



# **Comportement structural d'un platelage en aluminium sur poutre en acier : répartition transversale des charges**

**Mémoire**

**Catherine St-Gelais**

**Maîtrise en génie civil - avec mémoire**  
Maître ès sciences (M. Sc.)

Québec, Canada

© Catherine St-Gelais, 2018

**Comportement structural d'un plâlage en  
aluminium sur poutre en acier :  
Répartition transversale des charges**

**Mémoire**

**Catherine St-Gelais**

Sous la direction de :

Charles-Darwin Annan, directeur de recherche

Mario Fafard, co-directeur de recherche

# Résumé

L'utilisation de platelages en aluminium dans les ponts est récente et peu répandue comparativement aux matériaux plus traditionnels tels que l'acier et le béton. Malgré l'introduction récente du chapitre 17 dans la norme canadienne des ponts routiers (CAN/CSA-S6) sur l'utilisation de l'aluminium structural dans les ponts, les connaissances concernant le comportement structural du platelage en aluminium restent limitées. Ainsi, les spécifications du code pour la conception ne fournissent pas des méthodologies suffisantes pour les vérifications de la résistance et de l'état limite d'utilisation. Par exemple, le calcul des fractions de charge de camion à l'aide de la méthode simplifiée pour la distribution transversale dans les platelages en aluminium est basé sur des valeurs spécifiées pour les platelages en madrier de bois, ce qui semble restrictif. Un autre exemple concret est lié au calcul du moment plastique qui permet d'établir la résistance du pont en flexion. La méthode simplifiée de calcul de la largeur effective dans le cas où il y aurait action composite n'est pas adaptée pour un platelage ayant une section alvéolée comme c'est le cas du platelage en aluminium. Une analyse utilisant les méthodes d'éléments finis est nécessaire pour établir ces paramètres de conception.

Dans ce mémoire, une étude de la répartition transversale des charges de trafic pour des dispositions d'extrusions longitudinales et transversales par rapport aux poutres en acier est effectuée à l'aide de la méthode des éléments finis. Plusieurs modèles de ponts sont réalisés afin d'étudier l'influence de la portée et de l'espacement des poutres sur les fractions de charge de camion ainsi que sur l'aire effective du platelage dans le cas d'action composite parfaite. Une comparaison avec les valeurs préconisées par la norme CAN/CSA-S6-14 ainsi qu'une comparaison entre les deux types de dispositions sont également effectuées.

Il a été déterminé que la norme surestime grandement les valeurs des fractions de charge de camion, allant jusqu'à une surestimation de 25% à 40%. De plus, il s'est avéré que les fractions de charge de camion calculées pour les modèles ayant les extrusions transversales aux poutres étaient toujours inférieures à celles calculées pour les modèles ayant les extrusions installées longitudinalement aux poutres. Pour ce qui est des résultats concernant l'aire effective, les valeurs obtenues avec les extrusions parallèles aux poutres étaient plus basses que celles obtenues avec les extrusions transversales. Enfin, lors de la comparaison avec les valeurs de la norme pour un platelage en béton, les aires effectives trouvées à l'aide des modèles étaient toujours inférieures à celles de la norme.

# Abstract

The use of aluminium decks in bridges has received attention in recent years, as the bridge engineering community discovers the advantages of this material compared with the traditional construction materials such as steel and concrete. Despite the recent introduction of Chapter 17 in the Canadian Highway Bridge Design Code, CAN/CSA S6, which permits engineers to use aluminium for bridge construction, the structural design application still remains a daunting task. Essentially, the code's specifications for design do not provide concise and detailed methodologies for strength and serviceability verifications. As an example, for the simplified traffic load analysis, it appears that the factors for transverse distribution of traffic loads specified for aluminium bridge decks are based on values specified for wood plank decks, which appears insufficient. Another practical example relates to the determination of the plastic moment required to establish the bending moment capacity for the bridge section. Considering that a bridge deck solution in aluminium consists of a multi-cellular section made from extrusions, the application of the simplified method in determining the effective width of the deck section becomes a non-trivial task. A refined analysis using finite element methods is required to establish these design parameters for an optimized bridge solution in aluminium.

In the present study, a finite element analysis is carried out to investigate the transverse distribution of traffic load on aluminium decks made from longitudinal and transverse extrusions, supported by steel girders. A number of bridge models are developed to study the influence of girder spacing and bridge span on the truck load fraction for aluminium decks and for establishing the effective area for the composite aluminium deck with steel girder system.

It was determined that the code largely overestimates the values of truck load fractions, up to 25% to 40%. In addition, it was found that the truck load fractions calculated for models with transverse extrusion arrangements were always lower than those calculated for models with longitudinal extrusion. The transverse arrangement is therefore more effective in transferring truck loads to supporting girders. With respect to the effective area, the study showed that these values were lower for longitudinal extrusions than transverse extrusions. Finally, when compared with the values obtained using the simplified method by the code for a concrete deck, the effective areas determined were lower than those obtained from the code.

# Table des matières

Résumé	iii
Abstract	iv
Table des matières .....	v
Liste des tableaux .....	vii
Liste des figures .....	ix
Liste des abréviations et des sigles .....	xv
Remerciements.....	xxi
<b>Chapitre 1 Introduction .....</b>	<b>1</b>
1.1 Mise en contexte .....	1
1.2 Problématique .....	3
1.3 Objectifs de l'étude .....	4
1.4 Organisation du mémoire.....	5
<b>Chapitre 2 État des connaissances.....</b>	<b>7</b>
2.1 Alliages d'aluminium .....	7
2.2 Platelage en aluminium.....	11
2.2.1 Généralité.....	11
2.2.2 Exemples .....	12
2.2.3 Avantages .....	17
2.2.4 Désavantages .....	21
2.3 Largeur effective .....	26
2.3.1 Généralité.....	26
2.3.2 Recherches antérieures .....	27
2.3.3 Décalage en cisaillement .....	33
2.4 Fraction de charge de camion .....	35
2.5 Critique de l'état des connaissances .....	39
<b>Chapitre 3 Méthodologie utilisée .....</b>	<b>41</b>
3.1 Introduction.....	41
3.2 Présentation des modèles .....	43
3.2.1 Généralité.....	43
3.2.2 Chargement.....	46
3.2.3 Maillage utilisé .....	50

3.2.4	Extrusion du platelage en aluminium utilisée.....	54
3.3	Détermination des fractions de charge de camion .....	57
3.4	Détermination de l'aire effective .....	60
<b>Chapitre 4</b>	<b>Présentation des résultats.....</b>	<b>64</b>
4.1	Fraction de charge de camion .....	64
4.1.1	Extrusions installées transversalement .....	64
4.1.2	Extrusions installées longitudinalement .....	65
4.2	Aire effective .....	67
4.2.1	Extrusions installées transversalement .....	67
4.2.2	Extrusions installées longitudinalement .....	72
<b>Chapitre 5</b>	<b>Discussion .....</b>	<b>81</b>
5.1	Fraction de charge de camion .....	81
5.1.1	Comparaison entre les deux dispositions .....	81
5.1.2	Comparaison avec la norme S6 .....	83
5.2	Aire effective .....	86
5.2.1	Comparaison entre les deux dispositions .....	86
5.2.2	Comparaison entre les deux types de chargements .....	89
5.2.3	Calcul du moment résistant .....	91
5.2.4	Comparaison avec la norme S6 .....	92
<b>Chapitre 6</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>95</b>
6.1	Principales conclusions.....	95
6.2	Améliorations et travaux futurs .....	97
<b>Bibliographie</b>	<b>99</b>	
Annexe A	Photographie du pont d'Arvida entièrement fait d'aluminium.....	103
Annexe B	Graphique présentant les résultats de largeur effective de l'étude de Cheung et Chan (1978) .....	105
Annexe C	Détermination du positionnement transversale du camion.....	109
Annexe D	Essais avec différents types d'éléments.....	115
Annexe E	Graphiques des répartitions de contraintes .....	119
Annexe F	Essais pour déterminer la rigidité flexionnelle du platelage.....	145
Annexe G	Graphiques des axe neutres.....	150
Annexe H	Distribution des contraintes sur l'épaisseur du platelage.....	159

## Liste des tableaux

Tableau 2.1: Types d'alliages d'aluminium existants .....	7
Tableau 2.2 : Comparaison des poids avec les différents types de platelage .....	18
Tableau 2.3 : Comparaison des durées de vie des différents types de platelage .....	20
Tableau 2.4 : Comparaison des prix avec les autres types de platelage .....	22
Tableau 2.5 : Comparaison entre les différents paramètres pris en compte par les codes pour la détermination de la largeur effective .....	33
Tableau 3.1: Dimensions des ponts pour chacun des modèles.....	43
Tableau 3.2: Dimensions des poutres en acier pour chacun des modèles .....	44
Tableau 3.3 : Propriétés des matériaux utilisés dans les modèles .....	45
Tableau 3.4: Facteur de modification des charges selon le nombre de voies chargées.....	47
Tableau 3.5: Calcul du nombre de voie.....	48
Tableau 3.6: Nombre de voie utilisé pour les différentes largeurs de ponts utilisés .....	48
Tableau 3.7 : Épaisseurs des parois de l'extrusion utilisée .....	56
Tableau 3.8 : Détermination du moment fléchissant maximal provoqué par le camion lorsqu'une seule poutre reprend la charge.....	58
Tableau D.1 : Temps de calcul des essais réalisés avec les différents types d'éléments ..	116
Tableau F.1: Valeurs des dimensions et du chargement utilisées pour le calcul de la rigidité flexionnelle du platelage.....	147





# Liste des figures

Figure 1.1 : Pourcentage de construction des ouvrages d’art au Québec par décennies, tirée de MTMDET(2015) .....	1
Figure 1.2 : Classement des 10 plus importants producteurs d’aluminium primaire au monde, basé sur Index Mundi (2013).....	2
Figure 2.1 : Résistances selon la norme CAN/CSA-S6-14 des différents alliages d’aluminium permis.....	10
Figure 2.2 : Section transversales typique d’un pont à dalle sur poutres .....	11
Figure 2.3 : Illustration de l’extrusion de 50 mm de hauteur (haut) et de 100 mm (bas) fabriqué par SAPA et utilisé en Suède, tirée de Beaulieu et col. (2015).....	12
Figure 2.4 : Présentation des différentes extrusions disponibles pour l’utilisation comme platelage, tirée de Beaulieu et col. (2015) .....	13
Figure 2.5 : Pont Uiver, aux Pays-bas, tirée de Beaulieu et col. (2015).....	14
Figure 2.6 : Photographie de l’extrusion développée par Reynolds Metals, tirée de Osberg et Vachon (2014) .....	15
Figure 2.7 : Photographie montrant le profilé de 5 pouces d’Alumabridge, tirée de Beaulieu et col. (2015).....	16
Figure 2.8 : Connexion entre les poutres et le platelage pour le pont Saint-Ambroise, tirée de MMM Group (2014).....	17
Figure 2.9 : Représentation de la largeur effective, adaptée de Salama et Nassif. (2010) ...	26
Figure 2.10 : Représentation de la largeur effective, tirée de Timoshenko et Goodier. (1970) .....	27
Figure 2.11 : Représentation de la largeur effective, tirée de Cheung et Chan. (1978) .....	29
Figure 2.12 : Représentation de la largeur effective, tirée de Chiewanichakorn et col. (2004) .....	31
Figure 2.13 : Exemple du phénomène de décalage en cisaillement dans les assemblages, tirée de Beaulieu et col. (2005).....	34
Figure 3.1 : Représentation schématique de la méthodologie utilisée .....	41
Figure 3.2 : Camion CL-625 exigé par la norme canadienne, tirée de CAN/CSA-S6-14, art. 3.8.3.1.2. (2014) .....	46
Figure 3.3 : Différence entre un élément linéaire et quadratique, adaptée d’ABAQUS User’s Guide 6.12, (2017) .....	50
Figure 3.4 : Représentation des éléments générés par le logiciel pour modéliser l’arrondi de l’extrusion.....	51
Figure 3.5: Type d’éléments utilisés.....	52

