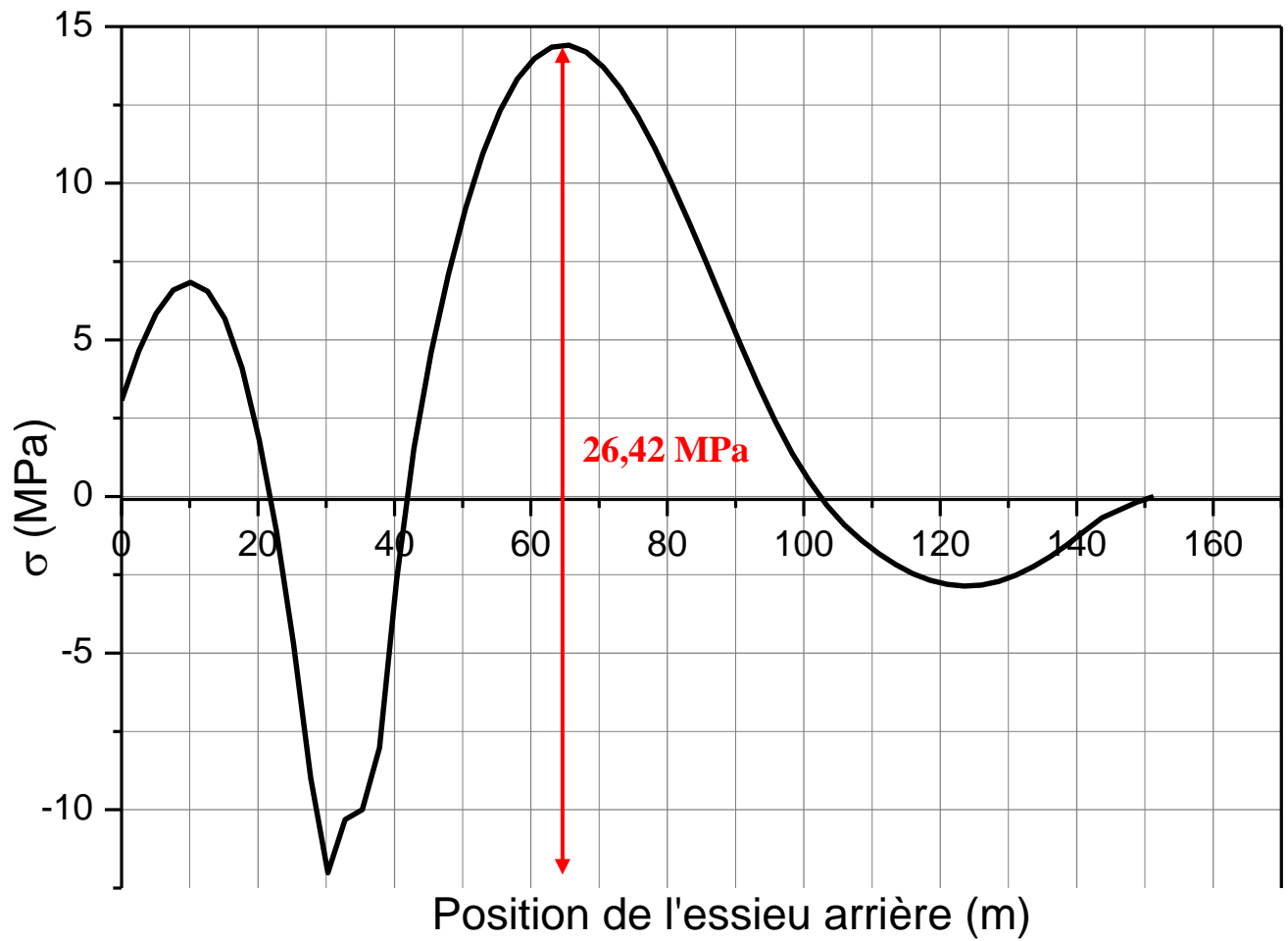
$$\lambda = 1.648 < \lambda_{\max} = 2.213 \quad \text{OK.}$$

- En travée centrale :

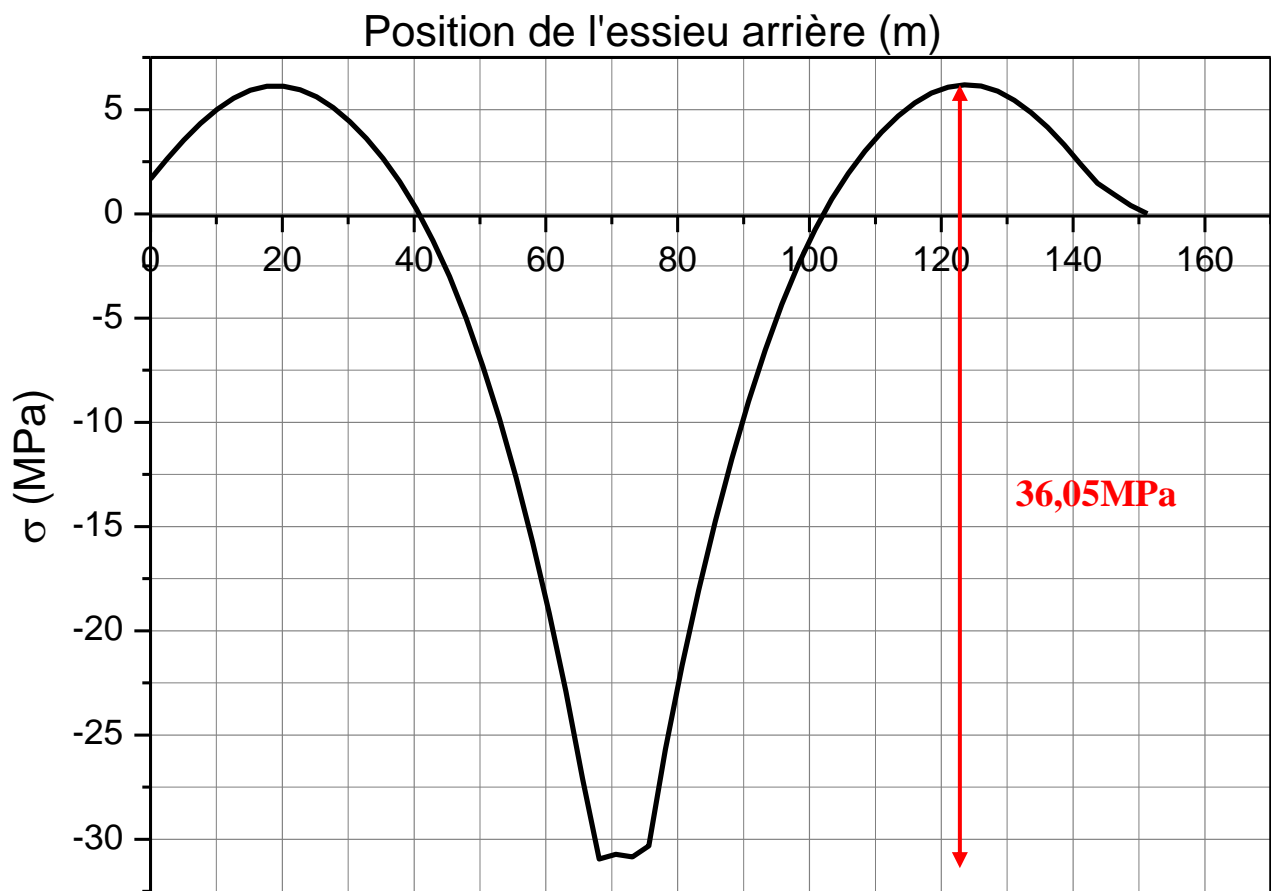
$$\lambda = 1.751 < \lambda_{\max} = 2.0 \quad \text{OK.}$$

## **Annexe C**

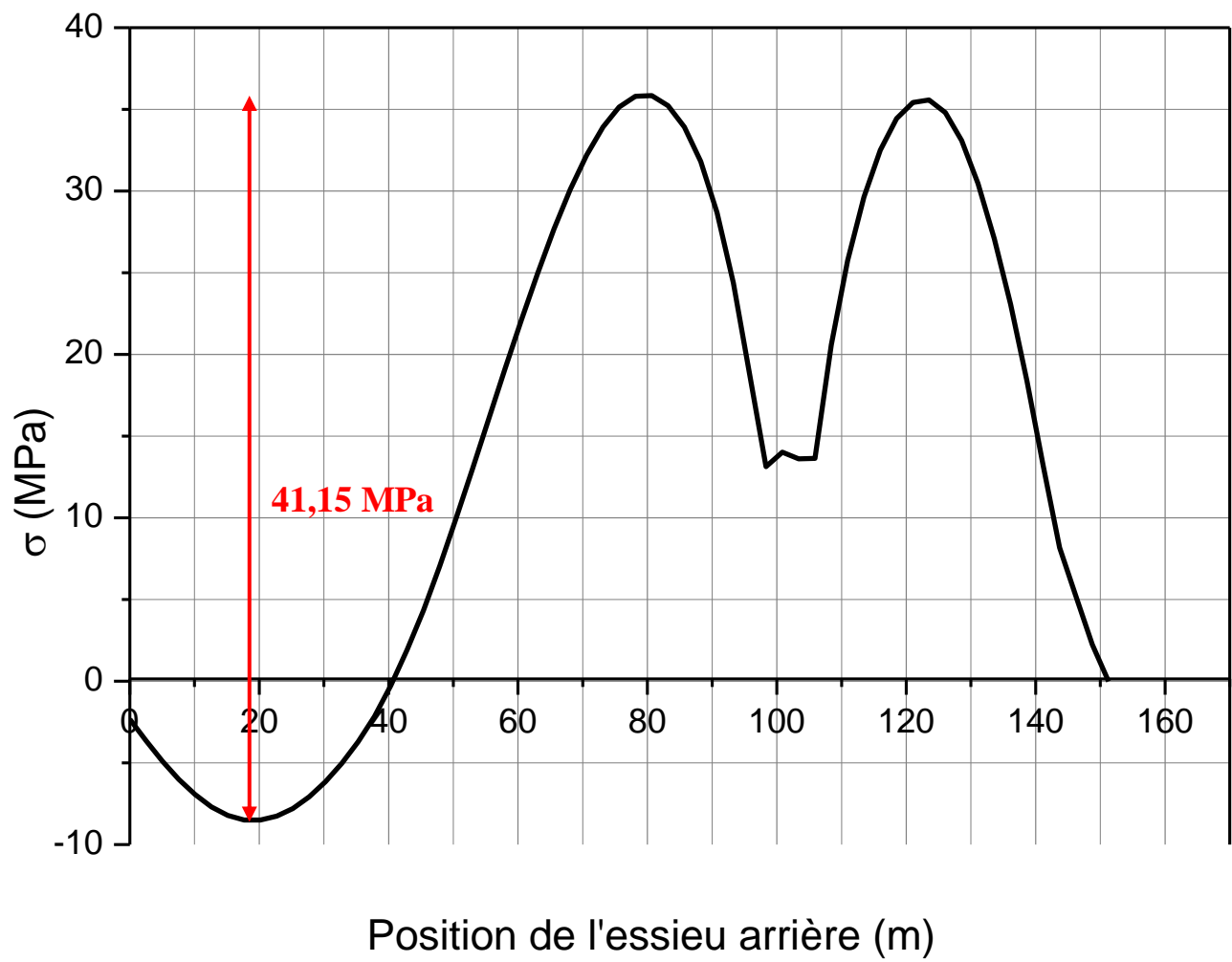
### **Courbes de variation des contraintes $\sigma$ et $\tau$ sous FLM3**



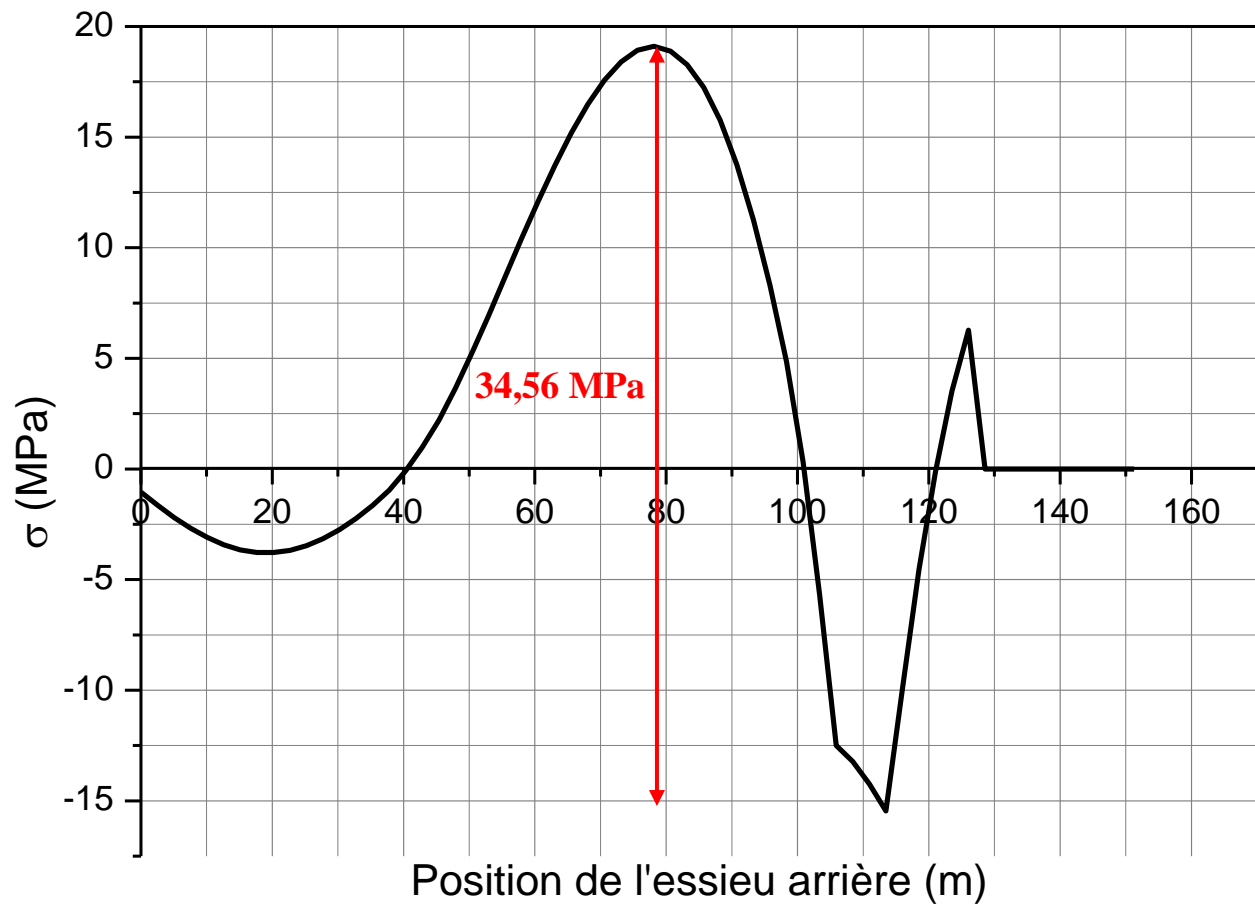
**Figure C.1.** Variation de la contrainte  $\sigma$  sous FLM3 dans la section  $x = 37.43$  m



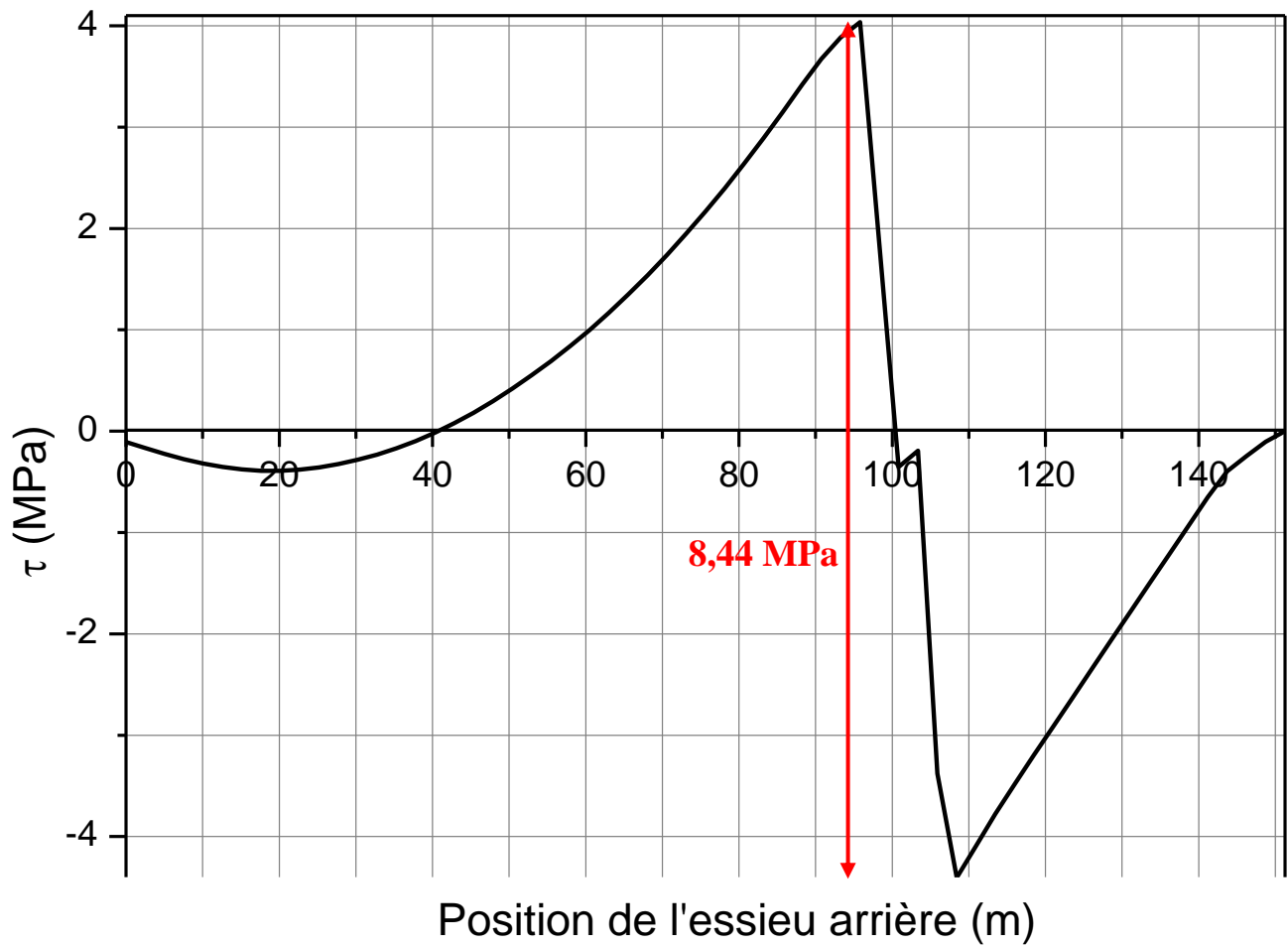
**Figure C.2.** Variation de la contrainte  $\sigma$  sous FLM3 dans la section  $x = 75.635$  m