Figure 3.6 : Analyse de convergence pour la détermination de la dimension des éléments	53
Figure 3.7 : Comparaison entre les orientations des éléments coques verticaux et horizontaux	54
Figure 3.8 : Dimensions de l'extrusion utilisée	55
Figure 3.9 : Représentation de l'arrondi	55
Figure 3.10 : Représentation 3D de l'extrusion avec les éléments de coque	56
Figure 3.11 : Représentation de l'outil Free body cut d'ABAQUS utilisé pour la détermination de la fraction de charge de camion	59
Figure 3.12 : Représentation schématique de la définition de la largeur effective définie par Chiewanichakornet col. (2004)	60
Figure 3.13 : Détermination de la force de compression dans le platelage pour les extrusions disposées longitudinalement (haut) et transversalement (bas)	62
Figure 3.14 : Illustration de l'outil Path permettant de déterminer la répartition des contraintes dans le haut et le bas du platelage	63
Figure 4.1 : Fractions de charge de camion pour la poutre de centre et la poutre de rive avec les extrusions installées transversalement aux poutres	64
Figure 4.2 : Fractions de charge de camion pour la poutre de centre et la poutre de rive avec les extrusions posées longitudinalement aux poutres	66
Figure 4.3 : Répartition des contraintes dans le haut du platelage pour le modèle 1 avec les extrusions posées transversalement pour le chargement de camions	67
Figure 4.4 : Répartition des contraintes dans le bas du platelage pour le modèle 1 avec les extrusions posées longitudinalement pour le chargement de camions	68
Figure 4.5 : Ratio d'aire effective sur l'aire totale pour tous les modèles avec les extrusions posées transversalement	71
Figure 4.6 : Répartition des contraintes dans le haut du platelage pour le modèle 1 avec les extrusions posées longitudinalement aux poutres avec le chargement de camion	72
Figure 4.7 : Répartition des contraintes dans le bas du platelage pour le modèle 1 avec les extrusions posées longitudinalement aux poutres pour le chargement de camions	73
Figure 4.8 : Ratio d'aire effective sur l'aire totale pour tous les modèles avec les extrusions posées longitudinalement pour le chargement de camions	77
Figure 4.9 : Répartition des contraintes dans le haut du platelage pour le modèle 1 avec les extrusions posées longitudinalement pour le chargement uniforme	78
Figure 4.10 : Répartition des contraintes dans le bas du platelage pour le modèle 1 avec les extrusions posées longitudinalement pour le chargement uniforme	79
Figure 4.11 : Ratio d'aire effective sur l'aire totale pour tous les modèles avec les extrusions posées longitudinalement pour le chargement uniforme	80

Figure 5.1 : Comparaison des fractions de charge de camion entre les deux dispositions des extrusions pour la poutre de centre.....	81
Figure 5.2 : Comparaison des fractions de charge de camion entre les deux dispositions des extrusions pour la poutre de rive .....	82
Figure 5.3 : Comparaison avec la norme avec les résultats des fractions de charge obtenus avec les modèles .....	84
Figure 5.4 : Comparaison des valeurs des fractions de charge pour un platelage en béton avec celles obtenues avec les modèles .....	85
Figure 5.5 : Comparaison des ratios d'aire effective sur l'aire totale pour les deux dispositions dans le cas du chargement du camion CL-625 .....	87
Figure 5.6 : Comparaison de la position de l'axe neutre entre le modèle 1 avec les extrusions posées transversalement et longitudinalement .....	88
Figure 5.7 : Comparaison des ratios de l'aire effective sur l'aire totale pour les deux types de chargements utilisés .....	89
Figure 5.8: Ratios des moments maximaux résistants pour les deux types de dispositions.	92
Figure 5.9 : Comparaison avec la norme des ratios d'aire effective sur l'aire totale .....	93
Figure A.1: Photographie du pont d'Arvida entièrement fait en aluminium, construit en 1950, réalisée par Potvin (2006).....	104
Figure B.1: Résultats des ratios de largeur effective sur la largeur tributaire selon le ratio de la portée sur l'espacement des poutres de l'étude faite par Cheung et Chan (1978).....	107
Figure D.1: Comparaison des répartitions de contraintes obtenues avec les différents types d'éléments utilisés .....	117
Figure E.1 : Répartition des contraintes pour le modèle 1 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement de camion .....	120
Figure E.2 : Répartition des contraintes pour le modèle 2 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement de camion .....	120
Figure E.3 : Répartition des contraintes pour le modèle 3 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement de camion .....	121
Figure E.4 : Répartition des contraintes pour le modèle 4 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement de camion .....	121
Figure E.5 : Répartition des contraintes pour le modèle 5 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement de camion .....	122
Figure E.6 : Répartition des contraintes pour le modèle 6 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement de camion .....	122

Figure E.7 : Répartition des contraintes pour le modèle 7 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement de camion .....	123
Figure E.8 : Répartition des contraintes pour le modèle 8 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement de camion .....	123
Figure E.9 : Répartition des contraintes pour le modèle 9 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement de camion .....	124
Figure E.10 : Répartition des contraintes pour le modèle 10 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement de camion .....	124
Figure E.11 : Répartition des contraintes pour le modèle 11 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement de camion .....	125
Figure E.12 : Répartition des contraintes pour le modèle 12 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement de camion .....	125
Figure E.13 : Répartition des contraintes pour le modèle 13 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement de camion .....	126
Figure E.14 : Répartition des contraintes pour le modèle 14 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement de camion .....	126
Figure E.15 : Répartition des contraintes pour le modèle 15 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement de camion .....	127
Figure E.16 : Répartition des contraintes pour le modèle 1 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement uniforme .....	128
Figure E.17 : Répartition des contraintes pour le modèle 2 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement uniforme .....	128
Figure E.18 : Répartition des contraintes pour le modèle 3 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement uniforme .....	129
Figure E.19 : Répartition des contraintes pour le modèle 4 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement uniforme .....	129
Figure E.20 : Répartition des contraintes pour le modèle 5 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement uniforme .....	130
Figure E.21 : Répartition des contraintes pour le modèle 6 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement uniforme .....	130
Figure E.22 : Répartition des contraintes pour le modèle 7 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement uniforme .....	131
Figure E.23 : Répartition des contraintes pour le modèle 8 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement uniforme .....	131
Figure E.24 : Répartition des contraintes pour le modèle 9 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement uniforme .....	132

Figure E.25 : Répartition des contraintes pour le modèle 10 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement uniforme .....	132
Figure E.26 : Répartition des contraintes pour le modèle 11 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement uniforme .....	133
Figure E.27 : Répartition des contraintes pour le modèle 12 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement uniforme .....	133
Figure E.28 : Répartition des contraintes pour le modèle 13 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement uniforme .....	134
Figure E.29 : Répartition des contraintes pour le modèle 14 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement uniforme .....	134
Figure E.30 : Répartition des contraintes pour le modèle 15 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement uniforme .....	135
Figure E.31 : Répartition des contraintes pour le modèle 1 avec la disposition transversale des extrusions sous le chargement de camion .....	136
Figure E.32 : Répartition des contraintes pour le modèle 2 avec la disposition transversale des extrusions sous le chargement de camion .....	136
Figure E.33 : Répartition des contraintes pour le modèle 3 avec la disposition transversale des extrusions sous le chargement de camion .....	137
Figure E.34 : Répartition des contraintes pour le modèle 4 avec la disposition transversale des extrusions sous le chargement de camion .....	137
Figure E.35 : Répartition des contraintes pour le modèle 5 avec la disposition transversale des extrusions sous le chargement de camion .....	138
Figure E.36 : Répartition des contraintes pour le modèle 6 avec la disposition transversale des extrusions sous le chargement de camion .....	138
Figure E.37 : Répartition des contraintes pour le modèle 7 avec la disposition transversale des extrusions sous le chargement de camion .....	139
Figure E.38 : Répartition des contraintes pour le modèle 8 avec la disposition transversale des extrusions sous le chargement de camion .....	139
Figure E.39 : Répartition des contraintes pour le modèle 9 avec la disposition transversale des extrusions sous le chargement de camion .....	140
Figure E.40 : Répartition des contraintes pour le modèle 10 avec la disposition transversale des extrusions sous le chargement de camion .....	140
Figure E.41 : Répartition des contraintes pour le modèle 11 avec la disposition transversale des extrusions sous le chargement de camion .....	141
Figure E.42 : Répartition des contraintes pour le modèle 12 avec la disposition transversale des extrusions sous le chargement de camion .....	141

Figure E.43 : Répartition des contraintes pour le modèle 13 avec la disposition transversale des extrusions sous le chargement de camion .....	142
Figure E.44 : Répartition des contraintes pour le modèle 14 avec la disposition transversale des extrusions sous le chargement de camion .....	142
Figure E.45 : Répartition des contraintes pour le modèle 15 avec la disposition transversale des extrusions sous le chargement de camion .....	143
Figure F.1: Ratio des rigidités flexionnelles des extrusions posées longitudinalement et transversalement selon le sens de la portée en fonction de la portée .....	148
Figure G.1: Axes neutres pour les modèles 1 .....	151
Figure G.2: Axes neutres pour les modèles 2.....	151
Figure G.3: Axes neutres pour les modèles 3.....	152
Figure G.4: Axes neutres pour les modèles 4.....	152
Figure G.5: Axes neutres pour les modèles 5.....	153
Figure G.6: Axes neutres pour les modèles 6.....	153
Figure G.7: Axes neutres pour le modèle 7.....	154
Figure G.8: Axes neutres pour les modèles 8.....	154
Figure G.9: Axes neutres pour les modèles 9.....	155
Figure G.10: Axes neutres pour les modèles 10.....	155
Figure G.11: Axes neutres pour les modèles 11.....	156
Figure G.12: Axes neutres pour les modèles 12.....	156
Figure G.13: Axes neutres pour les modèles 13.....	157
Figure G.14: Axes neutres pour les modèles 14.....	157
Figure G.15: Axes neutres pour les modèles 15.....	158
Figure H.1 : Répartition des contraintes longitudinales (axe z) sur la hauteur totale du platelage avec le premier chemin de nœuds .....	161
Figure H.2 : Illustration du premier chemin de nœuds utilisé.....	162
Figure H.3 : Répartition des contraintes longitudinales (axe z) sur la hauteur totale du platelage avec le second chemin de nœuds .....	163
Figure H.4 : Illustration du second chemin de nœuds utilisé .....	163

# Liste des abréviations et des sigles

Symbole	Définition	Unités
$A_{eff}$	Aire effective	$L^2$
$A_i$	Aire de l'élément $i$	$L^2$
$A_{moy\_elem}$	Aire moyenne pour les éléments du bas	$L^2$
$A_n$	Aire nette de la section transversale	$L^2$
$A_{ne}$	Aire nette réduite de la section transversale	$L^2$
$A_{section}$	Aire d'une section d'extrusion	$L^2$
$A_{tot}$	Aire totale correspondant à l'aire tributaire de la poutre de centre	$L^2$
$B$	Largeur tributaire de la poutre ou Espacement des poutres	$L$
$B_e$	Largeur effective de la poutre	$L$
$b_{eff}$	Largeur effective définie par Chiewanichakorn et col. (2004)	$L$
$B_w$	Largeur de l'âme de la poutre	$L$
$b_{inf}$	Largeur de l'aile inférieure de la poutre	$L$
$b_{sup}$	Largeur de l'aile supérieure de la poutre	$L$
$C_{platelage}$	Force de compression totale dans le platelage	$F$
$C_{platelage\_bas}$	Force de compression totale dans le bas du platelage	$F$
$C_{platelage\_diag\_haut}$	Force de compression totale dans le haut et les diagonales du platelage	$F$
$D_T$	Largeur de répartition des charges des camions	$L$
$FCC$	Fraction de charge de camion	—
$F_{su}$	Résistance ultime en cisaillement	$\frac{F}{L^2}$
$F_{sy}$	Limite élastique en cisaillement	$\frac{F}{L^2}$
$F_T$	Force de tension dans la poutre équivalente à la force de compression dans le platelage par équilibre des forces définie par Cheung et Chan (1978)	$F$
$F_{wu}$	Limite ultime minimale à la traction des soudures	$\frac{F}{L^2}$

$F_{wy}$	Limite élastique minimale à la traction des soudures	$\frac{F}{L^2}$
$F_u$	Limite ultime minimale à la traction	$\frac{F}{L^2}$
$F_y$	Limite élastique minimale à la traction	$\frac{F}{L^2}$
$h$	Hauteur de la poutre	$L$
$l$	Longueur de la portée de la poutre définie par Timoshenko et Goodier (1970)	$L$
$L$	Longueur de la portée libre de la travée	$L$
$L_a$	Longueur de l'assemblage	$L$
$L_{moy}$	Longueur moyenne pour les éléments du bas	$L$
$M_{max}$	Moment maximal provoqué par le camion CL-625 lorsqu'une seule poutre reprend la charge	$F * L$
$M_{poutre}$	Moment repris par la poutre à l'étude	$F * L$
$N$	Nombre de poutres longitudinales sur la largeur du tablier du pont	—
$n$	Nombre de voies de calcul	—
$n_{elem}$	Nombre d'éléments en compression	—
$n_{section}$	Nombre de section dans la largeur effective de la poutre	—
$R_L$	Facteur de modification de charge tenant compte des situations de chargement multiple de voies sur un pont	—
$S$	Espacement des poutres	$L$
$S_c$	Largeur en porte-à-faux	$L$
$t_{ame}$	Épaisseur de l'âme de la poutre	$L$
$t_{bas}$	Épaisseur du bas du platelage	$L$
$t_{haut}$	Épaisseur du haut du platelage	$L$
$t_{inf}$	Épaisseur de l'aile inférieure de la poutre	$L$
$t_{platelage}$	Épaisseur du platelage	$L$
$t_{sup}$	Épaisseur de l'aile supérieure de la poutre	$L$
$w$	Chargement uniformément réparti	$\frac{F}{L^2}$
$\bar{x}$	Distance entre le plan de cisaillement et le centre de gravité de la section tributaire à l'assemblage	$L$



$y$	Distance p/r à l'axe neutre	$L$
$\gamma_c$	Coefficient de modification de charge de camion	—
$\lambda$	Largeur effective telle que définie par Timoshenko et Goodier (1970)	$L$
$\lambda_n$	Paramètres de largeur de voie	—
$\mu$	Coefficient de modification de la largeur de voie	—
$\nu$	Coefficient de Poisson	—
$\sigma_{comp\_i}$	Contraintes de compression dans l'élément $i$	$\frac{F}{L^2}$
$\sigma_{max}, \sigma_{min}$	Contrainte de compression longitudinale dans le haut et dans le bas du platelage, respectivement	$\frac{F}{L^2}$
$\sigma_{yc\_max}$	Contrainte longitudinale maximale de compression définie par Cheung et Chan (1978)	$\frac{F}{L^2}$
$\sigma_z$	Contrainte dans le plan longitudinal	$\frac{F}{L^2}$
$\varphi_s$	Coefficient de tenue de l'acier	—
$\varphi_y$	Coefficient de tenue de l'aluminium	—



*À ma famille et mes amis*



## Remerciements

Tout d'abord, j'aimerais remercier mon directeur, M. Charles-Darwin Annan ainsi que mon co-directeur, M. Mario Fafard pour m'avoir prise comme étudiante à la maîtrise. Cette expérience a été grandement enrichissante pour moi. Les échanges et conseils qu'ils m'ont apportés étaient toujours pertinents et m'ont permis de me dépasser intellectuellement.

Je voudrais également remercier M. André Caron de chez SNC-Lavalin pour m'avoir permis d'obtenir la bourse en milieu pratique. Grâce à cette bourse, j'ai pu passer la moitié de mon temps de recherche chez SNC-Lavalin et ainsi avoir accès aux vastes connaissances de ce bureau de génie-conseil. Encore une fois, cela m'a permis de me dépasser et d'obtenir un bagage supplémentaire d'expériences et de connaissances à la fin de ma maîtrise.

De nombreuses personnes m'ont aidé et supporté durant ses deux ans et quelques poussières de maîtrise, et je leur en suis très reconnaissante. Sans ses collègues et amis, ma maîtrise m'aurait paru beaucoup plus longue, et bien moins plaisante. Leur entraide et leur soutien m'ont été extrêmement précieux.

Enfin, j'aimerais remercier le FRQNT et SNC-Lavalin, qui ont financé mon projet de recherche. Ce financement m'a permis de me consacrer entièrement à ma maîtrise, et j'en suis reconnaissante. Finalement, je voudrais remercier le Centre de recherche sur l'aluminium Regroupement Aluminium (REGAL) qui m'a permis d'assister à plusieurs conférences et activités de recherches en assumant tous les frais reliés à ces activités. Ces conférences ont toujours été enrichissantes et m'ont permis de présenter mon projet à un large public.

# Chapitre 1 Introduction

## 1.1 Mise en contexte

La majorité des ouvrages d'art au Québec a été construite entre les années 1960 et 1980, comme l'indique la Figure 1.1, tirée du rapport du bilan 2015 des structures du réseau routier supérieur réalisé par le Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des Transports (MTMDET).

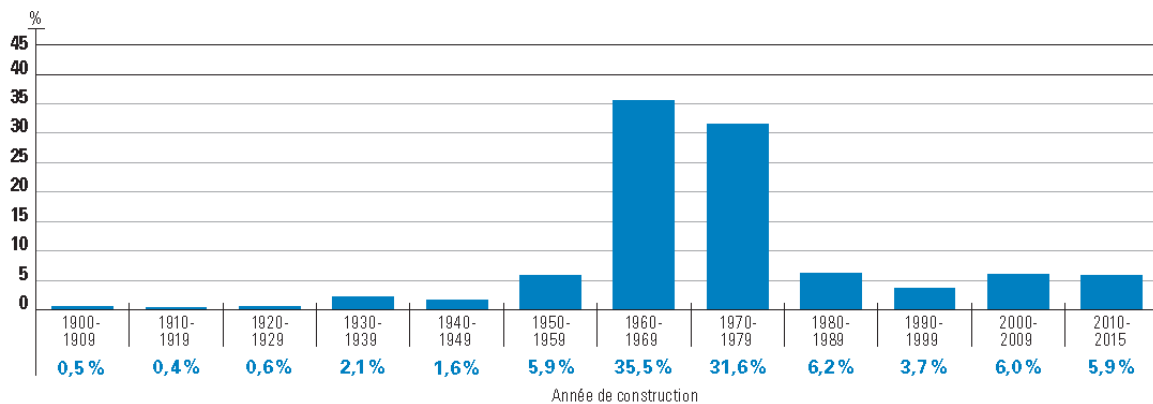


Figure 1.1 : Pourcentage de construction des ouvrages d'art au Québec par décennies, tirée de MTMDET(2015)

Il est également spécifié dans ce rapport que des travaux de réhabilitation et réparation doivent être faits environ au 30 ans. La majorité des structures du réseau routier ont donc atteint ou dépassé cette limite, et plusieurs travaux de réhabilitation sont nécessaires. Bien souvent, l'élément d'un pont le plus susceptible de se détériorer rapidement est le tablier, car il est le plus affecté par les sels de déglacage, le passage des véhicules et les variations de température. Une solution durable et innovante en termes de réhabilitation et même de nouvelle construction est l'utilisation d'un platelage en aluminium. Cette solution peut apporter plusieurs avantages non négligeables dépendamment du contexte du projet. Ces avantages sont présentés à la section 2.2.3. Le MTMDET a d'ailleurs décidé d'investir dans cette nouvelle technologie. Ainsi, plusieurs projets de recherches sont en cours afin d'explorer et d'approfondir les connaissances sur ce sujet. Cette décision du MTMDET s'inscrit en fait dans la Stratégie québécoise du développement de l'aluminium (SQDA) 2015-2025 mise sur pied par le gouvernement québécois.

Il faut savoir que le Québec est l'un des plus importants producteurs d'aluminium primaire. Le graphique suivant montre le classement des 10 premiers producteurs d'aluminium primaire dans le monde.

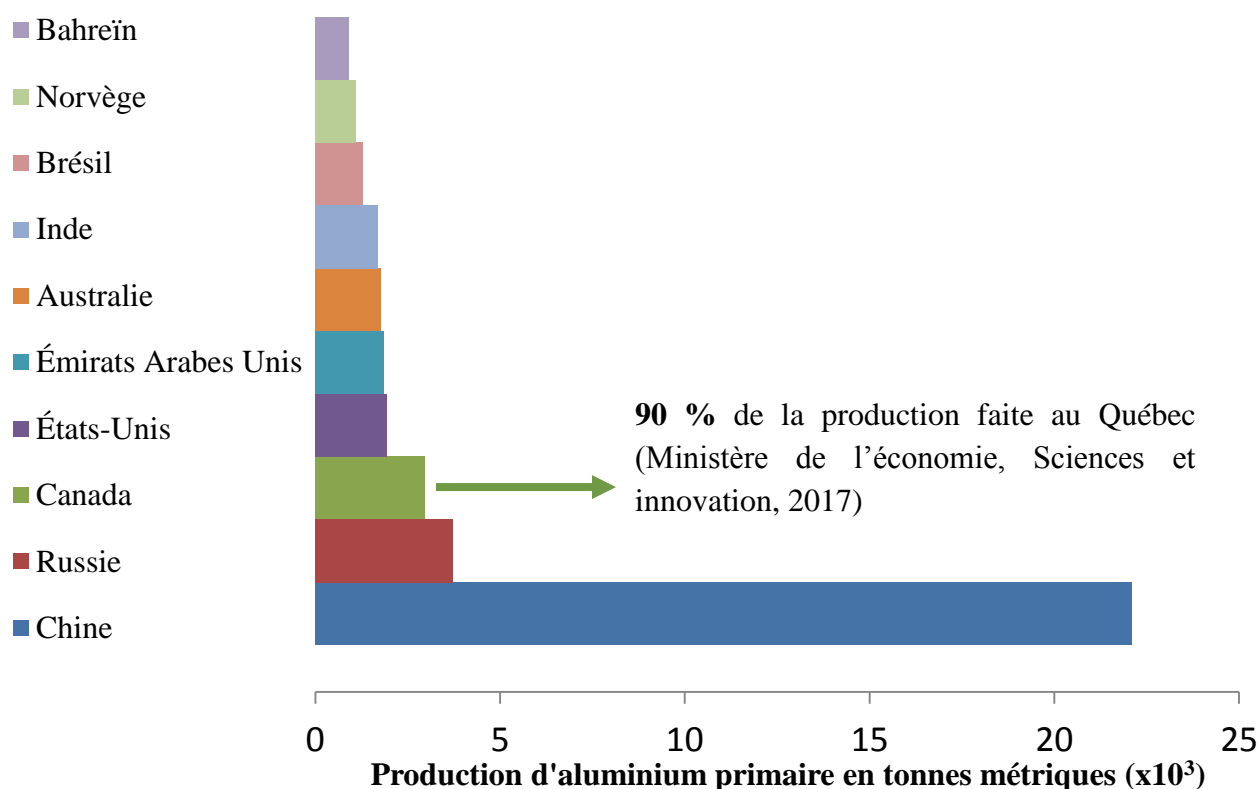


Figure 1.2 : Classement des 10 plus importants producteurs d'aluminium primaire au monde, basé sur Index Mundi (2013)

Le domaine de la transformation de l'aluminium est en développement au Québec. La SQDA a ainsi comme objectif de doubler la transformation d'aluminium en développant de nouveaux marchés et débouchés (MESI, 2015). L'introduction de platelages en aluminium dans les ponts permettrait de développer une nouvelle branche dans le domaine de transformation de l'aluminium. Il est visé de développer une action composite entre les poutres et le platelage en aluminium. Le platelage agit alors conjointement avec les poutres, ce qui permet d'augmenter la rigidité flexionnelle de l'ensemble. Le développement de l'action composite permet donc de réduire les dimensions des poutres. Toutefois, plusieurs considérations doivent être prises en compte afin de développer une connexion qui permettrait d'obtenir une action composite. La différence des coefficients de dilution

thermique des deux matériaux, les connecteurs anti-glissement, la corrosion galvanique qui existe lorsque l'aluminium est en contact avec de l'acier, l'adaptation de la connexion à la géométrie particulière des alvéoles, sont des points auxquels il faut porter une attention particulière afin de développer l'action composite voulue. D'autres problématiques liées aux glissières de sécurité et au drainage sont également des points à considérer pour la mise en œuvre d'un platelage en aluminium. Enfin, les connaissances relatives à l'utilisation de l'aluminium en tant que matériau structural dans les ponts sont assez limitées. Ainsi, plusieurs projets de recherche sont en cours afin d'approfondir et développer les connaissances relatives à ce type de platelage. L'étude qui fait l'objet de ce mémoire s'inscrit dans ce travail de recherche global.

## **1.2 Problématique**

L'utilisation de platelages en aluminium dans les ponts est récente et peu répandue. Les connaissances disponibles aujourd'hui concernant le comportement structural du platelage en aluminium sont donc limitées. Par exemple, les méthodes de calcul permettant d'établir la résistance d'un pont avec platelage en aluminium ne sont pas bien définies. En effet, la norme canadienne des ponts routiers (CAN/CSA-S6) ne présente aucune méthode de calcul pour déterminer la largeur effective, utile au calcul pour la résistance du pont en flexion dans le cas où il y aurait action composite entre le platelage en aluminium et les poutres. Lorsqu'il y a action composite, le platelage agit conjointement avec la poutre pour résister au moment flexionnel. La largeur effective correspond donc à la largeur du platelage participant à la reprise des efforts. De plus, par manque de connaissances, la norme reste très restrictive pour ce qui a trait au calcul des fractions de charge de camion à l'aide de la méthode simplifiée pour la distribution transversale dans les platelages en aluminium (CAN/CSA-S6, Art. 5.6.7.1). Les valeurs prescrites par la norme pour les platelages en aluminium sont aussi grandes que celles des platelages en madrier de bois, le cas le plus restrictif de la norme S6 (CAN/CSA-S6, Art. 5.6.7.4). Une grande fraction de charge de camion entraîne des dimensions plus élevées pour les poutres, et une augmentation des coûts. Toutefois, il est raisonnable de penser que le platelage en aluminium soit plus rigide qu'un platelage en madrier de bois, et donc plus apte à transférer transversalement les charges de camion. Ainsi, il existe un manque de connaissance au niveau de la répartition des charges transversales dans le cas d'un platelage en aluminium.



### **1.3 Objectifs de l'étude**

L'objectif de l'étude est de répondre à la problématique concernant la méconnaissance du comportement structural par rapport à la distribution des charges transversales dans le platelage en aluminium. Les deux dispositions du platelage sont étudiées, c'est-à-dire lorsque le sens des extrusions est longitudinal ou transversal aux poutres longitudinales. Le platelage est plus résistant lorsqu'il travaille dans la direction de l'extrusion. Ainsi, la disposition longitudinale des extrusions permet une meilleure résistance au moment longitudinal, et donc est une meilleure option dans le cas où il y a action composite. Toutefois, la disposition transversale s'avère mieux pour transférer transversalement les charges. Une comparaison entre les deux dispositions est donc faite.