**Figure C.3.** Variation de la contrainte  $\sigma$  sous FLM3 dans la section  $x = 105.89$  m

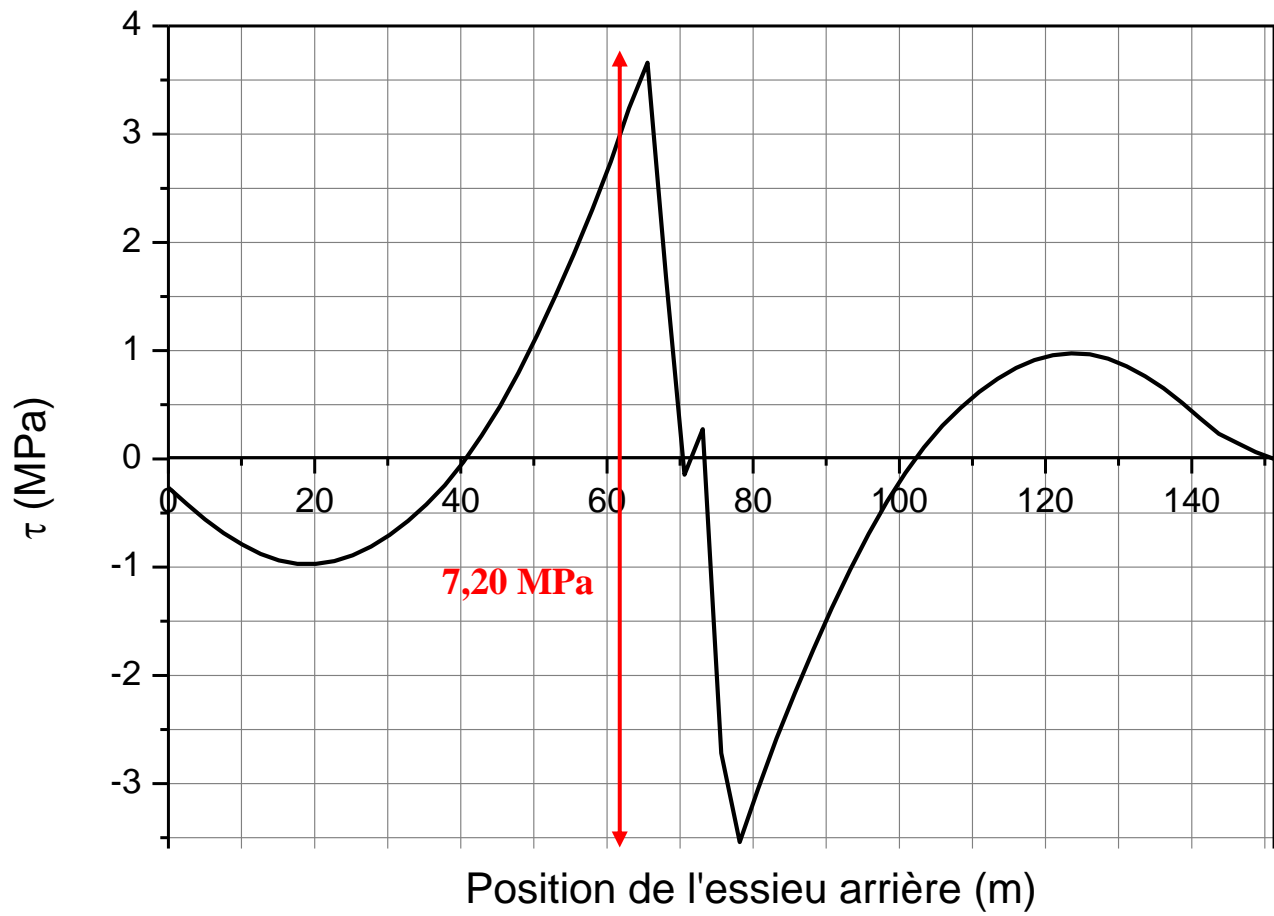


**Figure C.4.** Variation de la contrainte  $\sigma$  sous FLM3 dans la section  $x = 106.94$  m



**Figure C.5.** Variation de  $\tau$  sous FLM3 dans la section  $x = 105.89$  m

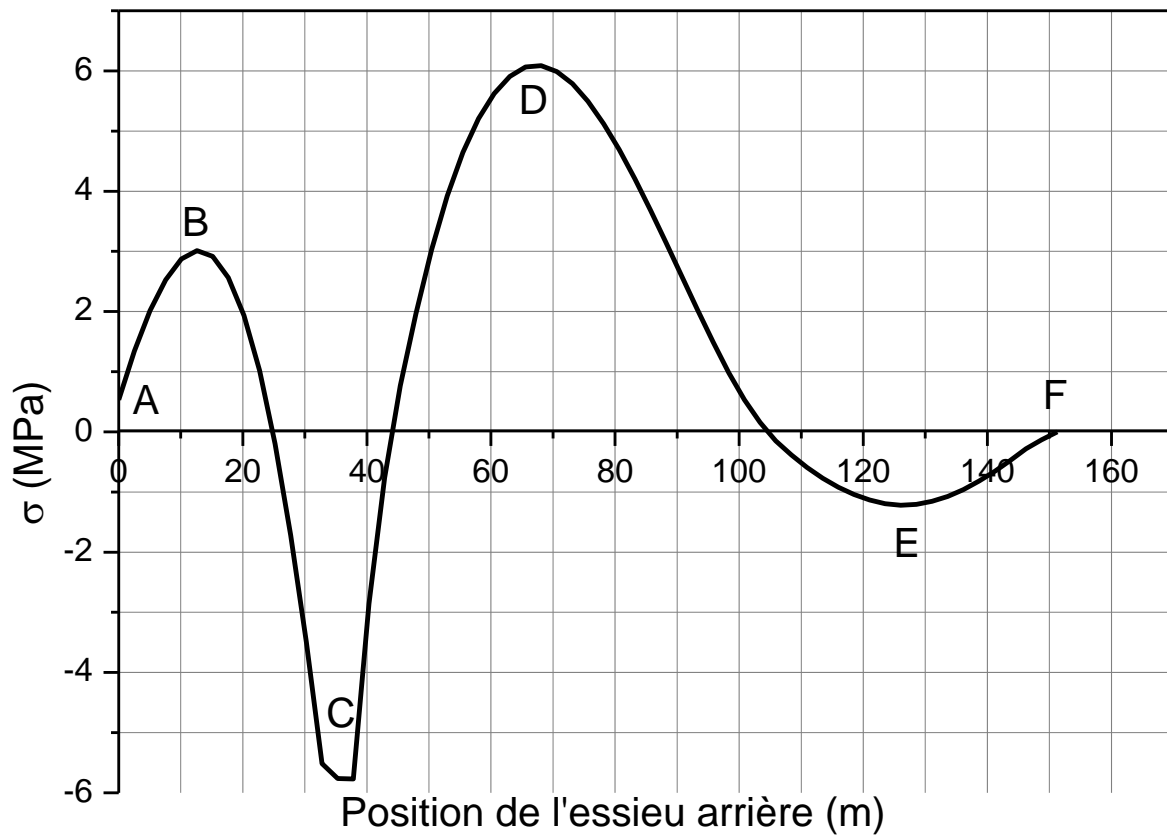




**Figure C.6.** Variation de  $\tau$  sous FLM3 dans la section  $x = 75.635$  m

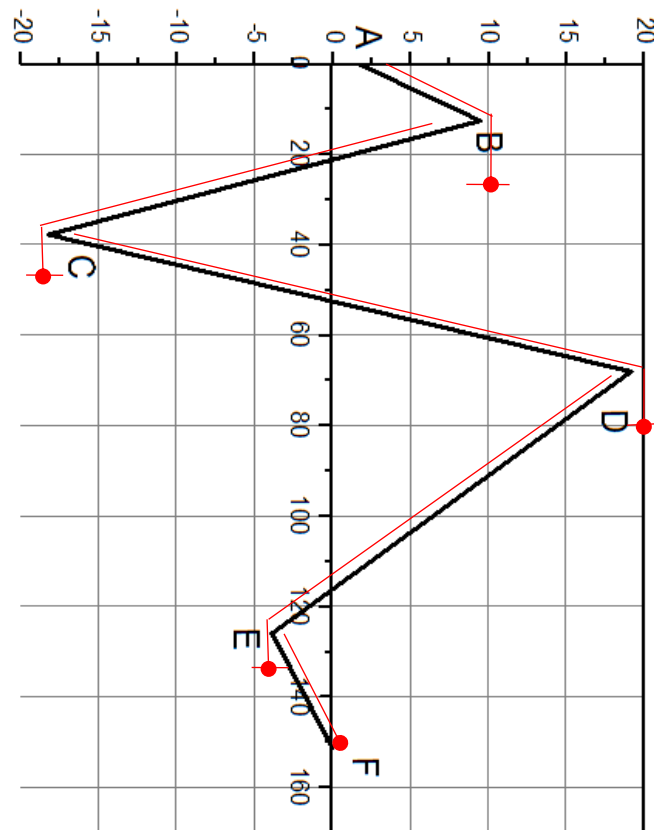
## **Annexe D**

### **Courbes de variation des contraintes $\sigma$ et $\sigma_p$ sous FLM4**



**Figure D.1.** Variation de la contrainte  $\sigma$  sous camion A du convoi FLM4 dans la section  $x = 37.43$  m

La figure D.2, illustre le comptage des cycles par la méthode de la goutte d'eau (Voir chapitre 1 § 1.2.2.2).

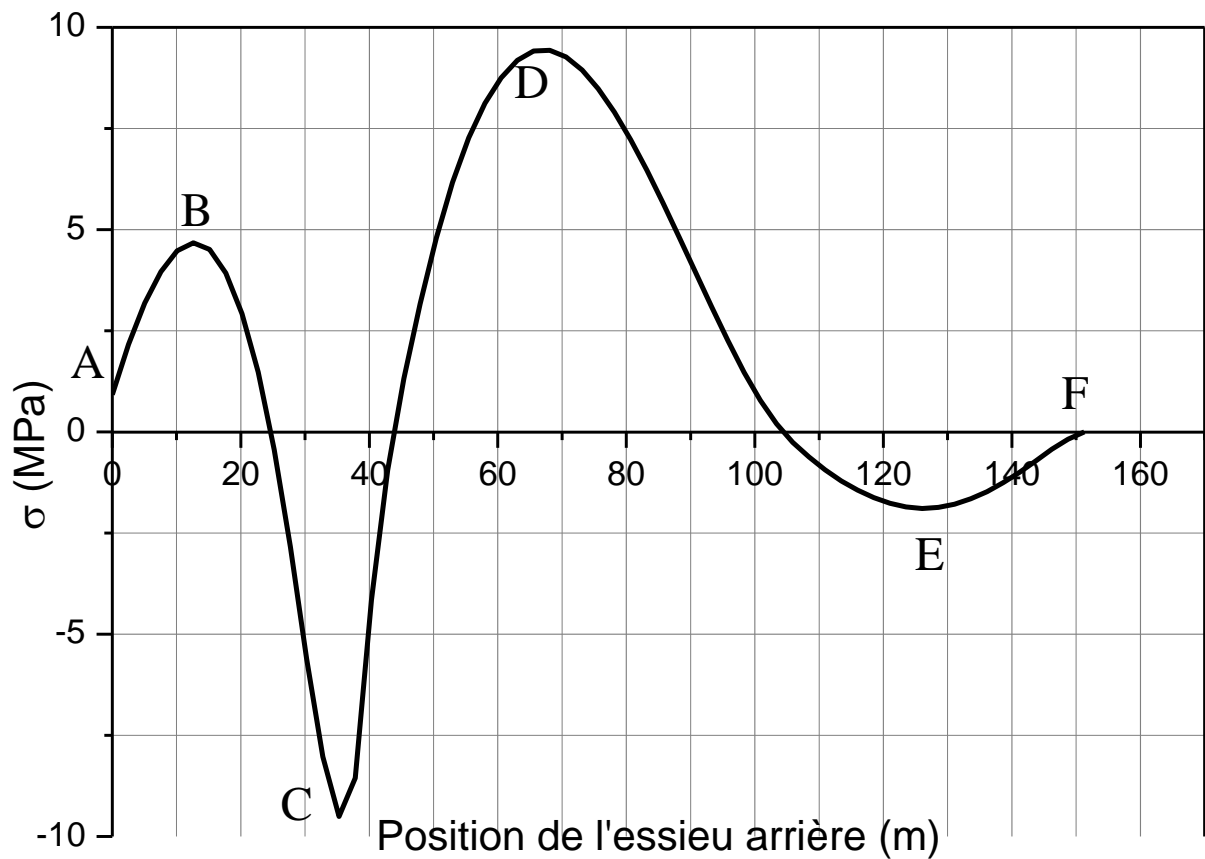


**Figure D.2.** Comptage des cycles sous camion A du convoi FLM4 dans la section  $x = 37.43$  m

Les différents cycles comptés sont illustrés dans le tableau D.1.