Les objectifs de l'étude se divisent ainsi :

#### **Objectif global**

- Étude de la répartition transversale des charges selon les deux dispositions possibles du platelage, c'est-à-dire lorsque le sens des extrusions est longitudinal ou transversal aux poutres longitudinales.

#### **Objectifs spécifiques**

- Modélisation de plusieurs configurations de ponts avec les extrusions posées longitudinalement et transversalement aux poutres. Les paramètres variant sont la portée et l'espacement des poutres ;
  - Pour chacun des modèles :
    - Détermination des fractions de charge de camion ;
    - Détermination de l'aire effective ;
- Comparaison entre les deux dispositions et comparaison avec la norme canadienne CAN/CSA-S6.

## 1.4 Organisation du mémoire

Le mémoire est divisé en 6 chapitres. Tout d'abord, au Chapitre 2, un état des connaissances est présenté. Les thèmes importants reliés au sujet de ce mémoire y sont présentés. Les avantages et désavantages des platelages en aluminium sont montrés, ainsi que des exemples de platelages existants et leurs applications. Les principaux concepts utilisés pour cette étude sont également expliqués, tel que le concept de largeur effective et de fraction de charge de camion.

La méthodologie est présentée au Chapitre 3. Dans cette section, les méthodes utilisées pour la détermination des fractions de charge de camion et de l'aire effective y sont décrites en détail. De plus, les dimensions des différentes configurations de ponts sont présentées, ainsi que la géométrie de l'extrusion utilisée. Toutes les notions reliées à la modélisation, telles que le type d'élément, la mise en place du maillage, l'analyse utilisée, sont développées dans ce chapitre.

Les résultats sont présentés au Chapitre 4. Le chapitre est divisé en deux. La première partie montre les résultats obtenus reliés aux fractions de charge de camion, tandis que la deuxième partie se concentre sur les résultats concernant les aires effectives. Un exemple de calcul pour chacune des parties du chapitre est donné.

Au Chapitre 5, les résultats sont analysés. Dans cette analyse, les résultats des deux dispositions longitudinale et transversale des extrusions pour les fractions de charge de camion et l'aire effective sont comparés. Une comparaison avec les valeurs déterminées avec la norme (CAN/CSA-S6) est également faite.

Enfin, un résumé de tous les résultats et conclusions est présenté au Chapitre 6. Les améliorations possibles à la démarche utilisée et aux hypothèses posées sont également présentées. Le chapitre se conclut avec des propositions de travaux futurs possibles afin d'approfondir l'étude de ce mémoire.



# Chapitre 2 État des connaissances

## 2.1 Alliages d'aluminium

Il existe plusieurs types d'alliages d'aluminium. Toutes les séries d'alliages sont présentées dans le tableau suivant avec leurs principales caractéristiques. Au sein d'une même série, il peut y avoir certaines nuances également. Les informations du Tableau 2.1 sont principalement tirées du livre *Les caractéristiques de l'aluminium structural* de Denis Beaulieu (Beaulieu, 2013).

Tableau 2.1: Types d'alliages d'aluminium existants

Série alliage	Caractéristiques
Série 1000	Aluminium à l'état pur;  Très bonne résistance à la corrosion, très bon conducteur mais très malléable;  Faible résistance mécanique.
Série 2000	Principal élément d'alliage est le cuivre;  Augmentation importante de la résistance à la traction à l'aide de traitement thermique;  Mauvaise résistance à la corrosion due à la présence de cuivre;  C'est ce type d'alliage qui a d'abord été utilisé dans certaines applications structurales de génie civil;  Exemples :  - Pont d'Arvida entièrement fait en aluminium au Québec en 1949-1950 (MCC, 2013);  - Pont historique de la rue Smithfield, en Pennsylvanie, réhabilitation

	<p>du tablier avec un platelage en aluminium en 1933 (Brookline Connection, 2015).</p>
Série 3000	<p>Principal élément d'alliage est le manganèse;</p> <p>Augmente sa résistance mécanique sans altérer sa ductilité ni sa résistance à la corrosion;</p> <p>Non-traitable thermiquement, mais facilement soudable.</p>
Série 4000	<p>Principal élément d'alliage est le silicium;</p> <p>Augmentation modérée de la résistance mécanique ;</p> <p>Abaisse le point de fusion, ce qui permet de réduire les risques de fissuration à chaud lors du soudage;</p> <p>Augmente la fluidité lors du coulage dans les moules;</p> <p>Série utilisée surtout à la fabrication de moteurs, de pistons et de roues d'automobile.</p>
Série 5000	<p>Principal élément d'alliage est le magnésium;</p> <p>Augmentation appréciable de la résistance mécanique;</p> <p>Non-traitable thermiquement;</p> <p>Meilleure combinaison haute résistance à la traction et résistance à la corrosion;</p> <p>Série utilisée dans les environnements marins, dans les bâtiments, dans les industries et les transports entre autres.</p>
Série 6000	<p>Principaux éléments d'alliage : le magnésium et le silicium;</p> <p>Ces deux métaux forment ensemble un précipité de <math>Mg_2Si</math> qui</p>

	<p>renforce les propriétés mécaniques de l'aluminium;</p> <p>Meilleur alliage pour le procédé d'extrusion ;</p> <p>Résistance mécanique acceptable, bonne résistance à la corrosion et formabilité idéale pour les extrusions;</p> <p>Très utilisé dans le domaine des structures dû au fait de sa très bonne capacité d'extrusion ;</p> <p>Alliage 6061-T6 qui est le plus disponible et le plus utilisé en construction. Il offre la meilleure combinaison entre la résistance, la soudabilité et la résistance à la corrosion et tout cela à un prix abordable;</p> <p>Alliage 6063-T6 est également utilisé dans les structures, car il peut être facilement extrudé.</p>
Série 7000	<p>Principal élément d'alliage est le zinc, avec parfois du magnésium ou du cuivre pour augmenter les capacités mécaniques;</p> <p>Résistance mécanique la plus élevée de tous les alliages;</p> <p>Difficile à produire et à fabriquer;</p> <p>Série utilisée dans des applications spéciales requérant une bonne résistance mécanique (avion ou pare-chocs d'automobile);</p> <p>Moins bonne résistance à la corrosion que les alliages 5000 et 6000.</p>

Le chapitre 17 de la norme CAN/CSA-S6-14 spécifie à l'article 17.4.1 que seuls les alliages 5052, 5083, 5086, 6005A, 6061, 6063 ou 6082 peuvent être utilisés dans les ponts routiers. En Europe, c'est la série 6000 qui est la plus souvent utilisée pour les extrusions, tandis que la série 5000 sert surtout pour la fabrication de plaques (Beaulieu et col., 2015). En Amérique, c'est également la série 6000 et plus précisément l'alliage 6061-T6 qui est

utilisé dans les ponts routiers (Beaulieu et col., 2015). L'alliage 6063-T6 est également utilisé, puisque cet alliage a une bonne résistance mécanique tout en étant facilement extrudable et garde une bonne résistance contre la corrosion.

Le tableau 17.3 de la norme CAN/CSA-S6-14 fournit les résistances mécaniques pour chacun des alliages pouvant être utilisés dans les ponts. Ce tableau est présenté à la Figure 2.1

**Tableau 17.3**  
**Résistances mécaniques de produits corroyés courants**  
 (voir les articles 17.12.4.2, 17.22.3.1 et 17.22.3.4.2 et le tableau 17.2.)

Alliage et trempe	Produit	Épaisseur, mm		Résistance minimale, MPa			
		>	≤	$F_u$	$F_y$	$F_{wu}$	$F_{wy}$
5052-H32	Tôle, plaque	0,40	50,00	215	160	170	65
5083-H116	Tôle, plaque	1,60	40,00	305	215	270	115
5086-H116	Tôle, plaque	1,60	50,00	275	195	240	95
5086-H321	Tôle, plaque	1,60	8,00	275	195	240	95
6005A-T61	Extrusion	—	25,00	260	240	165	90
6063-T5	Extrusion	—	12,50	150	110	115	55
6063-T6	Extrusion	—	25,00	205	170	115	55
6061-T6, -T6510, -T6511	Extrusion	toutes	—	260	240	165	80* 105†
6061-T6	Tôle	0,15	6,30	290	240	165	105
6061-T651	Tôle, plaque	6,30	100,00	290	240	165	80* 105†
6082-T6, -T6511	Extrusion	5,00	150,00	310	260	190	110

\*Moyennant soudage avec fil plein 4043 dans les parties ayant plus de 9,5 mm d'épaisseur.

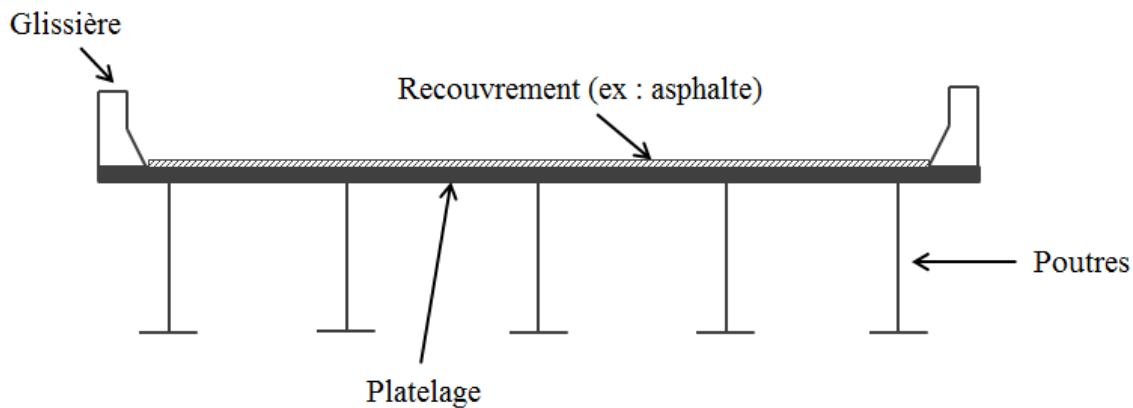
†Moyennant soudage avec fil plein 5356 ou fil plein 4043 dans les parties n'ayant pas plus de 9,5 mm d'épaisseur.

*Figure 2.1 : Résistances selon la norme CAN/CSA-S6-14 des différents alliages d'aluminium permis*

## 2.2 Platelage en aluminium

### 2.2.1 Généralité

Le platelage, souvent recouvert d'une couche d'asphalte, repose sur les poutres d'un tablier de pont à dalle sur poutres. Une section transversale typique d'un pont à dalle sur poutres avec poutres en acier est présentée à la Figure 2.2.



*Figure 2.2 : Section transversales typique d'un pont à dalle sur poutres*

Dans la grande majorité des cas, le platelage est une dalle de béton. Celle-ci résiste conjointement avec les poutres au moment flexionnel longitudinal grâce à la connexion anti-glissement développée pour rattacher la dalle aux poutres. Il y a donc action composite entre le platelage et les poutres. Le platelage peut également être en bois. Bien souvent, ce dernier type de platelage est plutôt utilisé pour les ponts peu achalandés, et aucune action composite n'est développée. Il existe également un platelage entièrement fait en acier appelé tablier orthotrope en acier (Martin, 2015). Ce type de platelage est relativement nouveau. L'action composite peut également être réalisée entre le platelage et les poutres en acier.

Enfin, il y a le platelage en aluminium. Ce dernier est fait d'extrusions d'aluminium soudées les unes aux autres. Bien souvent, les extrusions ont des formes géométriques relativement complexes (voir section 2.2.2). Les extrusions peuvent être installées longitudinalement ou transversalement aux poutres. Les platelages en aluminium peuvent reposer sur des poutres en acier, comme c'est le cas pour l'étude de ce mémoire. Dans la très grande majorité des cas, la connexion avec les poutres est non composite, c'est-à-dire



que le platelage n'est pas considéré dans le calcul de la résistance au moment flexionnel longitudinal. Il vient seulement transférer transversalement les charges aux poutres. Toutefois, il possède plusieurs autres avantages, dont sa légèreté et sa rapidité d'installation. Les avantages et désavantages sont présentés aux sections 2.2.3 et 2.2.4. Des exemples de platelages d'aluminium ainsi que leurs applications sont donnés à la section suivante.

## 2.2.2 Exemples

Quelques exemples de platelage en aluminium sont montrés dans cette section. Les trois pays ciblés sont ceux qui ont été visités par la délégation québécoise envoyée par le regroupement AluQuébec dans le cadre d'une mission d'exploration sur les marchés actuels des platelages en aluminium (Beaulieu et col., 2015).

### 2.2.2.1 Suède

En Suède, deux types d'extrusion ont été développés, une extrusion de 50 mm de hauteur et une autre de 100 mm, dépendamment de l'utilisation prévue (Svensson & Peterson, 1990). Le platelage a été conçu par le professeur Svensson, et a, par après, été racheté par la compagnie SAPA. Les extrusions sont présentées à la Figure 2.3.

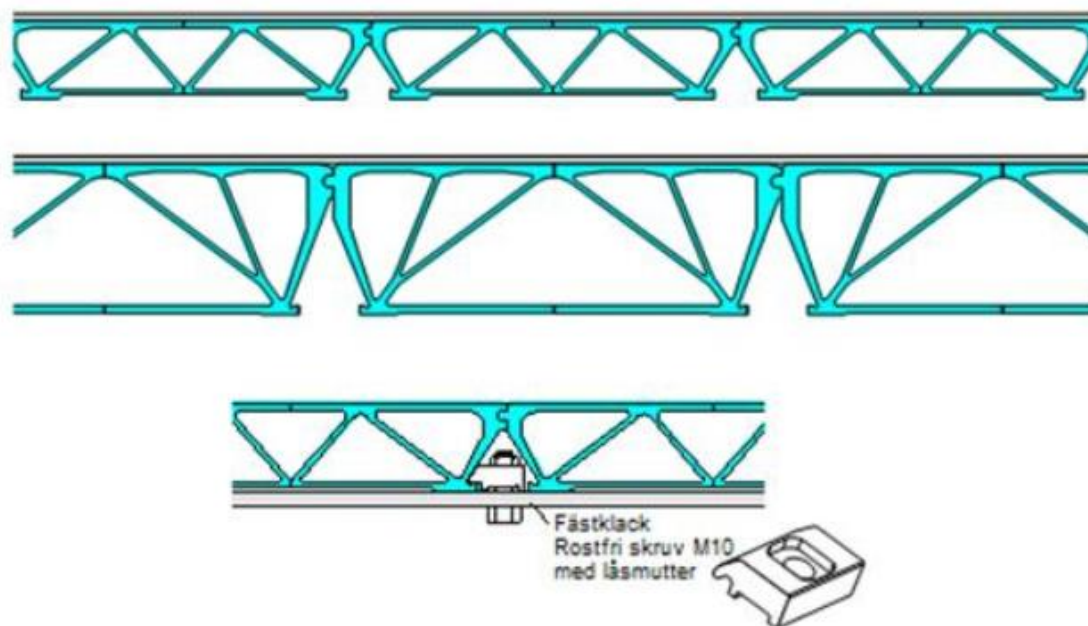


Figure 2.3 : Illustration de l'extrusion de 50 mm de hauteur (haut) et de 100 mm (bas) fabriqué par SAPA et utilisé en Suède, tirée de Beaulieu et col. (2015)

Ce platelage a été utilisé dans plus de 70 ponts (Beaulieu et col., 2015). La majorité de ces ponts sont soit des ponts tournants, soit des ponts à bascule. Il a la caractéristique de n'avoir aucune soudure, afin de réduire les risques de rupture en fatigue. L'aluminium a une faible résistance en fatigue lorsque du soudage par méthode traditionnelle est utilisée. Les soudures diminuent la résistance mécanique du matériau, et créent des microfissures qui peuvent entraîner la rupture en fatigue. Les extrusions sont donc glissées dans le sens de l'extrusion et s'emboîtent l'une dans l'autre. Un mouvement de rotation est donc permis entre les extrusions, ce qui peut causer parfois des fissures dans la surface de roulement, surtout lorsque l'asphalte est utilisé. Plusieurs autres extrusions doivent être également utilisées afin d'assembler les panneaux du platelage sur les poutres en place. Une illustration des différentes extrusions disponibles est montrée à la Figure 2.4.



*Figure 2.4 : Présentation des différentes extrusions disponibles pour l'utilisation comme platelage, tirée de Beaulieu et col. (2015)*

Le platelage de Svensson a été pensé afin de pouvoir être rattaché aux poutres existantes. Les extrusions sont toujours placées transversalement aux poutres (Arrien, 1995).

### 2.2.2.2 Pays-Bas

Au Pays-Bas, c'est la compagnie *Bayards* qui est le principal acteur dans ce domaine. Cette compagnie a une volonté d'introduire le côté architectural dans leurs ouvrages d'art, ce qui permet d'élargir les possibilités d'utilisation de l'aluminium. Une grande diversité de profilés d'extrusion est disponible. Ainsi, la conception des extrusions est souvent faite au cas par cas, dépendamment de son utilisation.

Un exemple de leurs réalisations est le pont Uiver, au-dessus d'un des canaux d'Amsterdam. Ce pont à bascule avait comme particularité d'avoir un contrepoids très proche de l'eau, comme il est possible de le voir à la Figure 2.5. Pour utiliser son système de levage mécanique sans contrepoids, le nouveau pont ne devait donc pas être trop lourd. C'est pourquoi la solution d'utiliser de l'aluminium s'est imposée (Beaulieu et col., 2015).



*Figure 2.5 : Pont Uiver, aux Pays-bas, tirée de Beaulieu et col. (2015)*

### 2.2.2.3 États-Unis

Dans les années 90, la compagnie *Reynolds Metals* a développé plusieurs types d'extrusion en aluminium pour la création de platelages, notamment l'extrusion montrée à la Figure 2.6.



*Figure 2.6 : Photographie de l'extrusion développée par Reynolds Metals, tirée de Osberg et Vachon (2014)*

C'est d'ailleurs cette extrusion qui a été utilisée pour la réhabilitation du Corbin Bridge, un pont historique suspendu qui passe au-dessus de la rivière Juniata, à Huntington en Pennsylvanie. Le pont avait une limite de capacité de charge vive d'environ 7 tonnes, ce qui est très restrictif (Beaulieu et col., 2015). Étant donné son caractère historique, un désir de conserver le plus possible la structure existante était présent. L'option de l'insertion d'un platelage en aluminium a ainsi été retenue, puisqu'elle permettait de limiter le poids mort sur la structure. Seul le tablier a été remplacé, les extrusions furent installées transversalement aux nouvelles poutres en aluminium. L'allègement du pont a permis d'augmenter la limitation de la charge vive à 24 tonnes (Beaulieu et col., 2015) ; une augmentation de plus de 300% a donc été possible grâce à ces travaux de réhabilitation.

Aujourd'hui la compagnie *Reynolds Metals* a laissé sa place à la compagnie *Alumabridge*, qui a d'ailleurs racheté l'extrusion de 8 pouces développée par *Reynolds Metals*. La compagnie *Alumabridge* a également conçu un nouveau profilé d'extrusion en aluminium pour le ministère des transports de la Floride. En Floride, il existe plusieurs ponts levants ou à bascule avec des platelages en grillage d'acier évoluant dans des environnements salins propices à la corrosion. Ce ministère a donc voulu se tourner vers une solution plus durable, soit l'aluminium, à cause de sa bonne résistance à la corrosion et sa légèreté. Le profilé développé a une hauteur de 5 pouces. Une photographie de l'extrusion est donnée à la Figure 2.7.



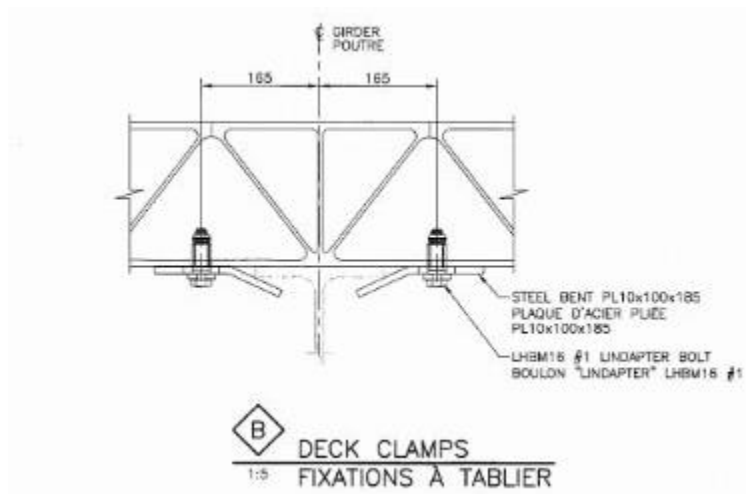
*Figure 2.7 : Photographie montrant le profilé de 5 pouces d'Alumabridge, tirée de Beaulieu et col. (2015)*

#### 2.2.2.4 Québec

Un des premiers ponts entièrement fait en aluminium a été construit au Québec durant les années 50. C'est le pont d'Arvida, au Saguenay. Une représentation du pont est donnée à l'Annexe A (Potvin, 2006). Ce fût et c'est encore le plus long pont au monde dont la structure portante est entièrement faite en aluminium, avec 91,5 m de portée (MCC, 2013).

Depuis, l'aluminium n'a pas occupé une grande place dans le domaine des ouvrages d'arts. Ce n'est que récemment que le MTMDET a décidé d'investir dans ce type de platelage. Cette décision du MTMDET s'inscrit en fait dans la Stratégie québécoise du développement de l'aluminium (SQDA) 2015-2025, mise sur pied par le gouvernement québécois. Pour le premier essai d'utilisation de platelage d'aluminium au Québec, c'est le platelage de 8 pouces d'Alumabridge qui a été utilisé. Pour débiter, le projet pilote visait un pont de courte portée, avec peu de trafic. C'est le pont acier-bois à Saint-Ambroise au Saguenay qui a été choisi. Le platelage en aluminium venait remplacer l'ancien platelage en bois.

Pour le projet pilote du pont Saint-Ambroise, les extrusions étaient posées longitudinalement par rapport aux poutres. Aucune action composite n'a été développée. La connexion entre les poutres et les extrusions se faisaient à l'aide de plaques d'acier galvanisé pliées, comme il est possible de voir à la Figure 2.8, tirée des plans de construction réalisés par MMM Group pour le pont Saint-Ambroise.



*Figure 2.8 : Connexion entre les poutres et le platelage pour le pont Saint-Ambroise, tirée de MMM Group (2014)*

### 2.2.3 Avantages

L'utilisation d'un platelage en aluminium, autant pour la réhabilitation que pour la nouvelle construction, comprend plusieurs avantages. Ces avantages sont présentés ci-dessous.

#### - **Légèreté**

Le principal avantage de l'aluminium réside dans sa légèreté. L'aluminium est environ 3 fois plus léger que l'acier (Siwowski, 2014). À titre d'exemple, pour une même résistance, une poutre en I en aluminium serait deux fois plus légère que celle en acier malgré le fait que les dimensions de la poutre en aluminium seraient plus grandes pour compenser son plus faible module de Young (Beaulieu, 2003). Le Tableau 2.2 présente les comparaisons des poids avec les autres types de platelages utilisés.

Tableau 2.2 : Comparaison des poids avec les différents types de platelage

	<b>Aluminium</b>	<b>Acier</b>	<b>Bois</b>	<b>Béton</b>
		<b>Structural</b>	<b>Épinette-Pin-Sapin (É-P-S)</b>	<b>Armé</b>
<b>kg/m<sup>3</sup></b>	2700	7850	600	2450
	AlumaBridge	Canam pont	Platelage en madriers	Pour une dalle de 200 mm
<b>kg/m<sup>2</sup></b>	90 à 110	200 à 285	116,7	490
<b>Rapport</b>		2,00	1,17	4,90
<b>Source masse volumique</b>	Beaulieu (2013)	Beaulieu (2013)	Manuel de conception des structures, MTMDET (2016)	CAN/CSA-S6-14, (2014)
<b>Source masse surfacique</b>	Alumabridge (2017)	B. Vincent & Laoubi (2012)	Cecobois (2017)	CAN/CSA-S6-14 (2014)

Cet avantage permet de faciliter le transport des éléments du platelage et la manipulation en chantier peut simplement être effectuée à l'aide d'une grue. La légèreté permet également de réduire les charges qui sont transmises aux fondations. Dans le cas où la résistance du sol en place est faible, cet avantage revêt alors une importance considérable.

Enfin, cet avantage de l'aluminium permet d'augmenter la capacité portante d'un pont existant. En venant remplacer le platelage existant par un platelage en aluminium, il est possible de réduire les charges mortes du pont, et ainsi permettre une plus grande capacité portante. Cette particularité devient d'autant plus utile dans le cas de pont avec limitation de charges vives, comme ce fût le cas pour le pont historique suspendu *Corbin Bridge*, à Huntington en Pennsylvanie (voir section 2.2).

Les types de ponts où la légèreté revêt plus d'importance sont les ponts levants, à bascule ou tournants, puisque le poids propre de la structure est déterminant dans la conception de telles structures. La mise en œuvre d'un platelage en aluminium devient également intéressante dans le cas de ponts historiques avec limitation de charges vives. En plus d'augmenter la charge vive permise, le remplacement d'un élément, tel que le platelage, par un élément plus léger permet de prolonger la vie de la structure sans vraiment changer l'aspect original du pont.