**Tableau D.1.** Comptage des cycles et étendus des contraintes  $\sigma$  sous camion A du convoi FLM4 dans la section  $x = 37.43$  m

| Trajet               | A-D         | B-C         | D-E         | E-F         |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $\Delta\sigma$ (MPa) | 2,479935691 | 8,784983153 | 7,306974532 | 1,219596071 |
| Cycle                | 1/2         | 1/2         | 1/2         | 1/2         |

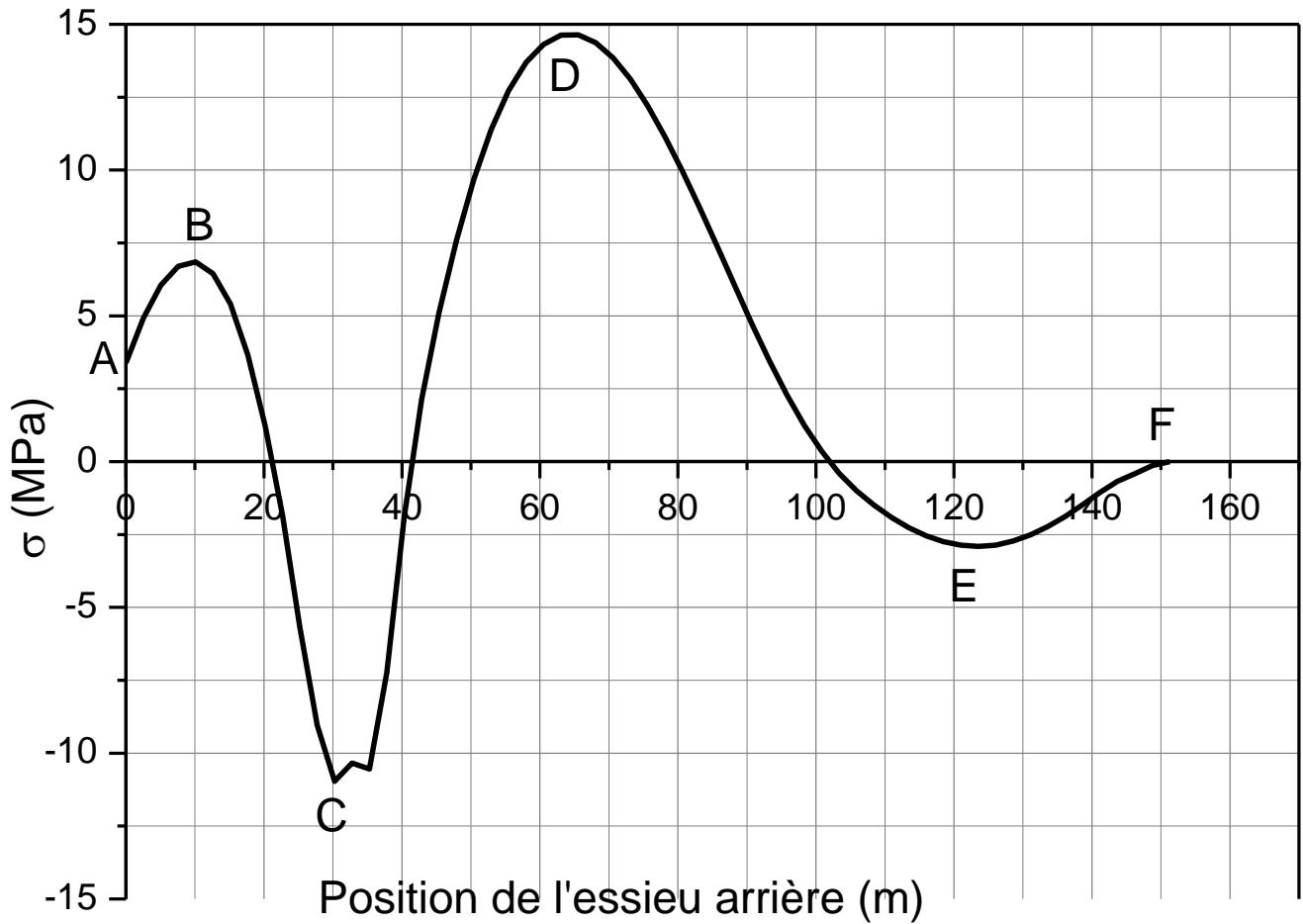


**Figure D.3.** Variation de la contrainte  $\sigma$  sous camion B du convoi FLM4 dans la section  $x = 37.43$  m

La courbe permettant le comptage des cycles est similaire à celle obtenue pour le camion A

**Tableau D.2.** Comptage des cycles et étendus des contraintes  $\sigma$  sous camion B du convoi FLM4 dans la section  $x = 37.43$  m

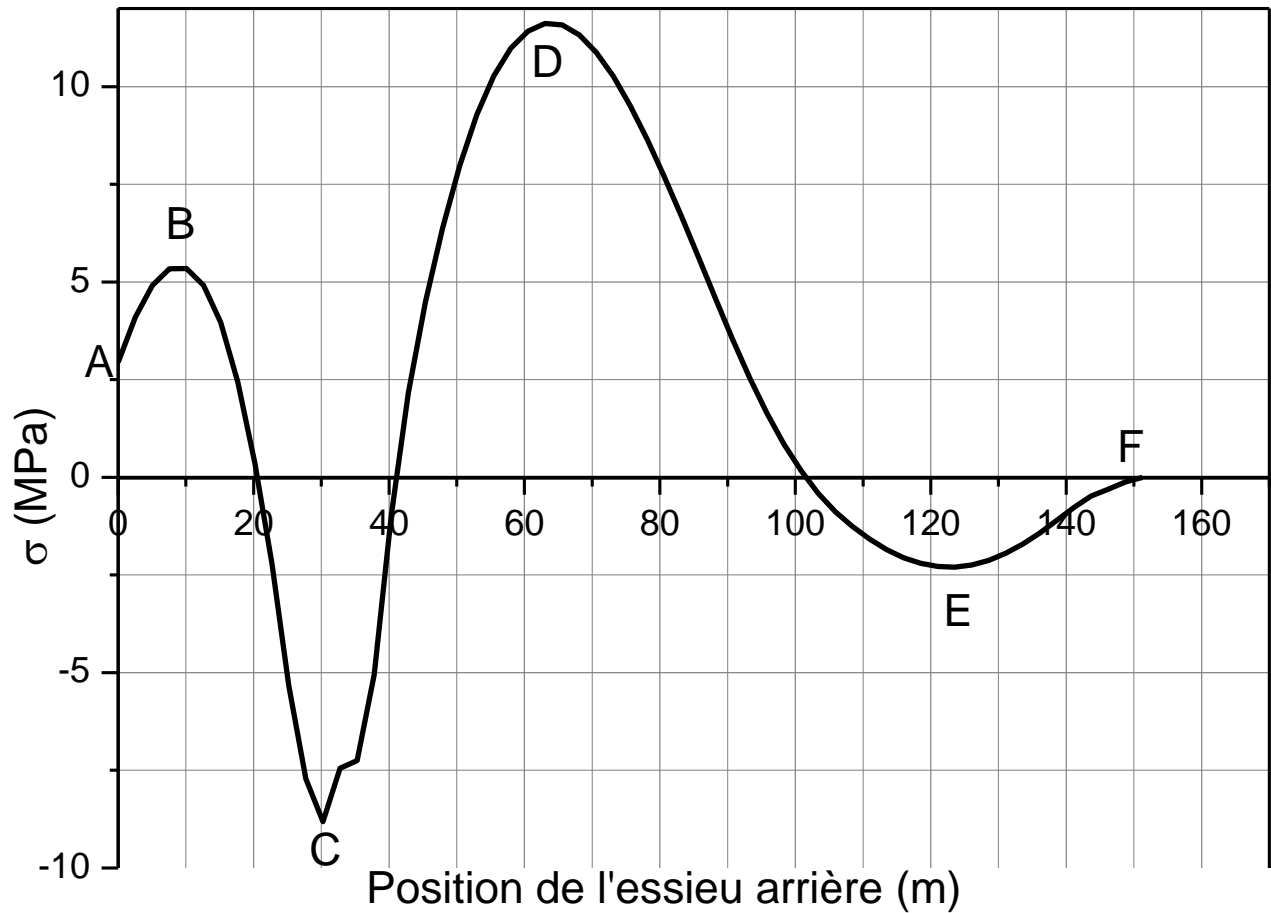
| Trajet               | A-D         | B-C         | D-E         | E-F         |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $\Delta\sigma$ (MPa) | 3,753992896 | 17,39182722 | 17,54850536 | 2,906580386 |
| Cycle                | 1/2         | 1/2         | 1/2         | 1/2         |



**Figure D.4.** Variation de la contrainte  $\sigma$  sous camion C du convoi FLM4 dans la section  $x = 37.43$  m

**Tableau D.3.** Comptage des cycles et étendus des contraintes  $\sigma$  sous camion C du convoi FLM4 dans la section  $x = 37.43$  m

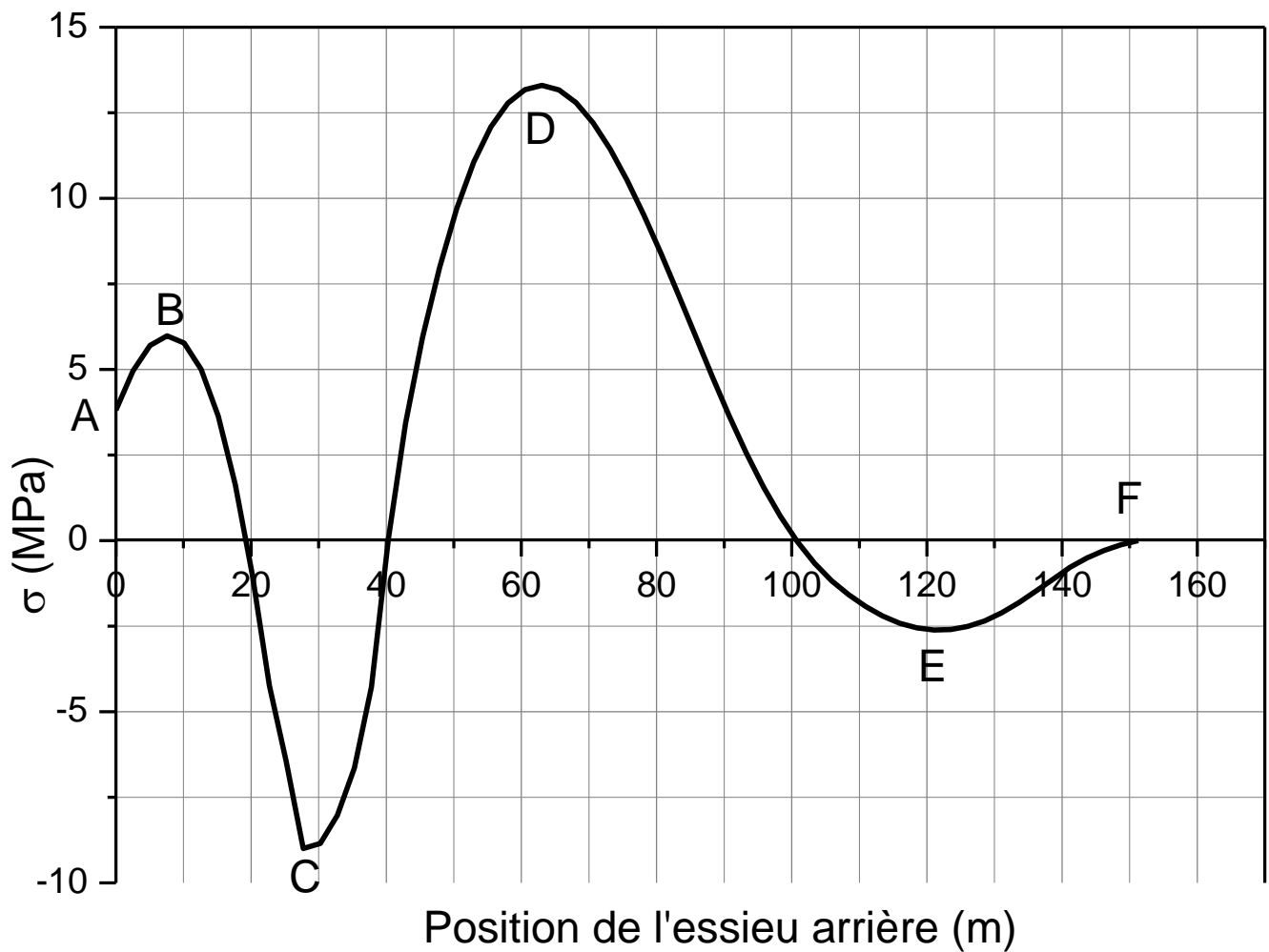
| Trajet               | A-D         | B-C         | D-E         | E-F         |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $\Delta\sigma$ (MPa) | 3,461017025 | 17,39182722 | 17,54850536 | 2,906580386 |
| Cycle                | 1/2         | 1/2         | 1/2         | 1/2         |



**Figure D.5.** Variation de la contrainte  $\sigma$  sous camion D du convoi FLM4 dans la section  $x = 37.43$  m

**Tableau D.4.** Comptage des cycles et étendus des contraintes  $\sigma$  sous camion D du convoi FLM4 dans la section  $x = 37.43$  m

| Trajet               | A-D         | B-C         | D-E         | E-F         |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $\Delta\sigma$ (MPa) | 2,403100938 | 14,15892741 | 13,91345062 | 2,297156862 |
| Cycle                | 1/2         | 1/2         | 1/2         | 1/2         |

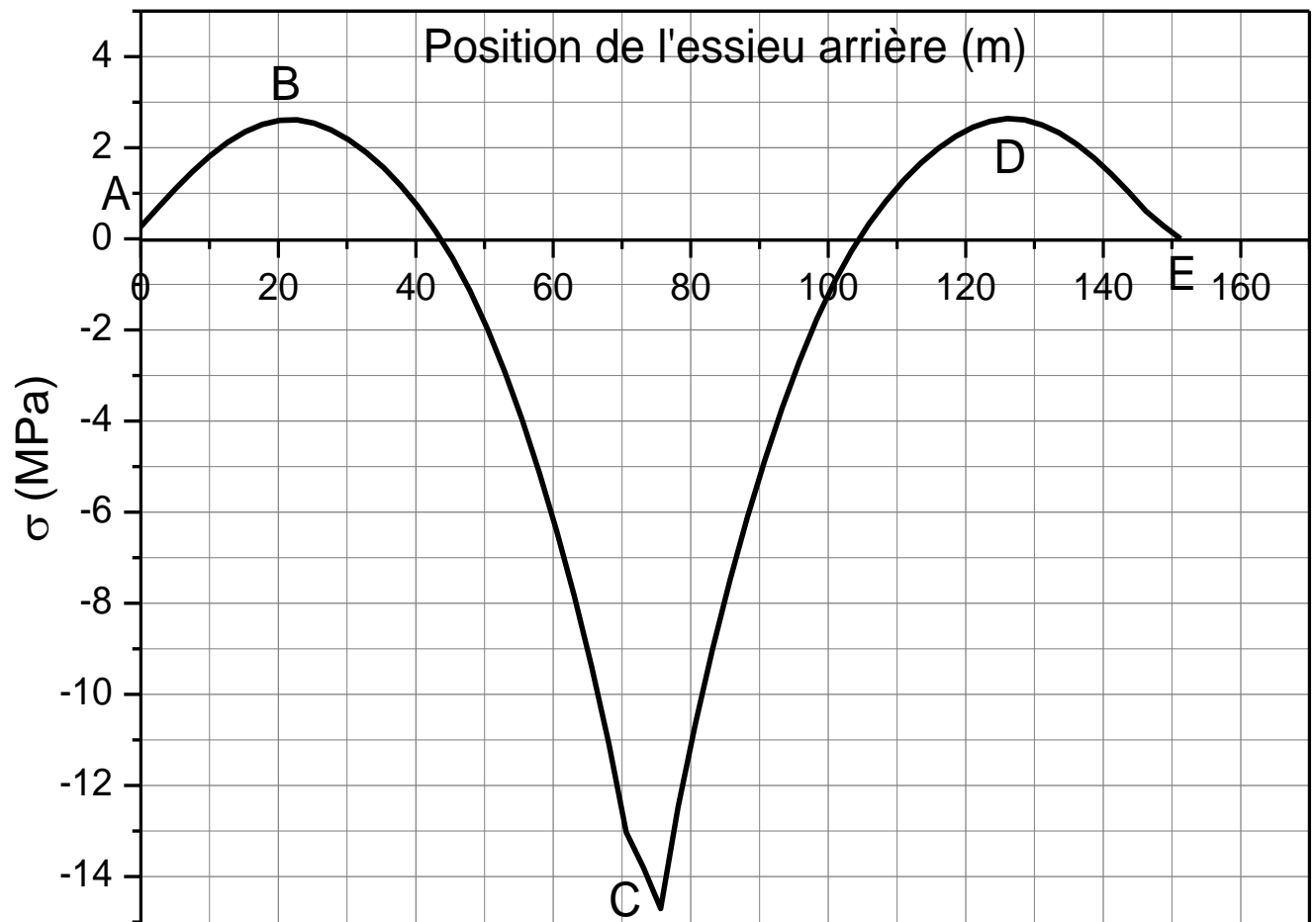


**Figure D.6.** Variation de la contrainte  $\sigma$  sous camion E du convoi FLM4 dans la section  $x = 37.43$  m

**Tableau D.5.** Comptage des cycles et étendus des contraintes  $\sigma$  sous camion E du convoi FLM4 dans la section  $x = 37.43$  m

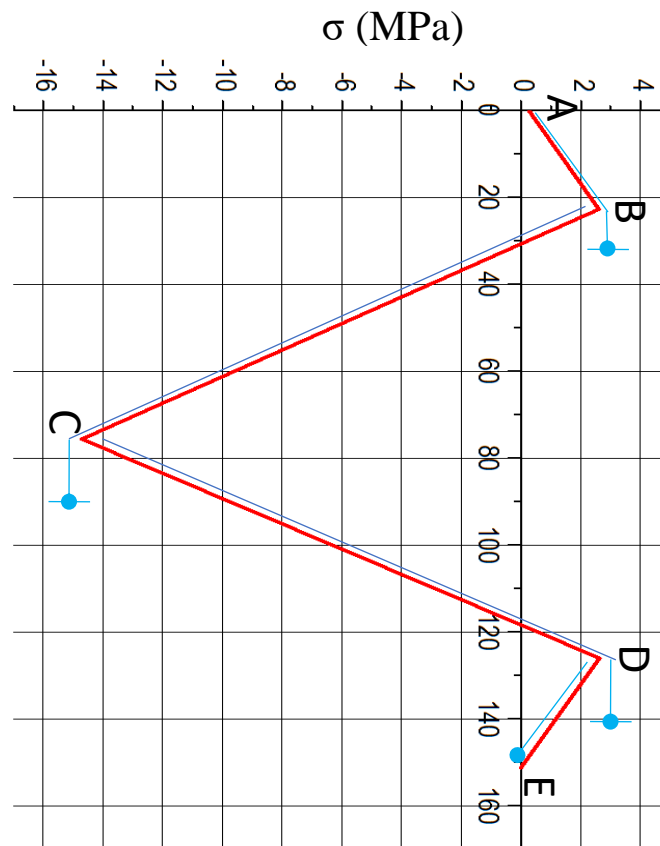
| Trajet               | A-D         | B-C         | D-E         | E-F         |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $\Delta\sigma$ (MPa) | 2,403100938 | 14,15892741 | 13,91345062 | 2,297156862 |
| Cycle                | 1/2         | 1/2         | 1/2         | 1/2         |