- **Bon ratio poids / résistance**

Malgré un module de Young plus faible que celui de l'acier, le ratio du module de Young sur la masse est relativement proche de celui de l'acier. (Siwowski, 2014)

- **Résistance à la corrosion atmosphérique**

Au contact de l'oxygène, l'aluminium crée naturellement une mince couche d'oxydation à sa surface. Cette couche s'appelle *alumine* (Beaulieu, 2003). L'aluminium devient alors passif face à son environnement. Cette couche se renouvelle sans cesse dès que l'aluminium se retrouve à nu dans un milieu oxydant, tel l'air ou l'eau. L'épaisseur de la couche d'oxydation varie entre 5 à 10 nm (Beaulieu, 2003). Elle a la caractéristique d'être plus dure et résistante à la chaleur que l'aluminium. Elle permet également d'imperméabiliser presque complètement la surface. La vitesse de dégradation de cette couche d'oxyde est influencée principalement par le pH du milieu dans lequel l'aluminium se retrouve ainsi que du type d'alliage utilisé. En présence d'un milieu ayant un pH relativement neutre, soit entre 5 et 9 environ, la couche d'oxyde est relativement stable, ce qui signifie que sa vitesse de dégradation est faible. Ainsi, en présence d'eau douce, soit un pH d'environ 7, ou même d'eau de mer, soit un pH tournant autour de 8-8,5, l'aluminium garde une bonne résistance à la corrosion (Beaulieu, 2003). C'est pourquoi l'aluminium nécessite peu d'entretien, puisqu'aucune peinture de zinc ne doit y être appliquée pour être protégé de la corrosion atmosphérique comme c'est le cas pour certain type d'acier. Il y a donc une réduction des coûts d'entretien comparativement à un plâtrage en acier ou en béton.



### - Durabilité

La durée de vie utile d'un platelage en aluminium est estimée à 75 ans et plus, soit la durée d'existence visée pour un pont, en moyenne. Le Tableau 2.3 compare la durée de vie approximative de différents types de platelage. Les durées de vie pour le platelage en bois et en béton proviennent de discussion avec l'ingénieur du MTMDET en charge des projets de recherche sur les platelages en aluminium, Dominic Fortin.

Tableau 2.3 : Comparaison des durées de vie des différents types de platelage

	<b>Aluminium</b>	<b>Acier</b>	<b>Bois</b>	<b>Béton</b>
<b>Durée de vie (année)</b>	75 et plus	75 et plus	20	50
<b>Source</b>	Patton, (2015) Miami International Inc., & The Technology Strategies Group, (2013)	Lévesque (2016)	Fortin (2016)	Fortin (2016)

### - Maniabilité

Une manière de compenser un plus faible module de Young est d'augmenter l'inertie d'une section. La maniabilité de l'aluminium permet de produire différentes formes et d'optimiser ainsi le ratio poids/efficacité structurale. De plus, cette flexibilité dans la forme des extrusions permet également d'optimiser les coûts reliés au matériau.

### - Protection des éléments structuraux sous le platelage

L'aluminium est un matériau imperméable. Ainsi, le platelage en aluminium permet de protéger les éléments structuraux sous le platelage, contrairement à un platelage en bois ou en béton, qui sont perméables.

### - Écologique et recyclable

L'aluminium peut être recyclé sans diminuer ses capacités. En fait, 95% de l'aluminium employé dans l'industrie de la construction est recyclé (Tindall, 2008). L'énergie requise pour fabriquer un produit à partir d'aluminium recyclé est égale à 5% de l'énergie requise

pour fabriquer l'aluminium primaire. (Siwowski, 2014). Au Québec, l'aluminium primaire est produit avec de l'énergie renouvelable et durable, soit l'hydroélectricité.

- **Bonne résilience à basse température**

L'aluminium a une bonne résilience en basse température. La résilience est la capacité à absorber l'énergie sous l'effet d'un choc. Certains alliages d'acier ont à basse température une résilience très faible et peuvent alors passer d'un comportement ductile à fragile. Ce n'est pas le cas pour l'aluminium. En fait, la résistance de l'aluminium augmente légèrement à basse température (Beaulieu, 2013).

- **Rapidité d'installation**

Le platelage en aluminium est constitué d'éléments préfabriqués en usine, leur installation est donc rapide et peut se faire seulement à l'aide d'une grue ou d'un système de rail sur roue, d'autant plus que l'aluminium est un matériau léger. Il a donc un avantage sur une dalle en béton, qui requiert un temps de cure d'une vingtaine de jours avant d'être en fonction. Cette rapidité d'installation peut devenir très avantageuse lorsque le pont réhabilité est très achalandé.

#### 2.2.4 Désavantages

Il existe également certains inconvénients et défis liés à l'utilisation des platelages en aluminium. Ces derniers sont présentés ci-dessous.

- **Coût initial élevé**

La production de l'aluminium requiert une forte demande en énergie, ce qui rend le coût de l'aluminium très élevé. Le Tableau 2.4 présente les différences de coûts entre les différents types de platelage possibles.

Tableau 2.4 : Comparaison des prix avec les autres types de platelage

	<b>Aluminium</b>	<b>Acier</b>	<b>Bois</b>	<b>Béton</b>
	AlumaBridge	Canam ponts	Platelage en madriers	Pour une dalle de 200 mm
<b>\$/m<sup>2</sup></b>	1500	2700 à 3700	223,675	296,05
<b>Rapport</b>		0,5	6,7	5,1
	<i>*Ne comprend pas l'installation et le transport</i>	<i>* Ne sait pas ce que comprend exactement ce prix, estimé grossier</i>	<i>* Prend en compte installation et transport</i>	<i>* Prend en compte installation et transport</i>
<b>Source</b>	Patton, (2015) Miami International Inc., & The Technology Strategies Group, (2013)	Ampleman (2016)	Liste des prix suggérés, MTMDET (2016)	Liste des prix suggérés, MTMDET (2016)

Le prix pour le tablier orthotrope en acier est une estimation donnée par Maxime Ampleman de chez Canam Pont, le principal fournisseur de ce type de tablier au Canada. Cependant, l'estimation est assez grossière, car le fournisseur ne voulait pas faire de réelle estimation pour un projet fictif où le tablier orthotrope n'aurait pas vraiment sa place. Elle permet toutefois d'évaluer la différence de coût. Il semblerait que le tablier orthotrope soit plus cher que le platelage en aluminium. L'hypothèse avancée serait que ce prix élevé est une conséquence des nombreuses soudures nécessaires au tablier orthotrope. Toutefois, comparativement au béton et au bois, le prix du platelage en aluminium est beaucoup plus élevé.

#### - **Action composite difficile à réaliser**

Dans le cas où un platelage en aluminium est utilisé, l'action composite avec les poutres est difficile à obtenir puisque la forme des extrusions ne permet pas un accès facile pour le boulonnage. De plus, le coefficient de dilatation de l'aluminium est deux fois plus élevé que celui de l'acier. Dans un contexte d'un pont mixte acier et aluminium, sous les conditions de températures extrêmes du Québec, les contraintes générées par cette différence de dilatation peuvent s'avérer problématiques. Enfin, l'aluminium reste un

matériau malléable, et une attention particulière doit être faite pour ne pas créer des déformations plastiques lors du serrage des boulons pour développer la connexion anti-glissement demandée par la norme pour une connexion composite. D'autres considérations doivent être prises en compte, notamment ce qui concerne la corrosion galvanique et l'installation en chantier.

Toutefois, plusieurs recherches sont réalisées afin de répondre aux problématiques liées au développement de cette connexion composite (Leclerc, 2018)

#### - **Corrosion galvanique**

Pour qu'une corrosion galvanique débute, il faut avoir trois agents en même temps, soit la présence d'un électrolyte comme l'eau ou l'eau de mer, une connexion entre les deux métaux et un potentiel de dissolution élevé. Si un de ces agents n'est pas présent, il n'y aura pas de corrosion galvanique (Beaulieu, 2013).

La manière la plus simple de prévenir la corrosion galvanique est de galvaniser ou métalliser les pièces en acier qui doivent être en contact avec l'aluminium. Ces deux méthodes permettent de protéger l'acier à l'aide d'une couche de zinc qui se corrodera à la place de l'aluminium, le zinc étant plus électronégatif que l'aluminium. Il faut toutefois s'assurer que l'épaisseur de la couche de zinc soit suffisante pour le temps d'utilisation nécessaire. Les deux méthodes diffèrent toutefois par le procédé de liaison entre le zinc et l'acier. La galvanisation s'effectue à l'aide de grand bassin de zinc fondu, et la pièce y est plongée afin d'être entièrement recouverte. La liaison est alors chimique et le zinc devient partie intégrante de la pièce d'acier. La métallisation utilise plutôt un système de projection à froid afin de projeter à grande vitesse le zinc sur la pièce. La liaison est alors de type mécanique, et la préparation de surface joue un très grand rôle sur l'effectivité de la couche de zinc (Ampleman, 2016). Cette méthode a comme avantage de pouvoir être faite sur de très grandes pièces, tandis que la galvanisation est limitée par la grandeur des bassins de trempage.

Une autre manière d'éviter la corrosion galvanique est de s'assurer d'avoir toujours un isolant entre l'acier et l'aluminium. Cette méthode peut être utilisée conjointement avec la galvanisation ou la métallisation pour plus de sûreté. Enfin, il est important de porter une

attention particulière à isoler la connexion de l'eau, afin d'éviter de débiter le processus de corrosion.

#### - **Vibration**

La légèreté de l'aluminium est un avantage très important, mais entraîne également des problèmes de vibration, qui peuvent indisposer les usagers de la route. Ce problème est particulièrement important pour les passerelles piétonnières.

#### - **Surface de roulement**

La surface de roulement préconisée avec un platelage en aluminium est un mélange d'époxy et de granulats qui vient adhérer directement à la surface lisse du dessus des panneaux d'extrusions d'aluminium. Le principal avantage de ce type de revêtement réside dans sa légèreté. Le poids de ce type de revêtement est de 10 à 13 kg/m<sup>2</sup> (RS Clare & Co Ltd, 2017) comparativement à 120 kg/m<sup>2</sup> pour une couche d'asphalte de 50 mm (CSA, 2014a). Bien souvent, ce critère est primordial lorsqu'un platelage en aluminium est utilisé.

Le désavantage de ce type de recouvrement réside dans le coût du produit ainsi que sa durée de vie. Pour un coût plus important que l'asphalte, sa durée de vie reste relativement semblable à celle-ci, soit entre 10 et 15 ans (Patton, 2015). Les principaux fournisseurs sont *Bimagrip*, qui est généralement celui utilisé au Québec pour ce type de recouvrement (Caron, 2016), et *Flexolith*, qui est la compagnie affiliée avec *Alumabridge* (Alumabridge, 2017). De plus, une attention particulière doit être portée afin d'assurer un bon écoulement de l'eau. La norme prescrit une pente de 2% afin de permettre à l'eau de s'écouler. Habituellement, avec un platelage en béton traditionnel, cette pente est soit atteinte directement avec le recouvrement d'asphalte, en mettant une couche plus épaisse au centre, et qui diminue vers les côtés extérieurs, soit en jouant avec la forme du coffrage et la hauteur des assises des poutres (Fortin, 2016). Malheureusement, avec un platelage en aluminium, cette flexibilité de forme selon l'axe de la section transversale du platelage est plus difficile à atteindre.

### - **Adaptations aux conditions existantes du terrain**

Dans un contexte de réhabilitation, une importante difficulté réside dans l'adaptation aux conditions existantes du terrain. Plusieurs paramètres de conception ne peuvent être modifiés, tels que la portée libre, la courbure du pont, l'espacement des poutres, etc. L'option du platelage en aluminium reste une option peu flexible pour s'adapter à ce genre de contraintes.

### - **Fatigue**

Le phénomène de fatigue se produit dans des pièces mécaniques ou des ouvrages soumis à des sollicitations cycliques. Les ruptures en fatigue s'initient par des défauts, telle une fissure. Sous chargement cyclique, la fissure se propage, allant parfois jusqu'à la rupture. Ce type de rupture est dit fragile et doit être évité. Les fissures s'initient souvent dans les cordons de soudure. Une soudure comporte des impuretés causées par des bulles d'air emprisonnées, par de la saleté ou par des particules d'alumine et ces impuretés peuvent générer des amorces de fissures. L'aluminium est plus altéré par l'effet de la soudure que l'acier, ce qui fait qu'il est plus vulnérable à la fatigue. Contrairement à l'acier, l'aluminium ne possède pas de limite d'endurance à partir d'un certain nombre de cycles (CSA, 2014b). Sa résistance à la fatigue est donc beaucoup plus faible que celle de l'acier.

### - **Connexion des glissières de sécurité avec le platelage**

La connexion entre les glissières de sécurité et le platelage n'est pas encore développée. Le défi dans la conception de cette connexion réside dans le fait que lors de la collision d'un véhicule, ce doit être la connexion qui dissipe l'énergie en se déformant, et non pas le platelage. Si le platelage devait être déformé plastiquement, le changement de l'extrusion abimée entraînerait des coûts importants.

## 2.3 Largeur effective

### 2.3.1 Généralité

Le concept de largeur effective est utilisé dans le cas où il y a action composite entre la poutre et le platelage. La largeur effective correspond à la largeur considérée dans la section résistante transversale de la poutre composite. Cette notion de largeur effective a été amenée afin de pouvoir utiliser la théorie des poutres pour les calculs de la résistance des poutres composites. La théorie des poutres admet que la répartition des contraintes dans le plan longitudinal sur la largeur de l'aile de la poutre composite est uniforme (Timoshenko & Goodier, 1970). Cependant, la distribution réelle des contraintes le long de la largeur de l'aile est non uniforme à cause du phénomène de décalage en cisaillement. Ce phénomène est expliqué dans la section 2.3.3. La largeur effective correspond donc à la largeur équivalente pour laquelle la contrainte maximale est uniforme, soit lorsque l'aire ACDEF est égale à l'aire GHJK à la Figure 2.9 (Johnson, 1975).

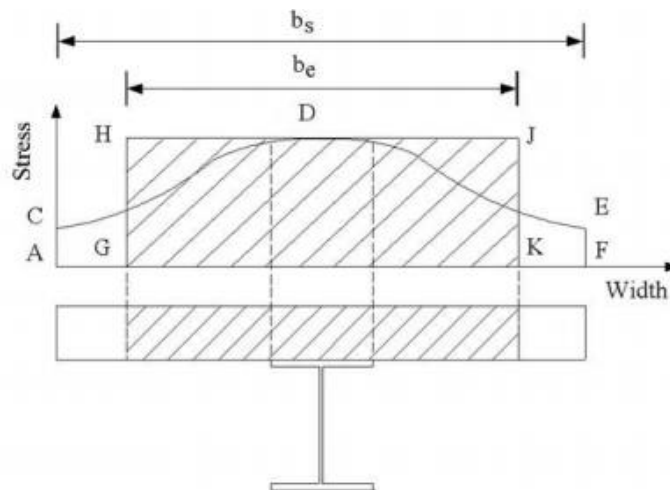


Figure 2.9 : Représentation de la largeur effective, adaptée de Salama et Nassif. (2010)

C'est un concept important dans la conception d'un pont. Une plus petite largeur effective signifie une réduction de l'aire résistante de la poutre composite. Il a un impact sur le calcul du moment ultime, sur la résistance en fatigue et sur le comportement en service puisque la théorie des poutres est appliquée pour tous ces états limites.

### 2.3.2 Recherches antérieures

Plusieurs recherches ont été réalisées concernant la largeur effective. Dans les années 70, Timoshenko et Goodier (1970) se sont basés sur la théorie des poutres ainsi que sur la méthode de l'énergie de déformation afin de développer des équations permettant de calculer la largeur effective d'une poutre. L'exemple utilisé par Timoshenko et Goodier est celui d'une poutre ayant des ailes minces et larges comparativement à la hauteur de celle-ci. Une représentation de cette poutre, tirée de leur ouvrage *Theory of elasticity*, est donnée à la Figure 2.10. La longueur  $\lambda$  correspond à la largeur effective, sous laquelle la répartition des contraintes  $\sigma_x$  est uniforme, comme c'est illustré à la Figure 2.10. La poutre est soumise à un effort de flexion, où  $N$  représente les efforts de traction et de compression provoqués par le moment, et  $e$  la distance entre ces deux forces. La longueur  $l$  représente la moitié de la portée de la poutre.

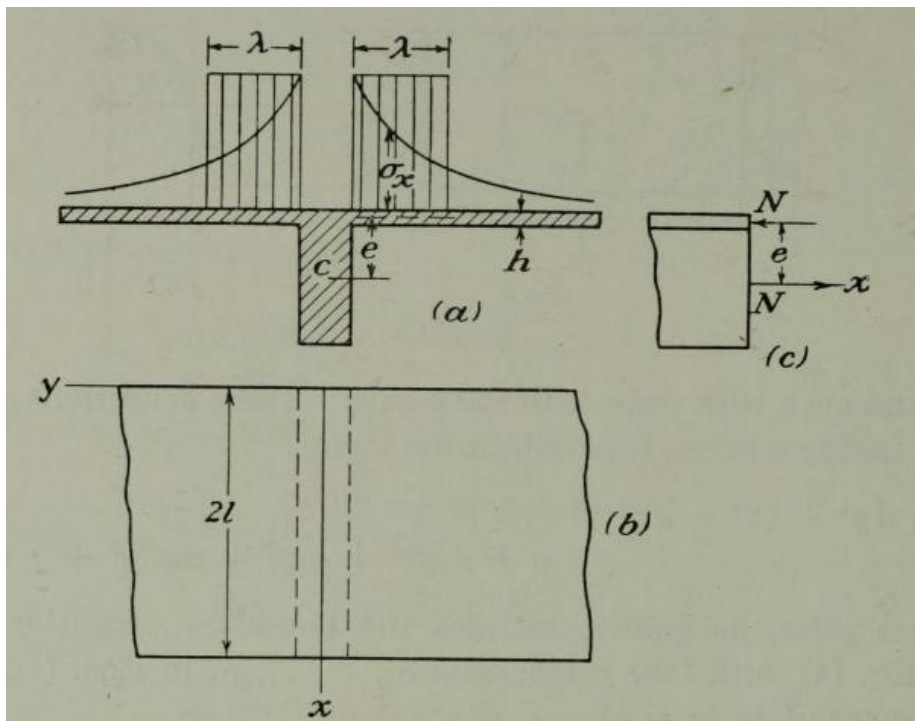


Figure 2.10 : Représentation de la largeur effective, tirée de Timoshenko et Goodier. (1970)

Ainsi, dans le cas où une charge est appliquée au centre de la portée, il leur a été possible de déterminer la largeur effective  $2\lambda$  avec l'équation suivante.



$$2\lambda = 0,85 * \frac{4l}{\pi(3 + 2\nu - \nu^2)} \quad \text{Équation 1}$$

où

$\lambda$  = Largeur effective telle que définie à la Figure 2.10 (*Unité de longueur*) ;

$\nu$  = Coefficient de Poisson ;

$l$  = Longueur de la portée de la poutre (*Unité de longueur*).

La méthodologie proposée par Timoshenko et Goodier afin de déterminer la largeur effective est relativement complexe, car elle utilise des notions de mathématiques assez poussées. Elle repose, entre autres, sur la méthode d'énergie des contraintes (*Strain energy's method*) Toutefois, elle peut s'appliquer à des cas de chargement très vastes et la définition de la largeur effective peut être obtenue à l'aide de formules mathématiques.

Puis, Cheung et Chan (1978) ont utilisé la méthode des bandes finies afin de déterminer la largeur effective. Le type de chargement utilisé était un chargement mobile de camion. Trois types de ponts ont été modélisés, soit un pont à dalle sur poutres avec des poutres en acier en I, un pont à dalle sur poutres avec des poutres-caissons en acier ou en béton et un pont avec caissons multicellulaires. Tous les ponts avaient des portées simples. Plus de 392 modèles de ponts ont été réalisés. L'équation utilisée par Cheung et Chan afin de déterminer la largeur effective se base encore une fois sur la théorie des poutres ainsi que sur les principes de statique. Elle est définie comme suit :

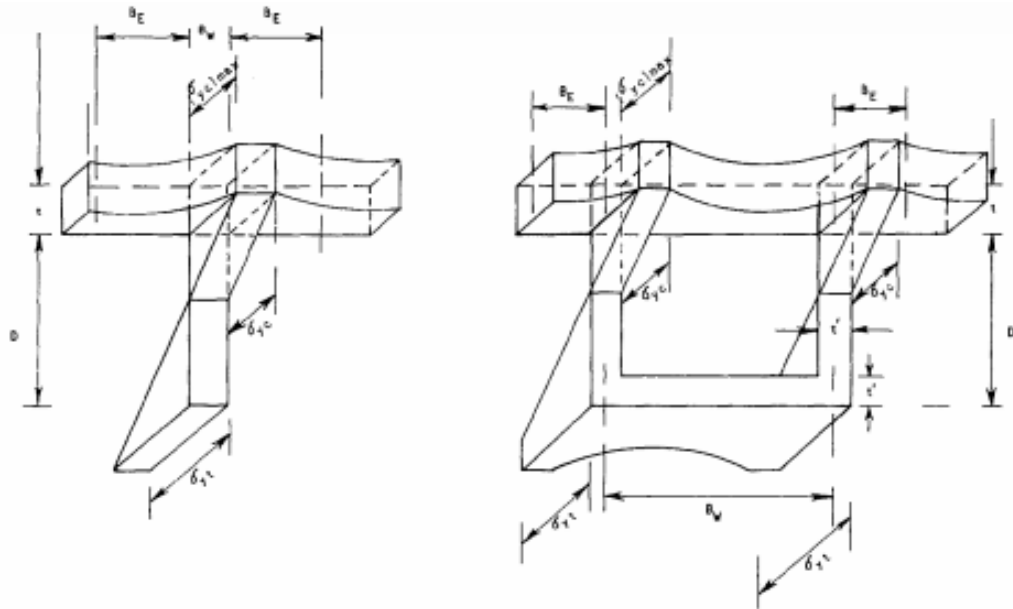


Figure 2.11 : Représentation de la largeur effective, tirée de Cheung et Chan. (1978)

$$B_E = \left[ \frac{F_T}{(\sigma_{yc_{max}} * t_{platelage})} - B_W \right] / 2 \quad \text{Équation 2}$$

où

$B_e$  = Largeur effective telle que définie à la Figure 2.11 (mm) ;

$F_T$  = La force de tension dans la poutre équivalente à la force de compression dans le platelage par équilibre des forces (N) ;

$\sigma_{yc_{max}}$  = Contrainte longitudinale de compression maximale (MPa) ;

$t_{platelage}$  = Épaisseur du platelage (mm) ;

$B_W$  = Largeur de l'âme de la poutre (mm).

Ainsi, à l'aide de leurs résultats obtenus avec leurs modèles de bandes finis, ils ont pu calculer la largeur effective pour plusieurs cas de configurations de ponts. Ils ont réalisés un graphique représentant le rapport de la largeur effective  $B_e$  sur l'espacement des poutres  $B$  en fonction du rapport de la portée  $L$  sur l'espacement des poutres ( $B$ ). Le graphique représentant toutes les courbes est donné à l'Annexe B.

Le code canadien pour les ponts routiers se base sur les courbes élaborées par Cheung et Chan (1978) pour la détermination de la largeur effective. Les équations présentées ci-dessous sont celles prescrites par la norme dans le cas de pont de dalle en béton sur poutre. (CAN/CSA-S6-14, Art.5.8.1)

$$\frac{B_e}{B} = 1 - \left[1 - \frac{L}{15b}\right]^3 \text{ pour } \frac{L}{B} \leq 15 \quad \text{Équation 3}$$

$$\frac{B_e}{B} = 1 \text{ pour } \frac{L}{B} > 15 \quad \text{Équation 4}$$

où

$B_e$  = Largeur effective ou valeur réduite de  $b$  (m);

$B$  = Moitié de la portée transversale d'une dalle de tablier (m);

$L$  = Longueur de travée (m).

La détermination de la largeur effective dans la norme canadienne est gardée dans le domaine élastique pour être plus sécuritaire. Lorsqu'il y a développement de plasticité ou de fissuration, la diffusion des contraintes est plus importante, et alors la largeur effective augmente (Johnson & Anderson, 1993). Les équations élaborées par la norme sont donc prudentes.

De plus, il a été démontré que les paramètres influençant le plus la largeur effective sont la portée, l'espacement des poutres ainsi que le type de chargement (Yam & Chapman, 1968 ; Fahmy, 1985). D'autres éléments peuvent influencer la largeur effective dont l'épaisseur du platelage et la taille des poutres. Toutefois, il a été démontré, entre autres par Moffatt et Dowling (1978) et Cheung and Chan (1978), que ces paramètres ont une faible influence sur la largeur effective comparativement à la portée et l'espacement des poutres.

Également, pour un pont à travées multiples, une distinction peut être faite entre les travées intérieures et extérieures ainsi qu'entre l'endroit où le moment est négatif ou positif. La méthodologie pour déterminer la largeur effective pour les travées continues se base sur les connaissances pour une travée simple (Ahn et col., 2004).

Une autre étude, menée par Chiewanichakorn et col. (2004), propose une nouvelle définition de la largeur effective pour les cas des ponts à travée simple. Pour ce faire, ils ont utilisé la méthode des éléments finis avec le logiciel ABAQUS. Deux hypothèses sont postulées, soit que le moment obtenu à l'aide de la méthode des éléments finis est égale à celui obtenu à l'aide de la théorie des poutres et que l'équilibre des forces et des moments est toujours maintenu. L'équation proposée afin de déterminer la largeur effective est la suivante :

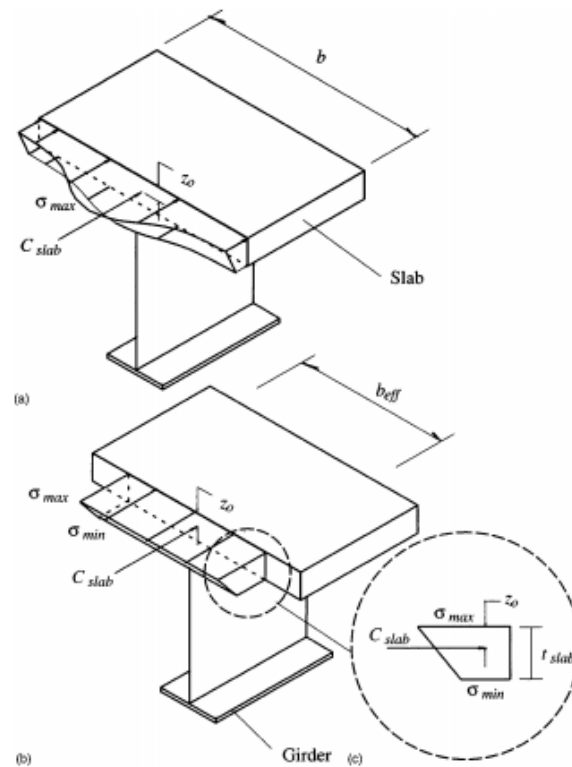


Figure 2.12 : Représentation de la largeur effective, tirée de Chiewanichakorn et col. (2004)

$$b_{eff} = \frac{C_{platelage}}{0,5 * t_{platelage} * (\sigma_{max} + \sigma_{min})} \quad \text{Équation 5}$$

où

$b_{eff}$  = Largeur effective selon la définition donnée à la Figure 2.12 (mm) ;

$C_{platelage}$  = Force de compression dans le platelage (N) ;

$t_{\text{platelage}}$  = Épaisseur du platelage (mm) ;

$\sigma_{\text{max}}$  = Contrainte maximale dans le haut du platelage (MPa) ;

$\sigma_{\text{min}}$  = Contrainte minimale dans le bas du platelage (MPa).