**Figure D.7.** Variation de la contrainte  $\sigma$  sous camion A du convoi FLM4 dans la section  $x = 75.635$  m

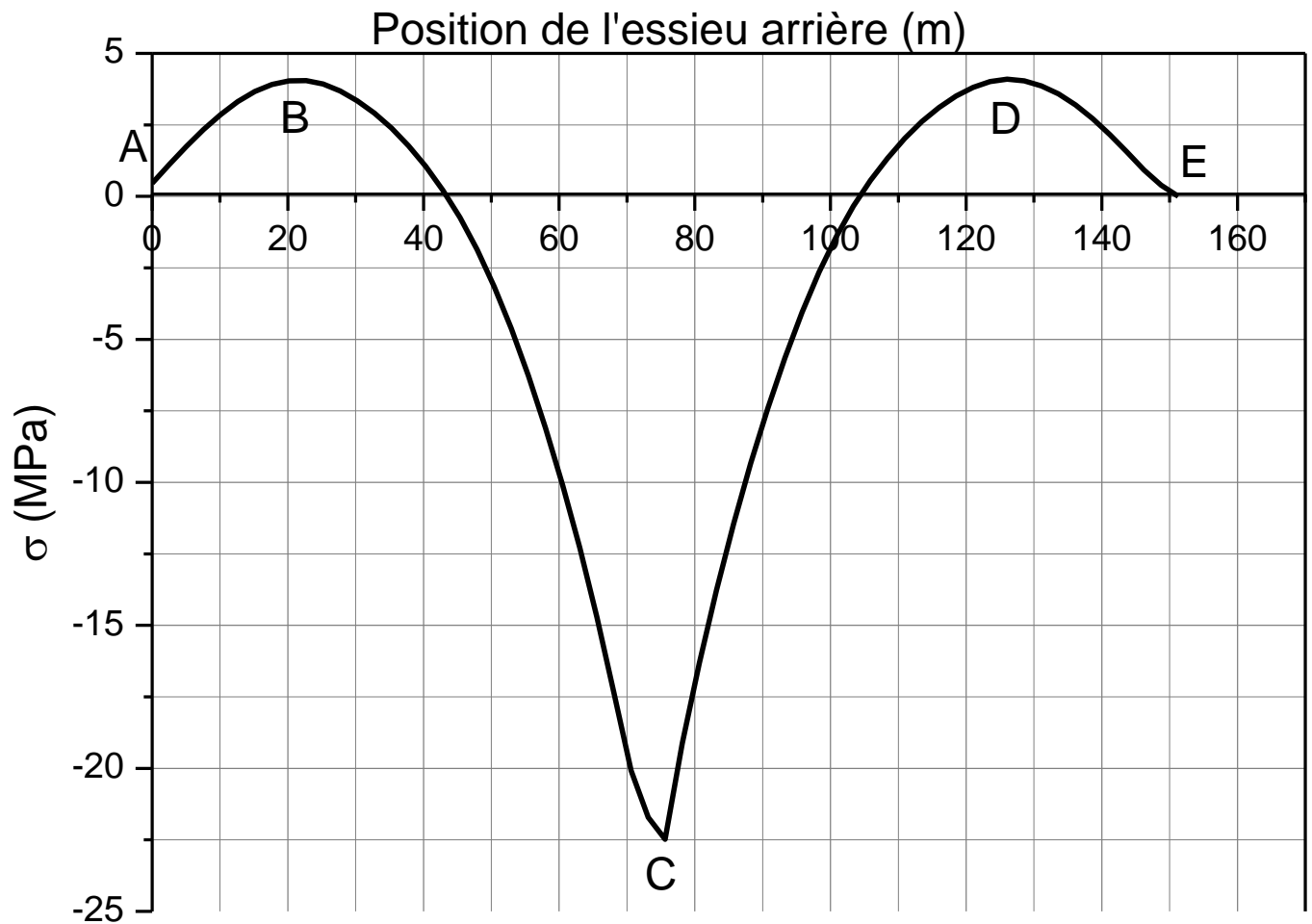
Le comptage des cycles est illustré dans la figure D.8.



**Figure D.8.** Comptage des cycles sous camion A du convoi FLM4 dans la section  $x = 75.635$  m

**Tableau D.6.** Comptage des cycles et étendus des contraintes  $\sigma$  sous camion A convoi FLM4 dans la section  $x = 75.635$  m

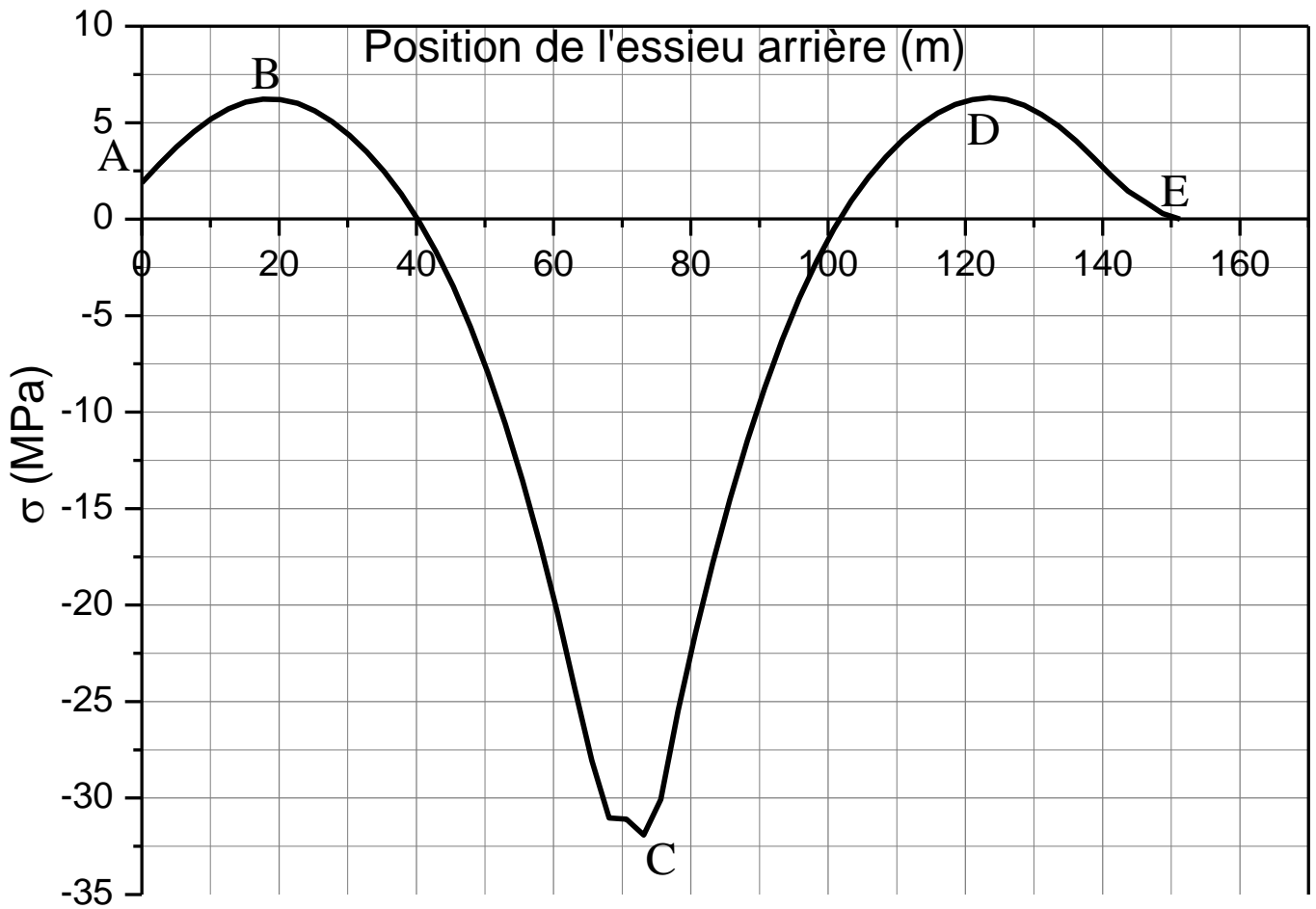
| Trajet               | A-D         | B-C         | D-E         |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|
| $\Delta\sigma$ (MPa) | 2,343881989 | 17,31717738 | 2,639284008 |
| Cycle                | 1/2         | 1           | 1/2         |



**Figure D.9.** Variation de la contrainte  $\sigma$  sous camion B du convoi FLM4 dans la section  $x = 75.635$  m

**Tableau D.7.** Comptage des cycles et étendus des contraintes  $\sigma$  sous camion B convoi FLM4 dans la section  $x = 75.635$  m

| Trajet               | A-D         | B-C         | D-E         |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|
| $\Delta\sigma$ (MPa) | 3,591766335 | 26,52637965 | 4,094769361 |
| Cycle                | 1/2         | 1           | 1/2         |



**Figure D.10.** Variation de la contrainte  $\sigma$  sous camion C du convoi FLM4 dans la section  $x = 75.635$  m

**Tableau D.8.** Comptage des cycles et étendus des contraintes  $\sigma$  sous camion C convoi FLM4 dans la section  $x = 75.635$  m

| Trajet               | A-D         | B-C         | D-E         |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|
| $\Delta\sigma$ (MPa) | 4,343471821 | 38,14676897 | 6,290179361 |
| Cycle                | 1/2         | 1           | 1/2         |

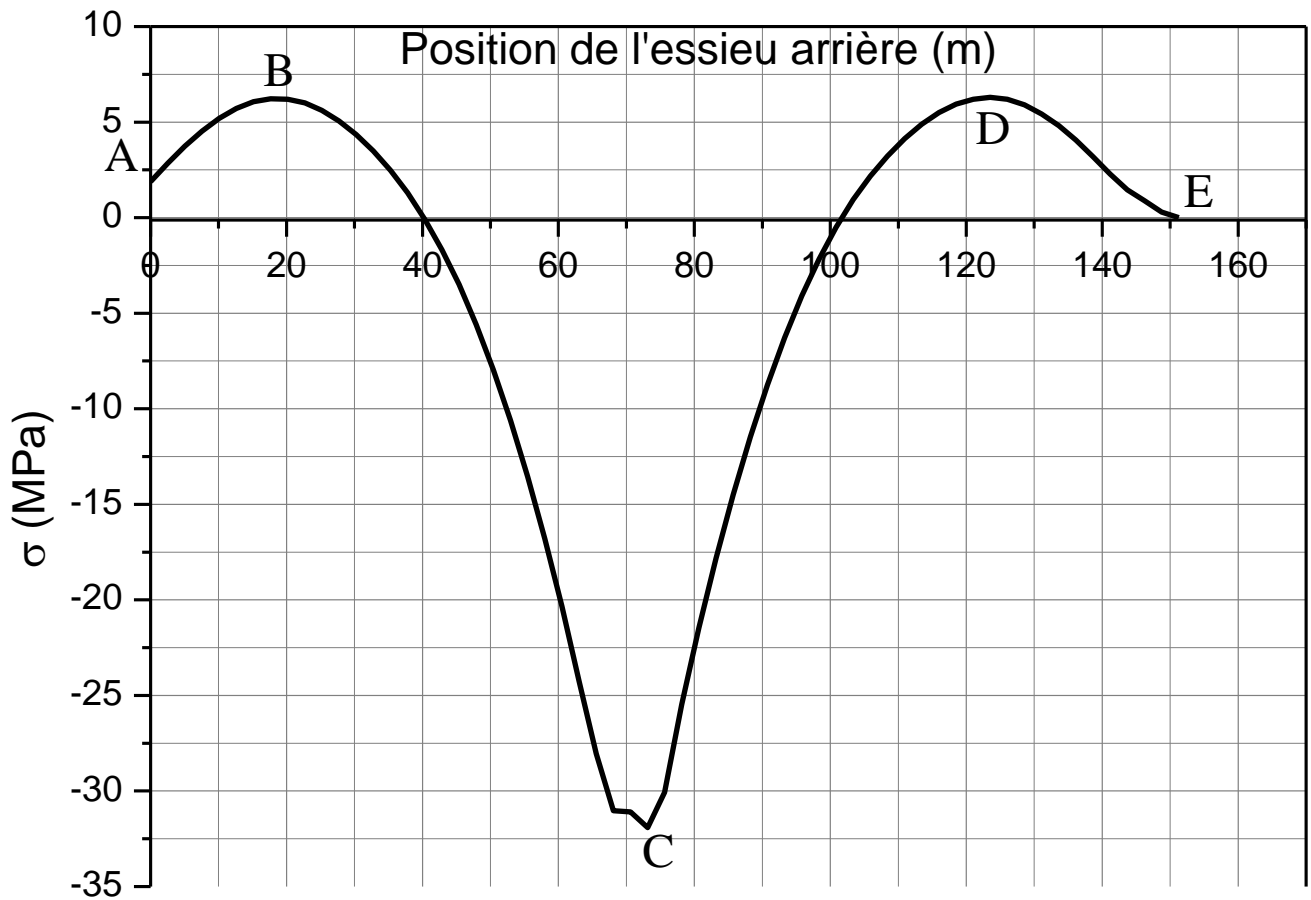
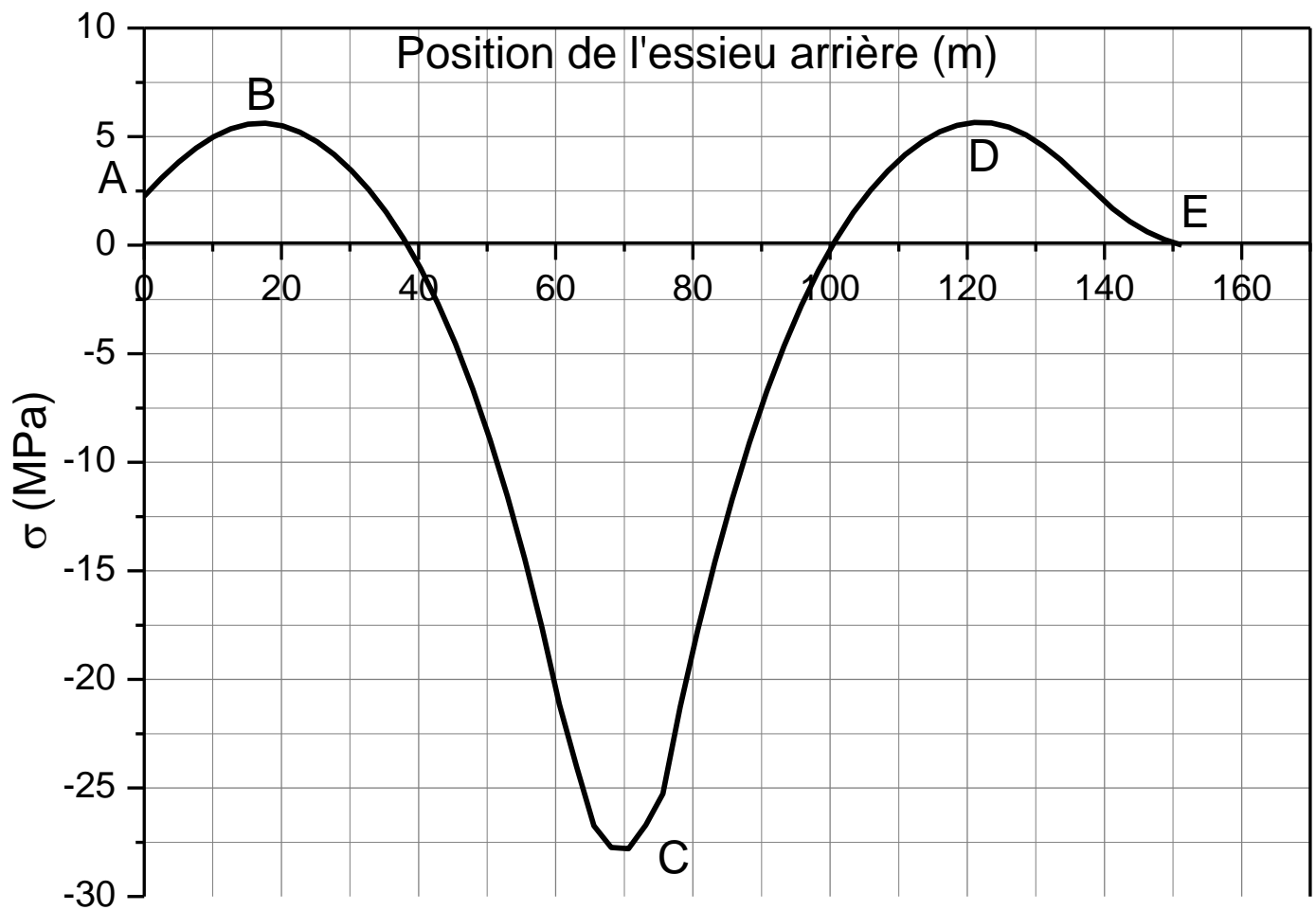


Figure D.11. Variation de la contrainte  $\sigma$  sous camion D du convoi FLM4 dans la section  $x = 75.635$  m

Tableau D.9. Comptage des cycles et étendus des contraintes  $\sigma$  sous camion D convoi FLM4 dans la section  $x = 75.635$  m

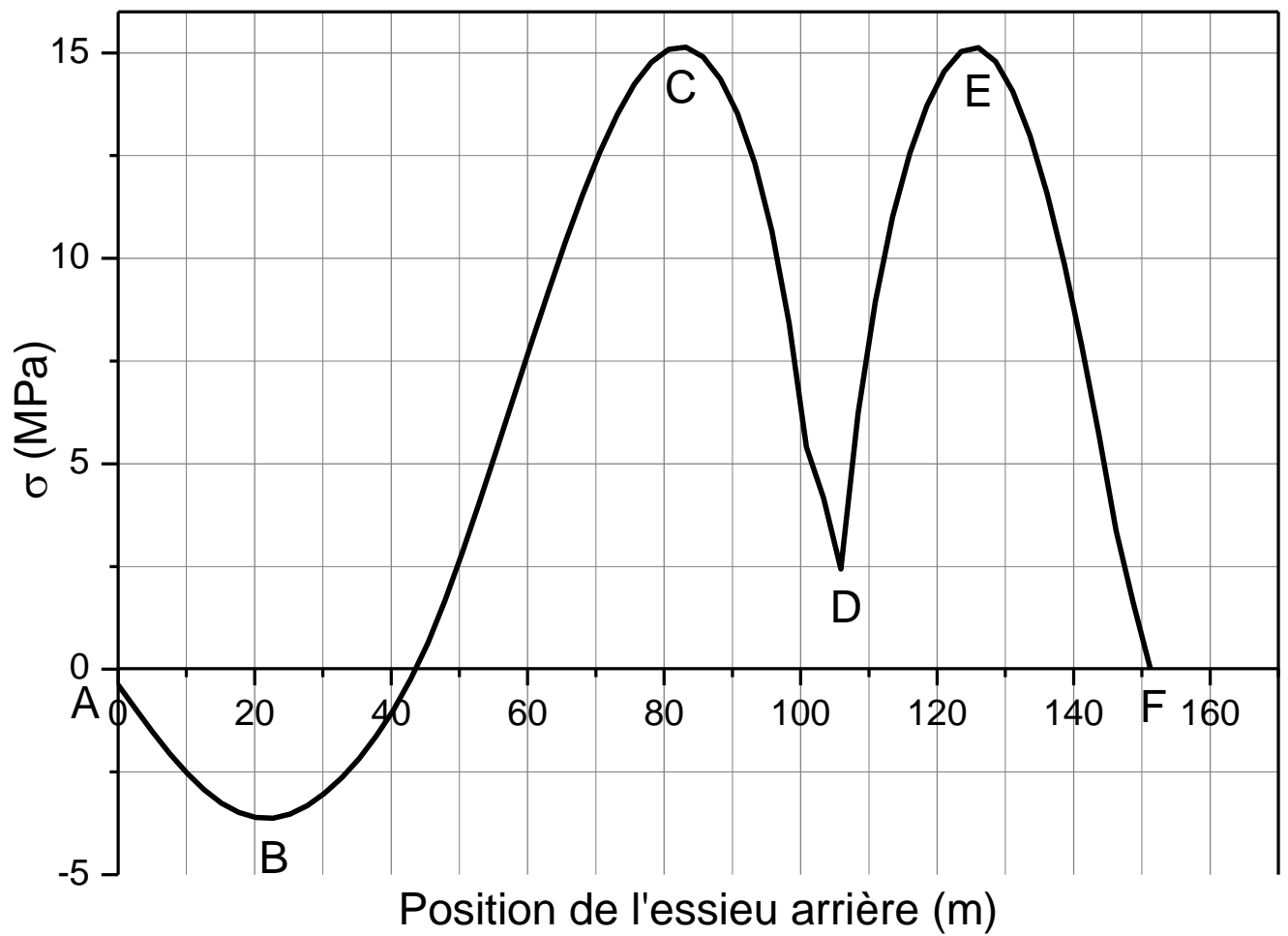
| Trajet               | A-D         | B-C         | D-E         |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|
| $\Delta\sigma$ (MPa) | 4,343471821 | 38,14676897 | 6,290179361 |
| Cycle                | 1/2         | 1           | 1/2         |



**Figure D.12.** Variation de la contrainte  $\sigma$  sous camion E du convoi FLM4 dans la section  $x = 75.635$  m

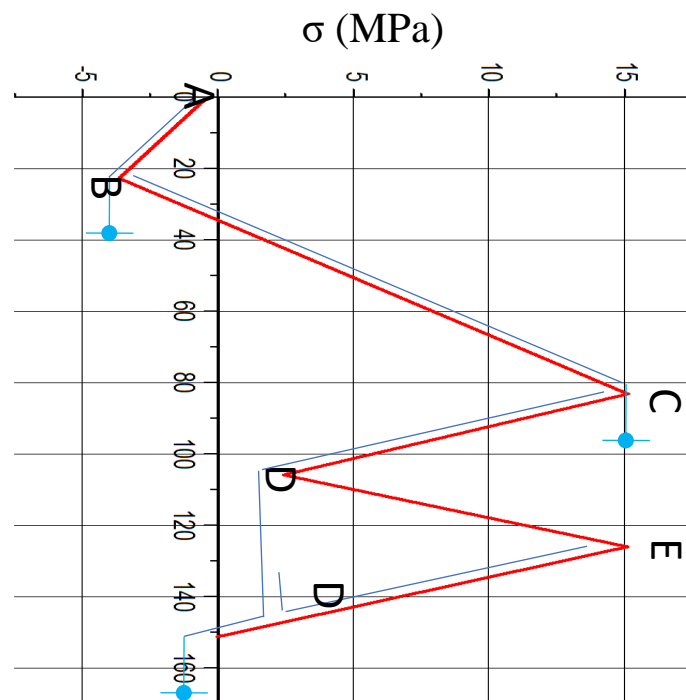
**Tableau D.10.** Comptage des cycles et étendus des contraintes  $\sigma$  sous camion E convoi FLM4 dans la section  $x = 75.635$  m

| Trajet               | A-D         | B-C         | D-E         |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|
| $\Delta\sigma$ (MPa) | 4,343471821 | 38,14676897 | 6,290179361 |
| Cycle                | 1/2         | 1           | 1/2         |



**Figure D.13.** Variation de la contrainte  $\sigma$  sous camion A du convoi FLM4 dans la section  $x = 105.89$  m

Le comptage des cycles est illustré dans la figure D.14 .

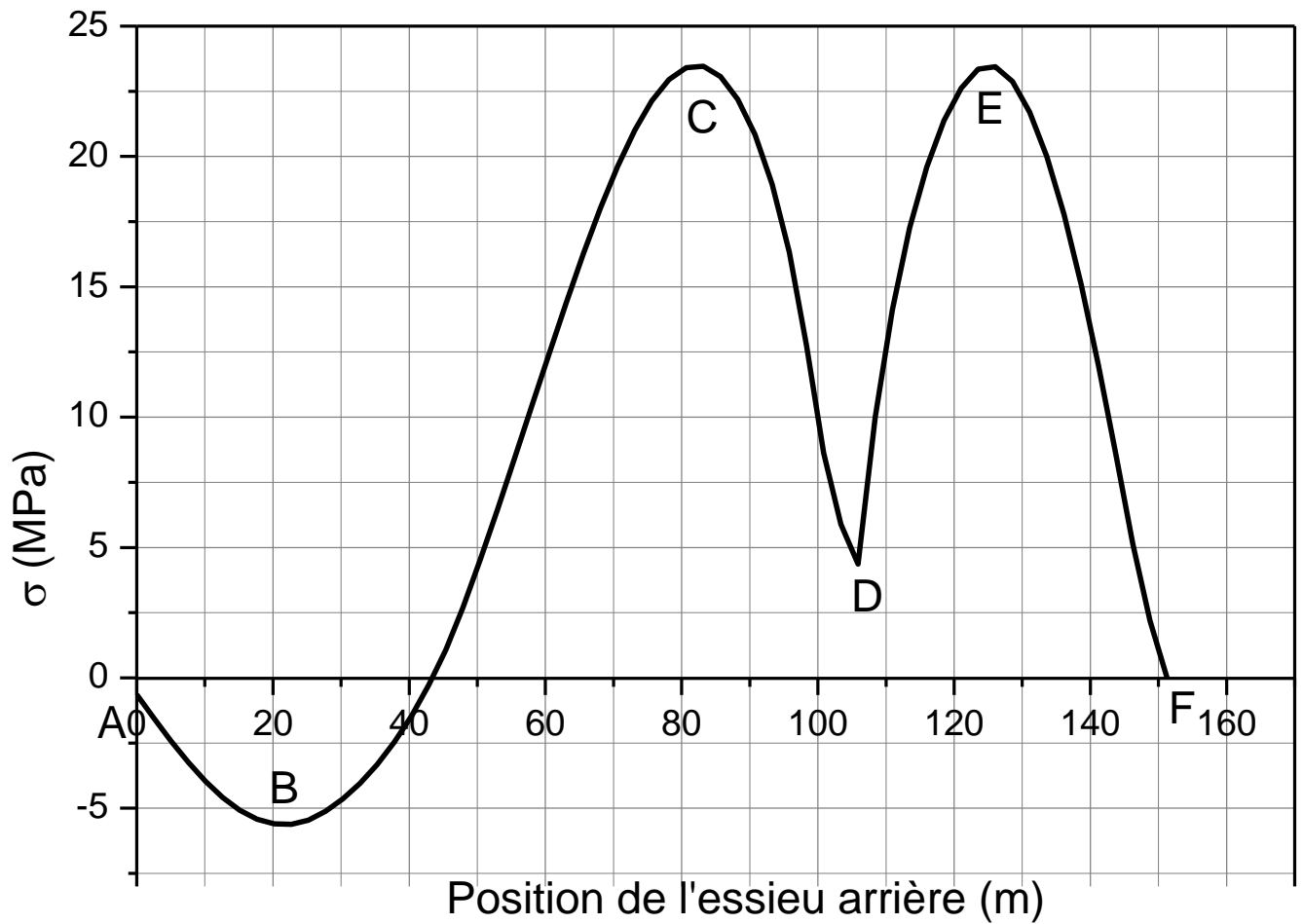


**Figure D.14.** Comptage des cycles sous camion A du convoi FLM4 dans la section  $x = 105.89$  m

**Tableau D.11.** Comptage des cycles et étendus des contraintes  $\sigma$  sous camion A convoi FLM4 dans la section  $x = 105.89$  m

| Trajet               | A-B         | B-C         | D-E         | C-F         |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $\Delta\sigma$ (MPa) | 3,246792886 | 18,76388484 | 12,68745379 | 15,14021046 |
| Cycle                | 1/2         | 1/2         | 1           | 1/2         |

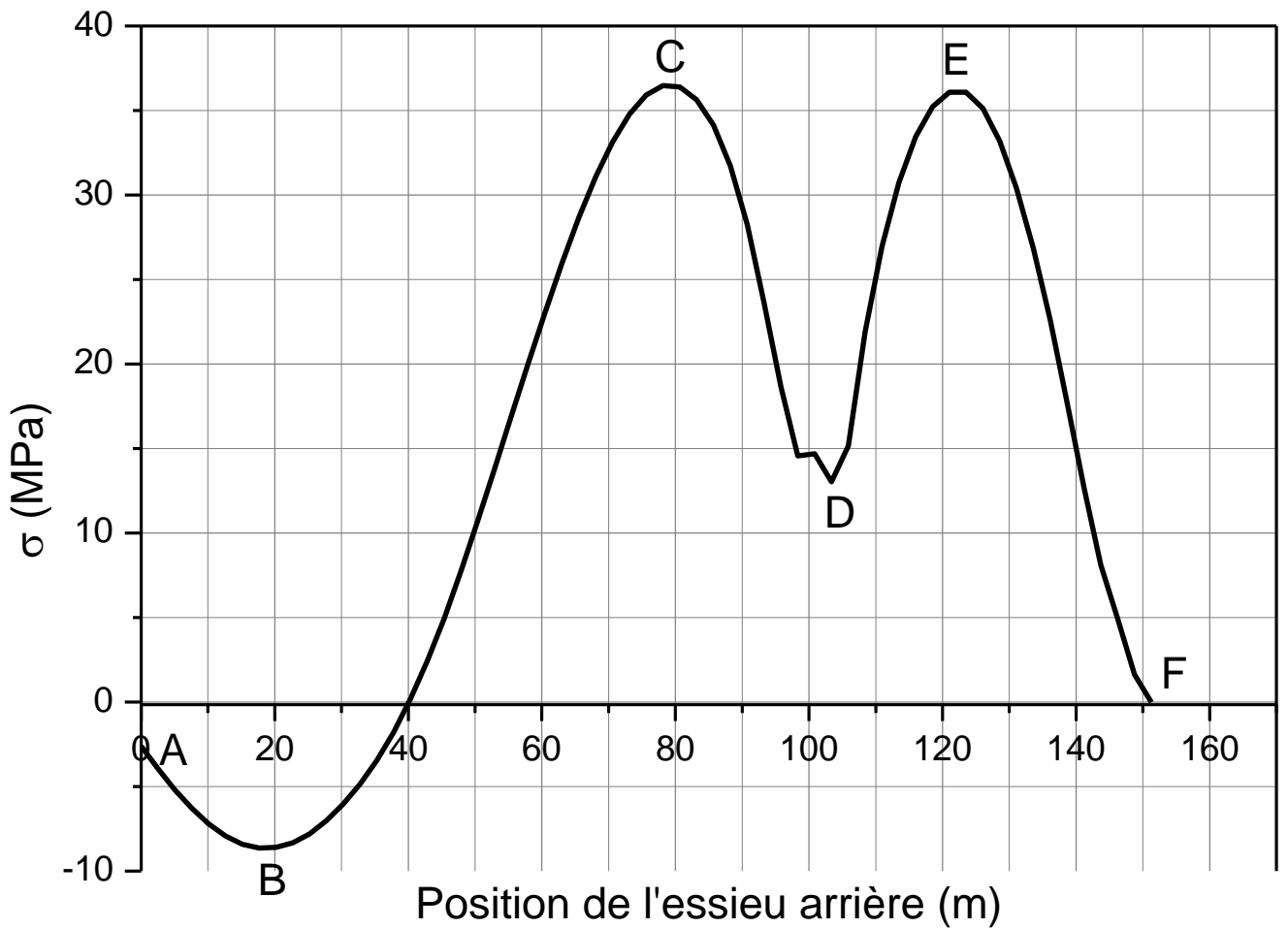




**Figure D.15.** Variation de la contrainte  $\sigma$  sous camion B du convoi FLM4 dans la section  $x = 105.89$  m

**Tableau D.12.** Comptage des cycles et étendus des contraintes  $\sigma$  sous camion B convoi FLM4 dans la section  $x = 105.89$  m

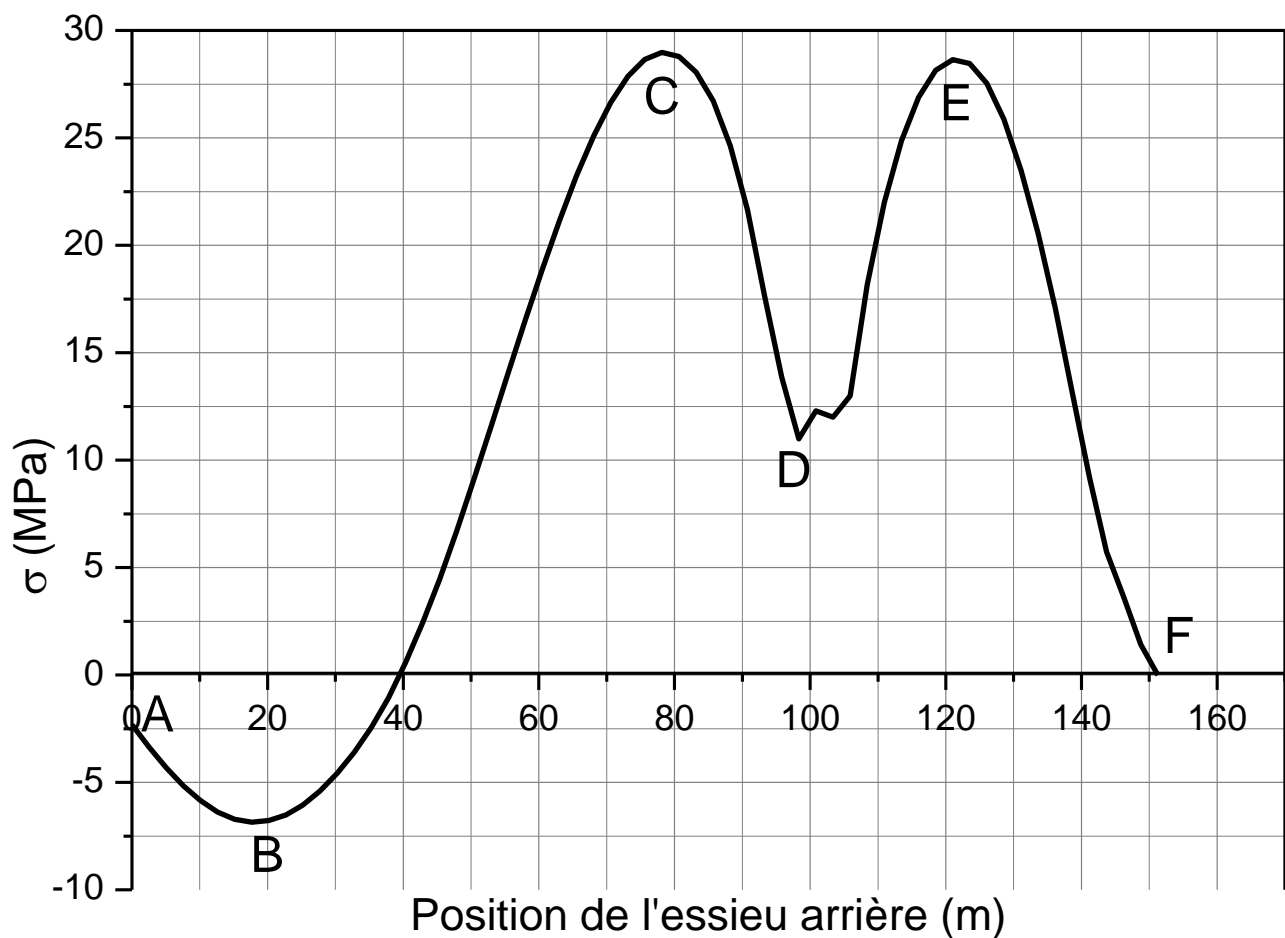
| Trajet               | A-B         | B-C        | D-E         | C-F         |
|----------------------|-------------|------------|-------------|-------------|
| $\Delta\sigma$ (MPa) | 4,976257009 | 29,0758411 | 19,07892174 | 23,46557291 |
| Cycle                | 1/2         | 1/2        | 1           | 1/2         |



**Figure D.16.** Variation de la contrainte  $\sigma$  sous camion C du convoi FLM4 dans la section  $x = 105.89$  m

**Tableau D.13.** Comptage des cycles et étendus des contraintes  $\sigma$  sous camion C convoi FLM4 dans la section  $x = 105.89$  m

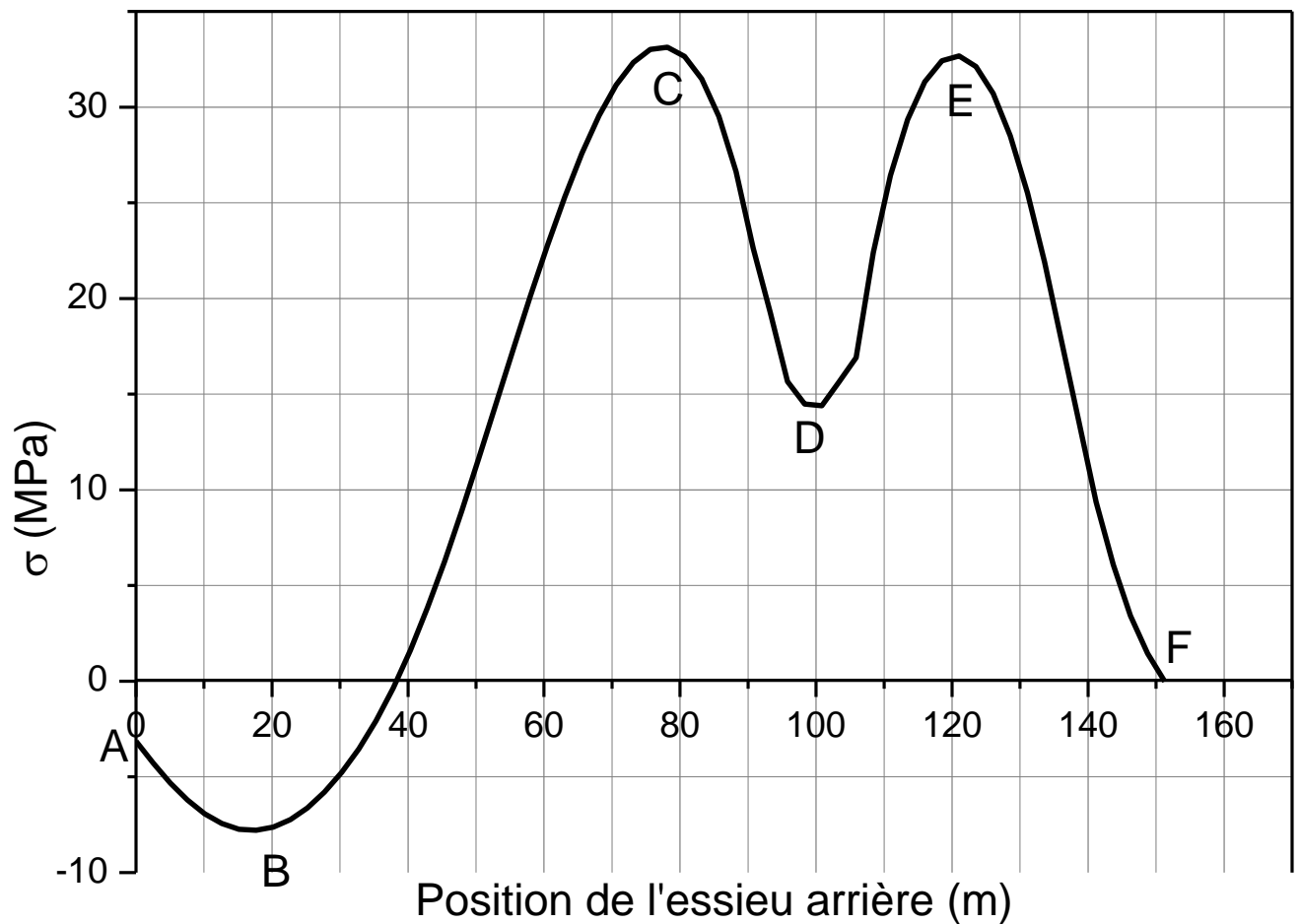
| Trajet               | A-B         | B-C        | D-E         | C-F         |
|----------------------|-------------|------------|-------------|-------------|
| $\Delta\sigma$ (MPa) | 4,976257009 | 29,0758411 | 19,07892174 | 23,46557291 |
| Cycle                | 1/2         | 1/2        | 1           | 1/2         |



**Figure D.17.** Variation de la contrainte  $\sigma$  sous camion D du convoi FLM4 dans la section  $x = 105.89$  m

**Tableau D.14.** Comptage des cycles et étendus des contraintes  $\sigma$  sous camion C convoi FLM4 dans la section  $x = 105.89$  m

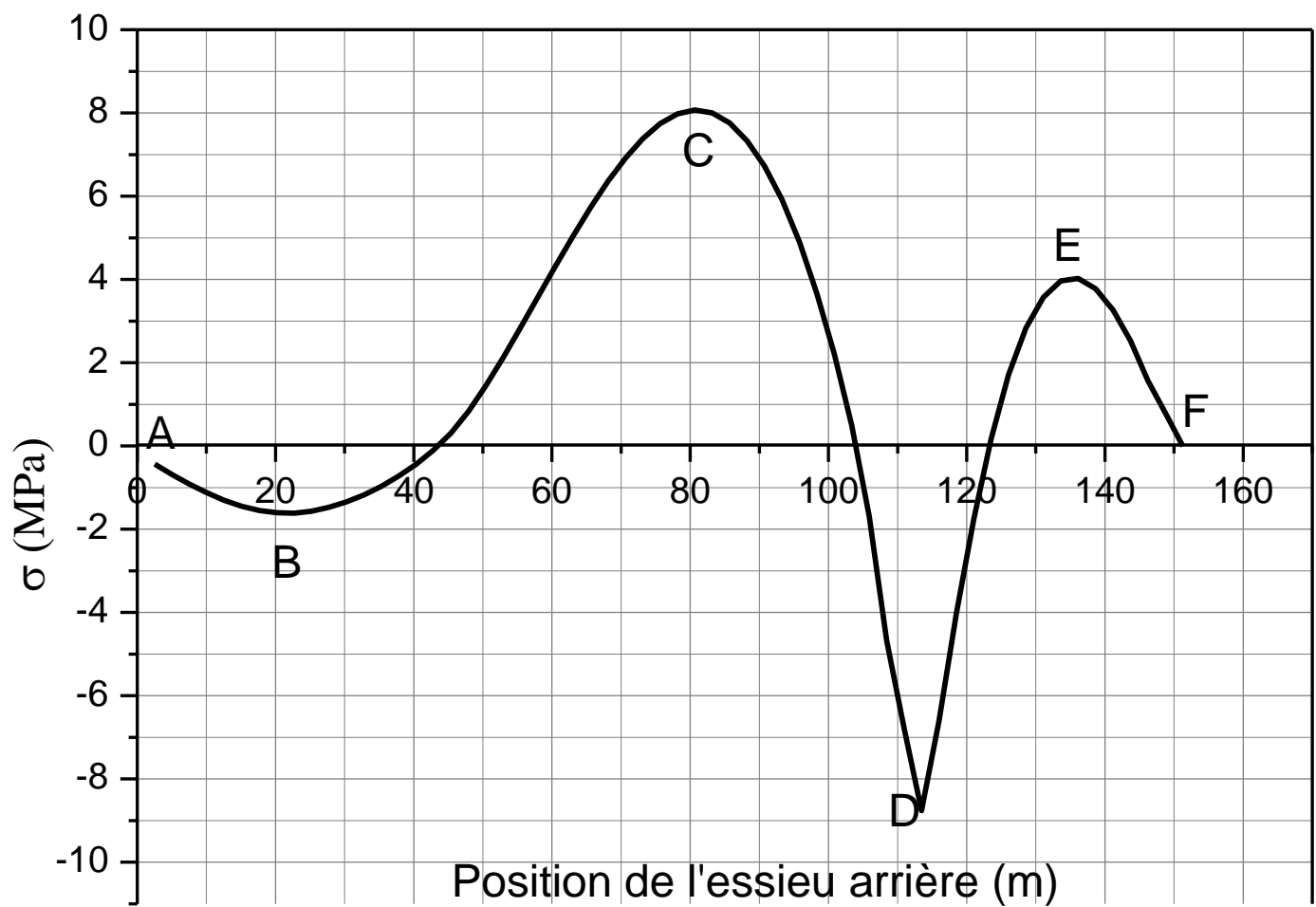
| Trajet               | A-B         | B-C         | D-E         | C-F        |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| $\Delta\sigma$ (MPa) | 4,534437745 | 35,82565733 | 17,64816576 | 28,9868103 |
| Cycle                | 1/2         | 1/2         | 1           | 1/2        |



**Figure D.18.** Variation de la contrainte  $\sigma$  sous camion E du convoi FLM4 dans la section  $x = 105.89$  m

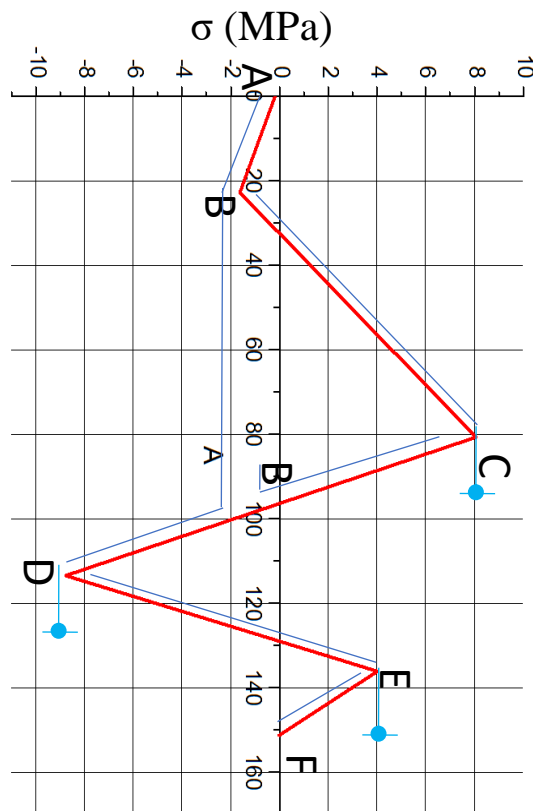
**Tableau D.15.** Comptage des cycles et étendus des contraintes  $\sigma$  sous camion E convoi FLM4 dans la section  $x = 105.89$  m

| Trajet               | A-B         | B-C         | D-E         | C-F         |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $\Delta\sigma$ (MPa) | 4,660991312 | 40,92397192 | 18,27004666 | 33,14576334 |
| Cycle                | 1/2         | 1/2         | 1           | 1/2         |



**Figure D.19.** Variation de la contrainte  $\sigma$  sous camion A du convoi FLM4 dans la section  $x = 106.94$  m

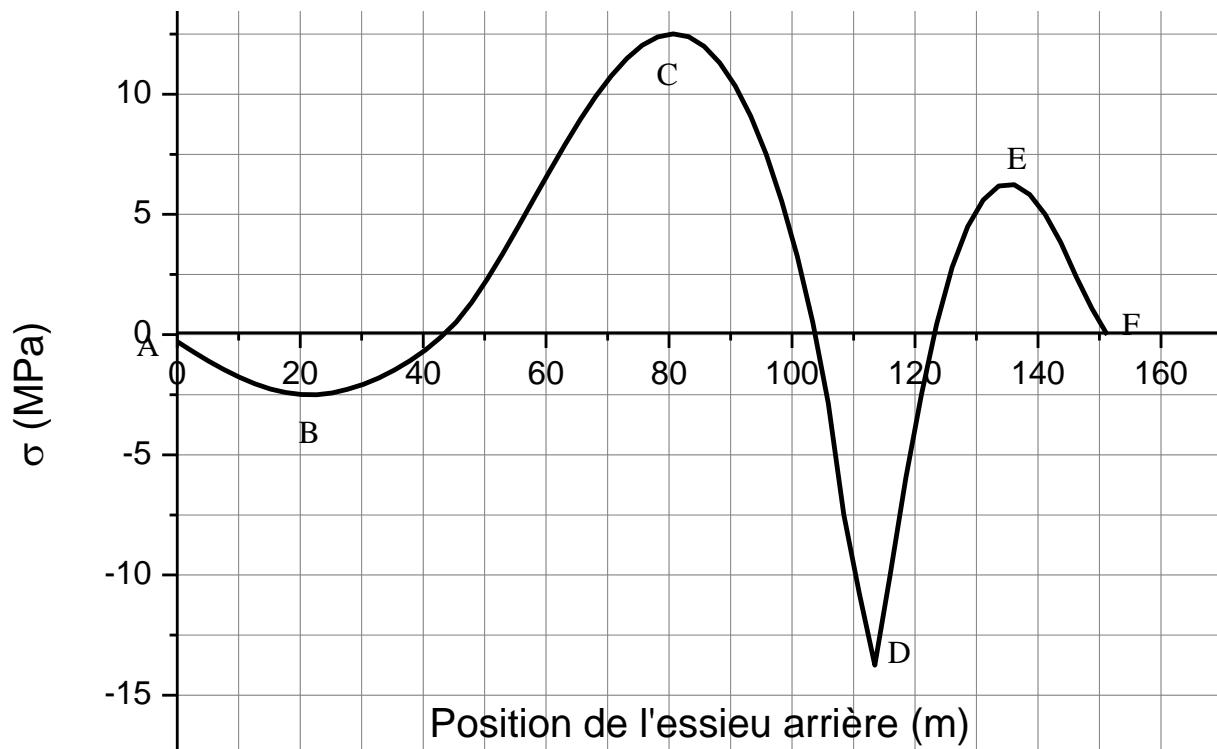
Le comptage des cycles est illustré dans la figure D.19 .



**Figure D.20.** Comptage des cycles sous camion A du convoi FLM4 dans la section  $x = 106.94$  m

**Tableau D.16.** Comptage des cycles et étendus des contraintes  $\sigma$  sous camion A convoi FLM4 dans la section  $x = 106.94$  m

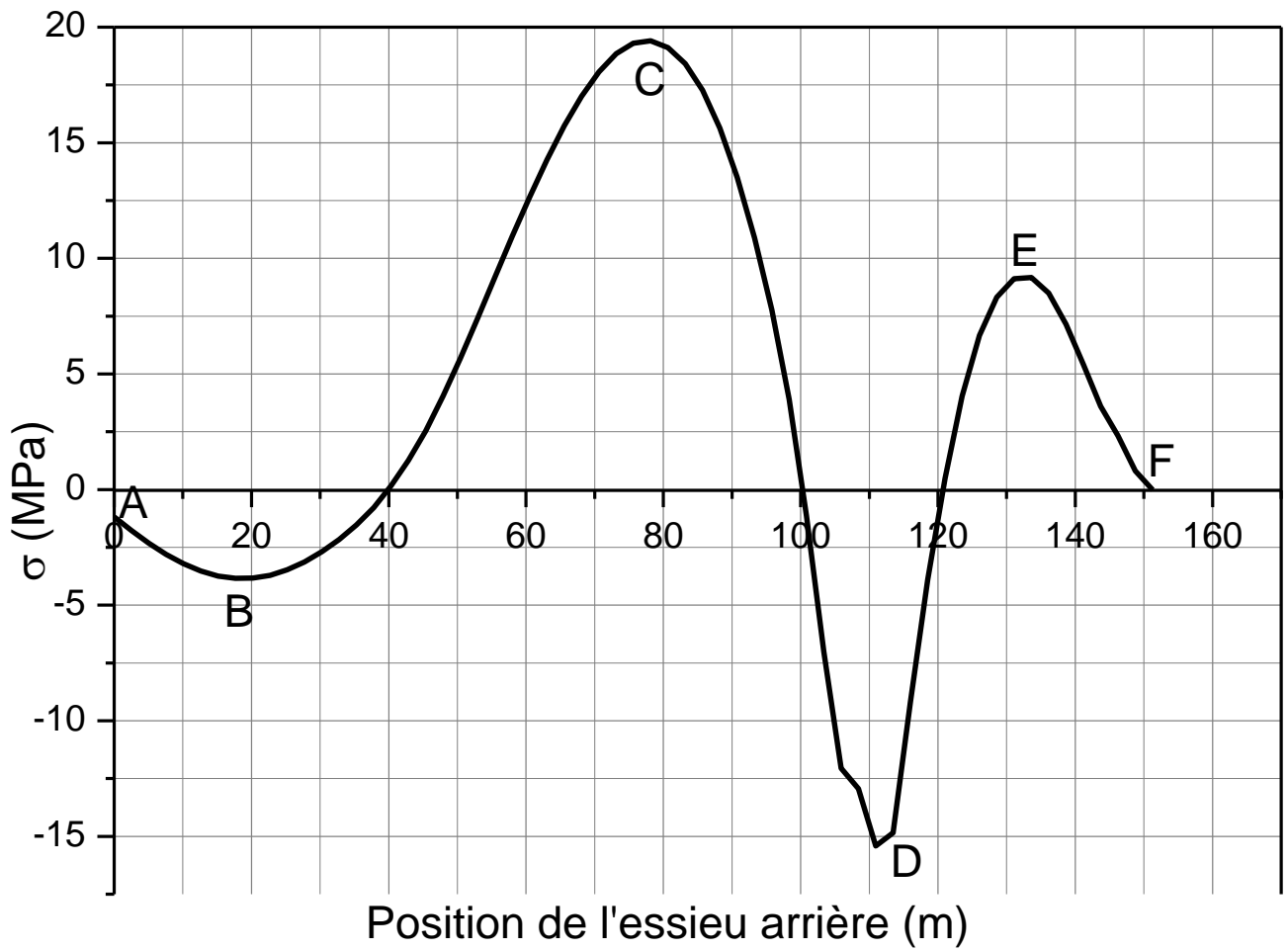
| Trajet               | A-D         | B-C         | E-F         |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|
| $\Delta\sigma$ (MPa) | 8,586375792 | 9,681722894 | 4,030878805 |
| Cycle                | 1/2         | 1           | 1/2         |



**Figure D.21.** Variation de la contrainte  $\sigma$  sous camion B du convoi FLM4 dans la section  $x = 106.94$  m

**Tableau D.17.** Comptage des cycles et étendus des contraintes  $\sigma$  sous camion B convoi FLM4 dans la section  $x = 106.94$  m

| Trajet               | A-D         | B-C         | E-F         |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|
| $\Delta\sigma$ (MPa) | 13,45568491 | 15,00825587 | 6,247650737 |
| Cycle                | 1/2         | 1           | 1/2         |

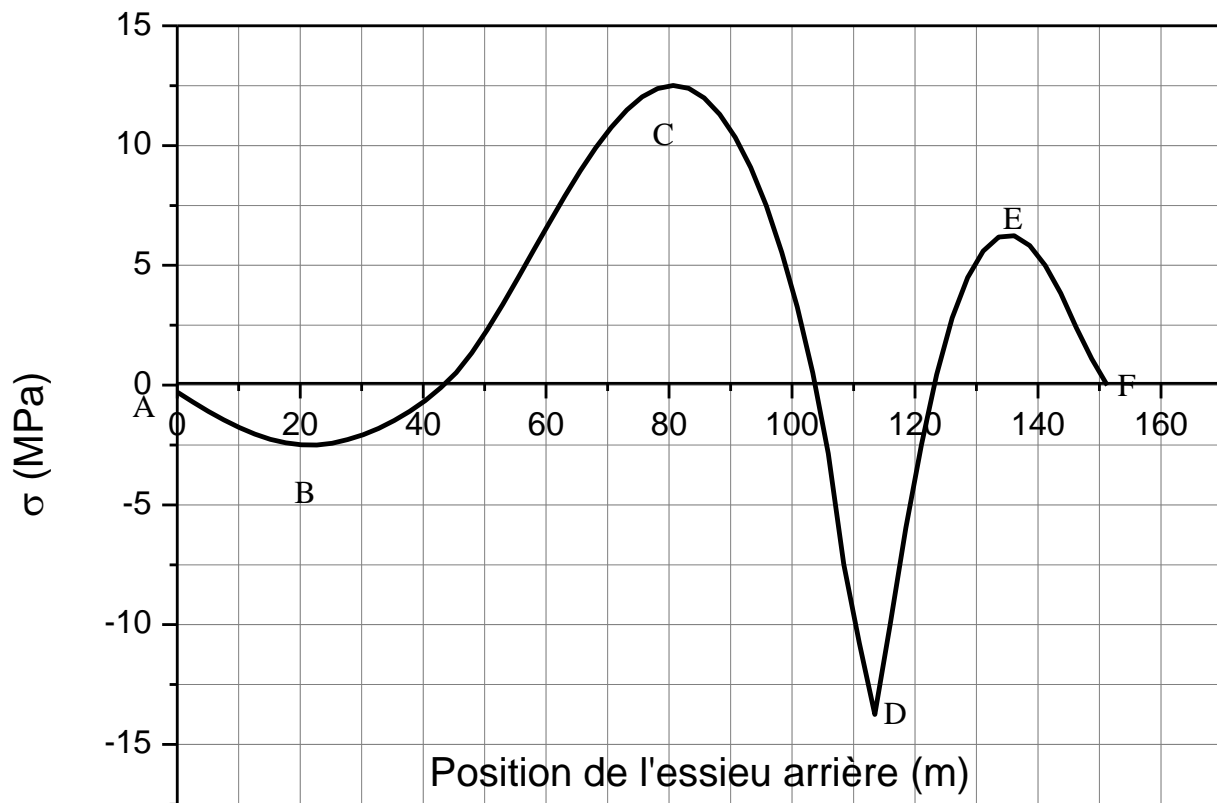


**Figure D.22.** Variation de la contrainte  $\sigma$  sous camion C du convoi FLM4 dans la section  $x = 106.94$  m

**Tableau D.18.** Comptage des cycles et étendus des contraintes  $\sigma$  sous camion C convoi FLM4 dans la section  $x = 106.94$  m

| Trajet               | A-D         | B-C         | E-F         |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|
| $\Delta\sigma$ (MPa) | 14,23259617 | 23,24744291 | 9,188564553 |
| Cycle                | 1/2         | 1           | 1/2         |

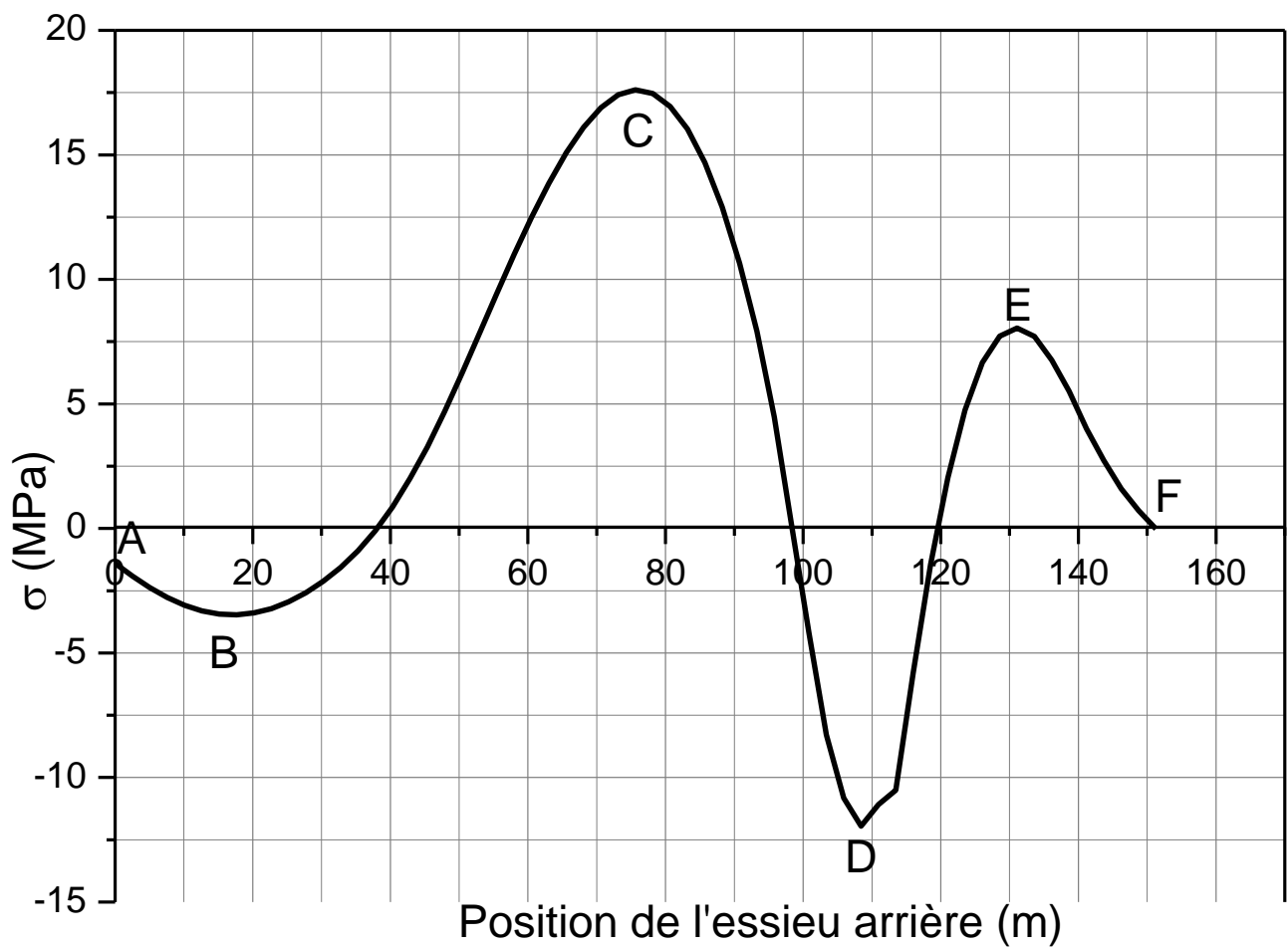




**Figure D.23.** Variation de la contrainte  $\sigma$  sous camion D du convoi FLM4 dans la section  $x = 106.94$  m

**Tableau D.19.** Comptage des cycles et étendus des contraintes  $\sigma$  sous camion D convoi FLM4 dans la section  $x = 106.94$  m

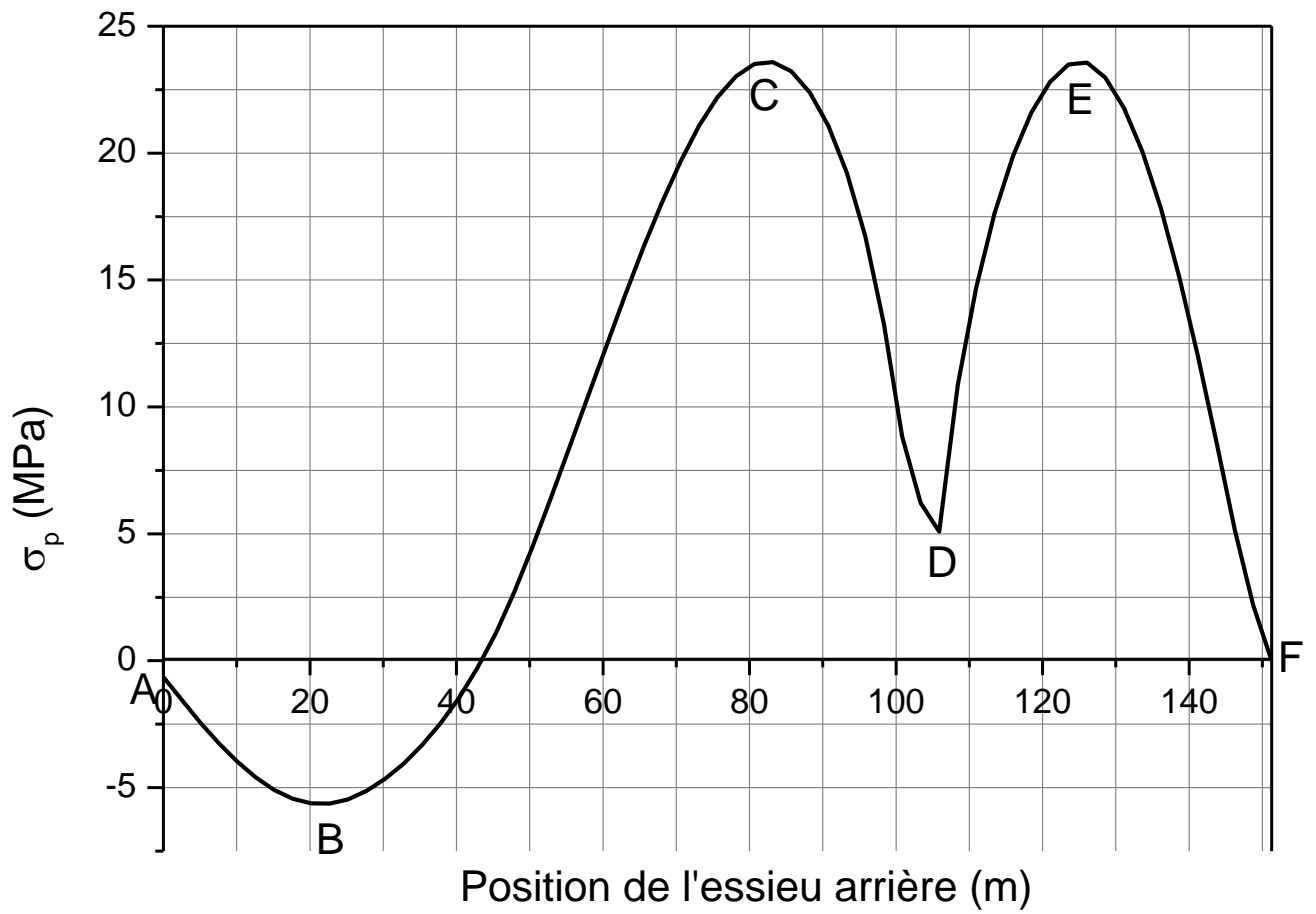
| Trajet               | A-D         | B-C         | E-F         |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|
| $\Delta\sigma$ (MPa) | 9,799554808 | 18,41829819 | 7,206723822 |
| Cycle                | 1/2         | 1           | 1/2         |



**Figure D.24.** Variation de la contrainte  $\sigma$  sous camion E du convoi FLM4 dans la section  $x = 106.94$  m

**Tableau D.20.** Comptage des cycles et étendus des contraintes  $\sigma$  sous camion E convoi FLM4 dans la section  $x = 106.94$  m

| Trajet               | A-D         | B-C         | E-F         |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|
| $\Delta\sigma$ (MPa) | 10,55106694 | 21,07374098 | 8,062075905 |
| Cycle                | 1/2         | 1           | 1/2         |



**Figure D.25.** Variation de la contrainte  $\sigma_p$  sous camion A du convoi FLM4 dans la section  $x = 105.89$  m

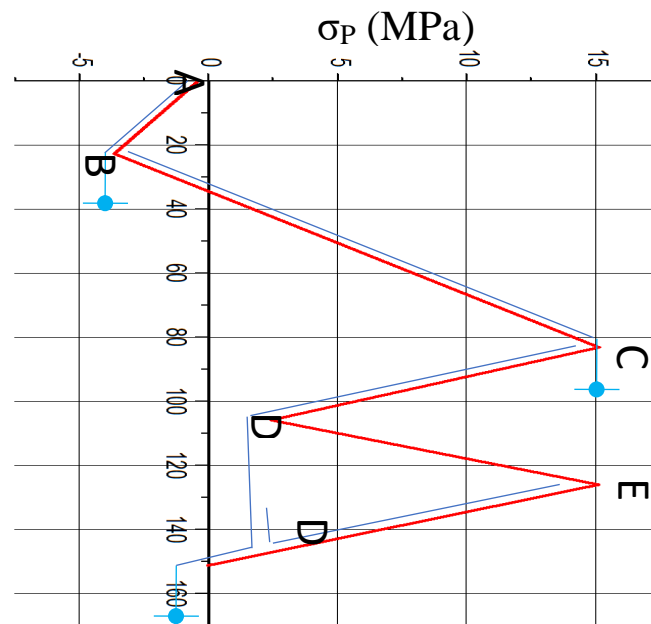
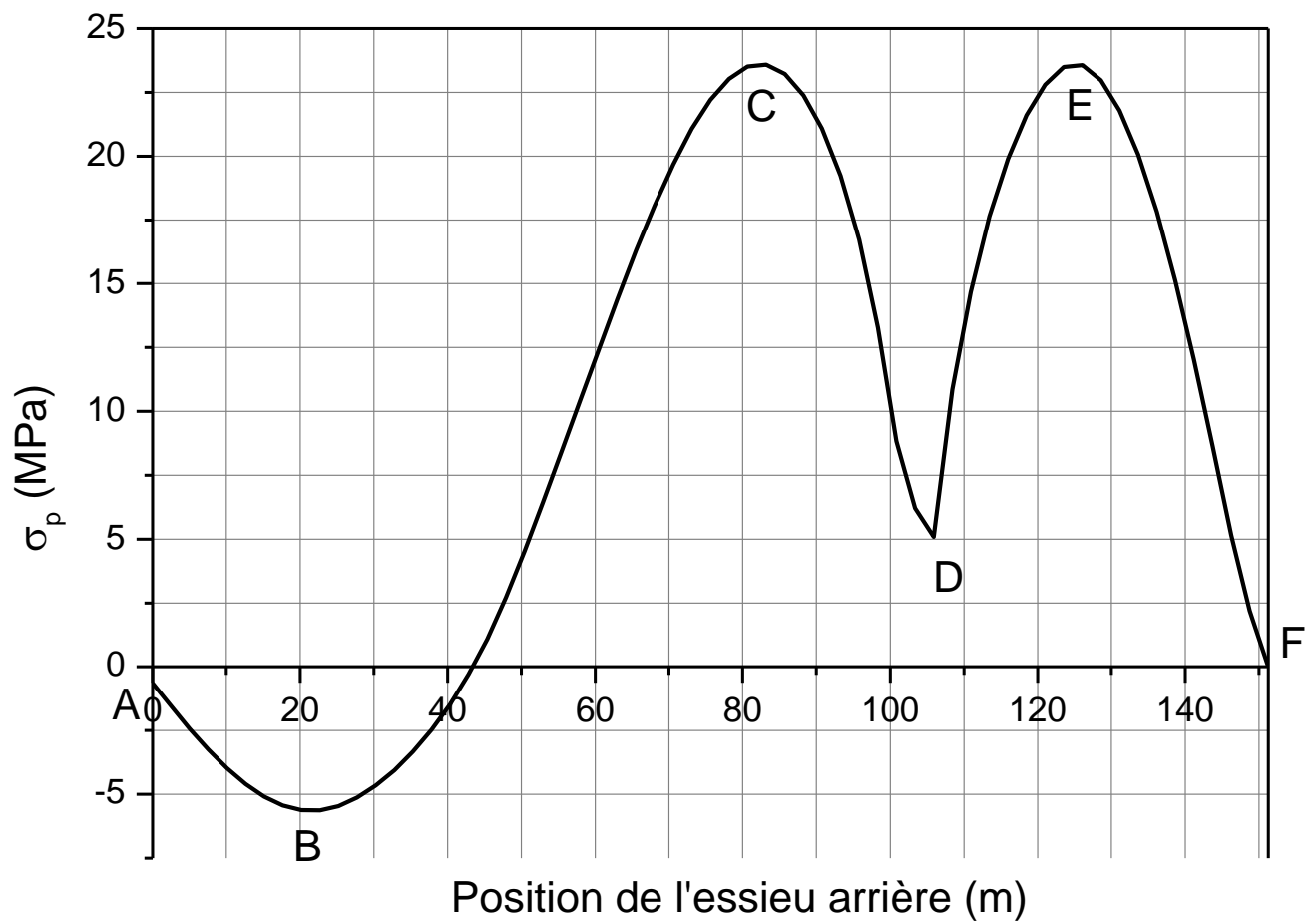


Figure D.26. Comptage des cycles de  $\sigma_p$  sous camion A du convoi FLM4 dans la section  $x = 105.89$  m

Tableau D.21. Comptage des cycles et étendus des contraintes  $\sigma_p$  sous camion A convoi FLM4 dans la section  $x = 105.89$  m

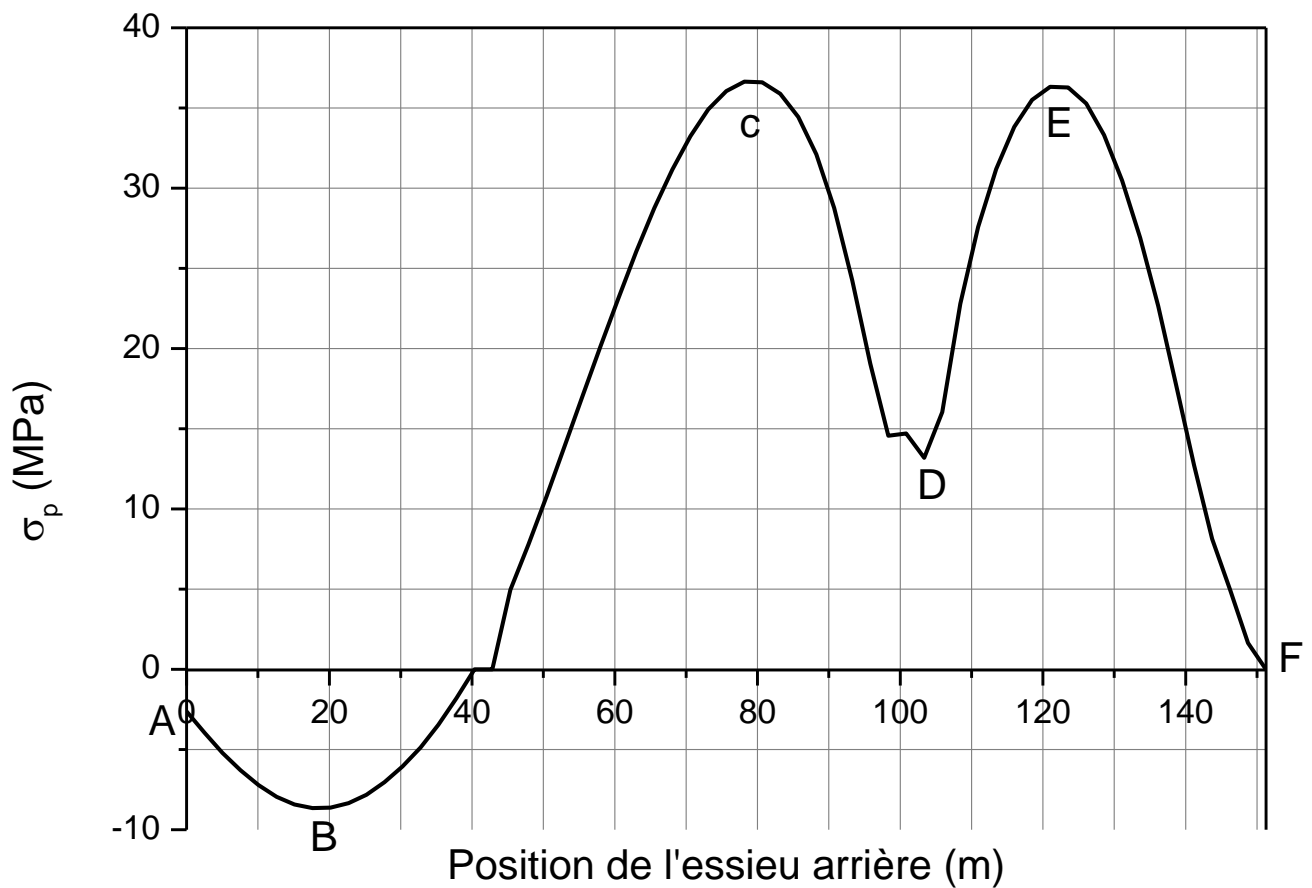
| Trajet                 | A-B        | B-C         | D-E         | C-F         |
|------------------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| $\Delta\sigma_p$ (MPa) | 4,98681333 | 29,21073517 | 18,47435381 | 23,58862207 |
| Cycle                  | 1/2        | 1/2         | 1           | 1/2         |



**Figure D.27.** Variation de la contrainte  $\sigma_p$  sous camion B du convoi FLM4 dans la section  $x = 105.89$  m

**Tableau D.22.** Comptage des cycles et étendus des contraintes  $\sigma_p$  sous camion B convoi FLM4 dans la section  $x = 105.89$  m

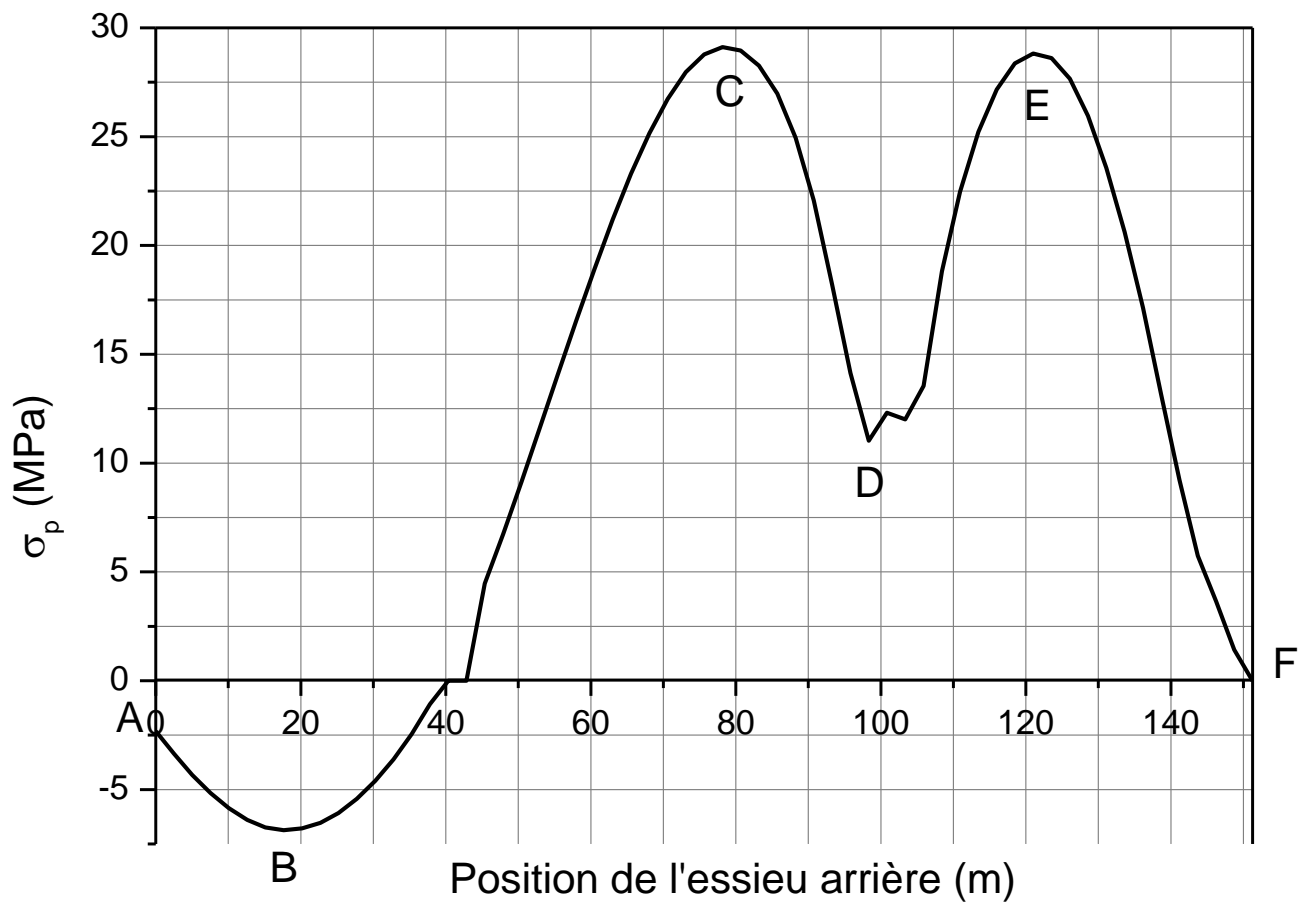
| Trajet                 | A-B        | B-C         | D-E         | C-F         |
|------------------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| $\Delta\sigma_p$ (MPa) | 4,98681333 | 29,21073517 | 18,47435381 | 23,58862207 |
| Cycle                  | 1/2        | 1/2         | 1           | 1/2         |



**Figure D.28.** Variation de la contrainte  $\sigma_p$  sous camion C du convoi FLM4 dans la section  $x = 105.89$  m

**Tableau D.23.** Comptage des cycles et étendus des contraintes  $\sigma_p$  sous camion C convoi FLM4 dans la section  $x = 105.89$  m

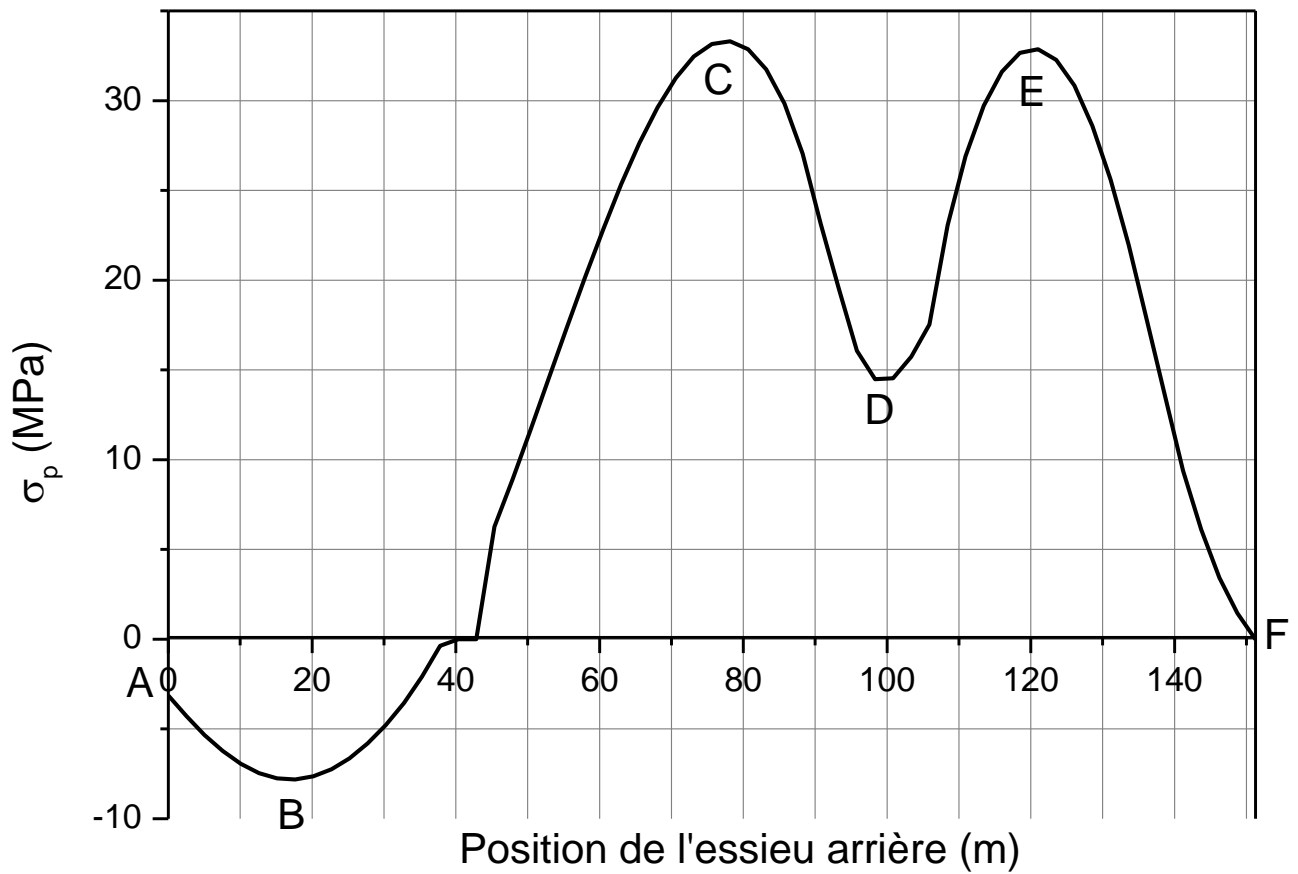
| Trajet                 | A-B        | B-C         | D-E         | C-F         |
|------------------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| $\Delta\sigma_p$ (MPa) | 6,03384078 | 45,29485525 | 23,12432772 | 36,65569807 |
| Cycle                  | 1/2        | 1/2         | 1           | 1/2         |



**Figure D.29.** Variation de la contrainte  $\sigma_p$  sous camion D du convoi FLM4 dans la section  $x = 105.89$  m

**Tableau D.24.** Comptage des cycles et étendus des contraintes  $\sigma_p$  sous camion D convoi FLM4 dans la section  $x = 105.89$  m

| Trajet                 | A-B         | B-C         | D-E         | C-F         |
|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $\Delta\sigma_p$ (MPa) | 4,544044614 | 35,98160188 | 17,78983143 | 29,12832277 |
| Cycle                  | 1/2         | 1/2         | 1           | 1/2         |



**Figure D.30.** Variation de la contrainte  $\sigma_p$  sous camion E du convoi FLM4 dans la section  $x = 105.89$  m

**Tableau D.25.** Comptage des cycles et étendus des contraintes  $\sigma_p$  sous camion E convoi FLM4 dans la section  $x = 105.89$  m

| Trajet                 | A-B         | B-C         | D-E         | C-F         |
|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $\Delta\sigma_p$ (MPa) | 4,670868318 | 41,11895935 | 18,32385072 | 33,32433906 |
| Cycle                  | 1/2         | 1/2         | 1           | 1/2         |