L'équation proposée permet de prendre en compte la distribution linéaire des contraintes longitudinales le long de l'épaisseur du platelage, contrairement à celle proposée par Cheung et Chan (1978) (voir Figure 2.11 et Équation 2).

Enfin, Ahn et col. (2004) ont fait une comparaison des différentes définitions que les codes fournissent de la largeur effective. Les codes étudiés sont le code américain (*American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO*), le code canadien (*Code canadien sur le calcul des ponts routiers, CAN/CSA-S6*), le code britannique (*British Standards Institution, BSI- Part 5*), le code japonais (*Japan Road Association, JRA - Part I and III*) et le code européen (Eurocode 4).

Ainsi, ils ont constaté que tous les codes étudiés présentaient la même approche, soit l'utilisation d'une formulation simplifiée pour le calcul de la largeur effective qui dépend d'une portée dite également effective. Pour les ponts à travée simple, la portée effective correspond à la portée libre du pont. Pour les ponts à travées multiples, la définition de la portée effective propre au code doit être utilisée. Toutefois, la formulation afin de déterminer la largeur effective diffère d'un code à l'autre. Pour l'AASHTO et l'Eurocode 4, la largeur effective est définie selon une liste de valeurs possibles, tandis que le code canadien et le code japonais utilise plutôt des équations. Tandis que le code britannique utilise des tableaux qui sont fonction du ratio de l'espacement des poutres sur la portée pour déterminer la largeur effective.

Ahn et col. ont également regardé quels sont les paramètres influençant la largeur effective pris en compte par chacun des codes. Leurs résultats sont présentés dans le Tableau 2.5.

Tableau 2.5 : Comparaison entre les différents paramètres pris en compte par les codes pour la détermination de la largeur effective

Paramètre pris en compte	AAHSTO	BSI- Part 5	Canadien	Japonais	Eurocode 4
Distinction entre une charge uniformément répartie et une charge ponctuelle	NON	OUI <sup>a</sup>	NON	OUI <sup>b</sup>	NON
Distinction entre les poutres intérieures et extérieures	OUI	OUI	NON	NON	NON
Largeur effective exprimée comme étant d'un seul côté de la poutre	NON	OUI	OUI <sup>c</sup>	OUI	OUI <sup>c</sup>
Distinction entre le M+ et le M-	NON	OUI	NON	OUI	NON
Distinction entre les poutres en I et les poutres caissons	OUI	NON	NON	N/A	N/A
Distinction entre le comportement à l'ultime et en service	NON	OUI <sup>e</sup>	NON	NON	OUI <sup>f</sup>
Valeur modifiée aux supports	NON	OUI	NON	NON	OUI
Valeur modifiée pour le béton fissuré	NON	OUI	NON	NON	OUI

<sup>a</sup> Utilise un chargement uniformément réparti pour les ponts d'autoroute.

<sup>b</sup> Utilise une charge répartie pour seulement les supports intérieurs des poutres continues.

<sup>c</sup> La largeur effective est divisée en partie centrale et en parties latérales.

<sup>d</sup> Utilise différentes dispositions pour les ponts de poutres à caissons segmentaires en béton.

<sup>e</sup> Utilise la largeur effective pour le comportement en service et utilise la largeur totale pour le comportement à l'ultime.

<sup>f</sup> Utilise la largeur effective pour le comportement en service seulement.

### 2.3.3 Décalage en cisaillement

Le décalage en cisaillement est un phénomène qui se produit lorsqu'une ou plusieurs parois d'une pièce assemblée ne sont pas retenues par l'assemblage boulonné ou soudé. Il en résulte une concentration des contraintes dans la ou les parois attachées. Un transfert des efforts des parois non attachées à celle attachées s'effectue donc, et induit des efforts de cisaillement au sein même de la pièce. C'est le phénomène du décalage en cisaillement. Une illustration de cette concentration de contrainte est donnée la Figure 2.13 pour un

assemblage d'une poutre en I avec des plaques. La figure est tirée de l'ouvrage de Beaulieu et col. 2005, *Calcul des charpentes d'acier*.

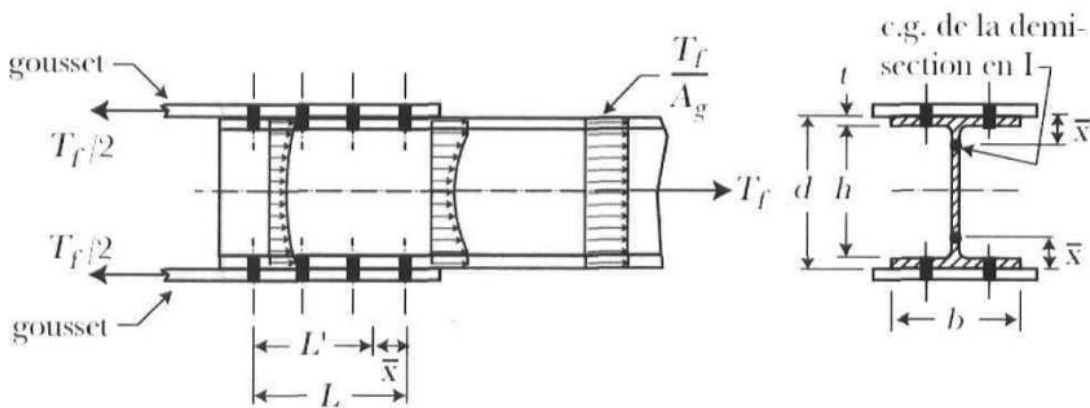


Figure 2.13 : Exemple du phénomène de décalage en cisaillement dans les assemblages, tirée de Beaulieu et col. (2005)

La distribution non uniforme des contraintes, ainsi que le développement de cisaillement dans la pièce même ont pour effet de diminuer la résistance de l'assemblage. (Morin, 2006). Cette perte de résistance va être prise en compte en déterminant une aire nette réduite, exprimée dans la majorité des ouvrages par l'équation suivante (Beaulieu et col., 2005).

$$A_{ne} = \left(1 - \frac{\bar{x}}{L_a}\right) A_n \quad \text{Équation 6}$$

où

$A_{ne}$  = Aire nette réduite de la section transversale ( $mm^2$ ) ;

$\bar{x}$  = Distance entre le plan de cisaillement et le centre de gravité de la section tributaire à l'assemblage ( $mm$ ) ;

$L_a$  = Longueur de l'assemblage ( $mm$ ) ;

$A_n$  = Aire nette de la section transversale ( $mm^2$ ).

Plusieurs autres facteurs viennent influencer le décalage en cisaillement, notamment la longueur de la paroi non reliée, et la longueur de l'assemblage. Plus la paroi non reliée est longue, plus l'effet de décalage en cisaillement est important, le transfert des contraintes

vers la paroi rattachée étant plus important. C'est le paramètre  $\bar{x}$  qui vient prendre en compte l'effet de la longueur de la paroi non reliée. Pour ce qui est de la longueur de l'assemblage, plus celle-ci est grande, plus l'effet du décalage en cisaillement semble diminuer, jusqu'à devenir quasiment nul (Morin, 2006). C'est pourquoi la longueur de l'assemblage est tenue en compte dans l'équation de l'aire nette réduite de la section transversale (voir Équation 7)

## 2.4 Fraction de charge de camion

La notion de fraction de charge de camion est un concept utilisé pour le dimensionnement des poutres de ponts dans la norme canadienne pour les ponts (CAN/CSA-S6). Il désigne la fraction de charge d'un camion reprise par la poutre à l'étude. Cette notion de fraction de charge peut être appliquée autant pour le moment que pour le cisaillement provoqué par le passage du camion. L'expression de la norme donnant le calcul de cette fraction de charge pour les ponts à dalle sur poutres pour l'état limite ultime (ELUL) est donnée à l'Équation 7 (CAN/CSA-S6-14, Art. 5.6.4.3). Les paramètres expliqués ici sont ceux utilisés dans le cas d'un platelage en béton. Une comparaison avec ceux devant être utilisés pour les platelages en aluminium sera faite.

Ainsi, l'équation permettant de déterminer la fraction de charge de camion pour un pont à dalle en béton sur poutres est :

$$FCC = \frac{S}{\gamma_c D_T (1 + \mu \lambda_n)} \geq 1,05 \frac{nR_L}{N} \quad \text{Équation 7}$$

où :

$S$  = Espacement des poutres ( $m$ ) ;

$\gamma_c$  = Coefficient de modification de charge de camion ;

$D_T$  = Largeur de répartition des charges des camions ( $m$ ) ;

$\mu$  = Coefficient de modification de la largeur de voie ;

$\lambda_n$  = Paramètre de largeur de voie ;



$R_L$  = Facteur de modification de charge tenant compte des situations de chargement multiple de voies sur un pont (voir Tableau 3.4) ;

$N$  = Nombre de poutres longitudinales sur la largeur du tablier du pont.

L'espacement des poutres ( $S$ ) est le paramètre qui a le plus d'effet sur la fraction de charge de camion. Plus l'espacement des poutres est grand, plus la fraction de charge du camion reprise par la poutre à l'étude est importante.

Le coefficient de modification de charge de camion ( $\gamma_c$ ) est fonction du rapport de la largeur en porte-à-faux  $S_c$  ( $m$ ) sur l'espacement des poutres  $S$  ( $m$ ). (CAN/CSA-S6-14, Art. 5.6.6.1, Tab. 5.5)

$$\gamma_c = 1,0 \quad \text{si} \quad \frac{S_c}{S} \leq 0,5 \quad \text{Équation 8}$$

$$\gamma_c = 1,25 - 0,5 \frac{S_c}{S} \leq 1,0 \quad \text{si} \quad 0,5 < \frac{S_c}{S} \leq 0,6 \quad \text{Équation 9}$$

Pour la poutre intérieure,  $\gamma_c$  est toujours égale à 1,0. Il a donc seulement une influence pour la poutre extérieure, lorsque le rapport entre la largeur en porte-à-faux sur l'espacement des poutres est supérieur à 0,5. Lorsque ce rapport est supérieur à 0,5,  $\gamma_c$  diminue, ce qui a pour effet d'augmenter la fraction de charge de camion. C'est en effet le cas, puisque plus la largeur en porte-à-faux augmente, plus le camion va pouvoir être centré sur la poutre de rive. Cette dernière doit donc reprendre une plus grande charge de camion.

Le concept de largeur de répartition des charges de camions ( $D_T$ ) est fonction de la largeur du pont (nombre de voies de calcul  $n$ ) ainsi que de la portée libre  $L$  ( $m$ ) de la travée à l'étude. Cette portée libre est définie à l'article 5.6.4.6 de la norme. Dans le cadre de cette étude, seul le cas d'une travée simple a été étudié, à des fins de simplicité. La longueur  $L$  correspond alors à la longueur de la portée du pont.

Dans le cas de l'étude à ÉLUL, le  $D_T$  est déterminé comme suit (CAN/CSA-S6-14, Art. 5.6.6.1, Tab 5.3) :

Poutre intérieure

$$D_T = 4,60 - \frac{3,10}{\sqrt{L + 5}} \quad \text{si } n = 1 \quad \text{Équation 10}$$

$$D_T = 4,60 - \frac{5,30}{\sqrt{L + 5}} \quad \text{si } n \geq 2 \quad \text{Équation 11}$$

Poutre extérieure

$$D_T = 3,30 + \frac{L}{300} \quad \text{si } n = 1 \quad \text{Équation 12}$$

$$D_T = 3,50 + \frac{L}{500} \quad \text{si } n = 2 \quad \text{Équation 13}$$

$$D_T = 3,40 + \frac{L}{500} \quad \text{si } n \geq 3 \quad \text{Équation 14}$$

Plus  $D_T$  sera grand, plus la fraction de charge de camion diminuera. Ce qui est logique, puisque le  $D_T$ , dans la définition du terme, représente la largeur de répartition des charges de camions. Plus cette largeur est grande, mieux sont distribuées les charges de camions aux autres poutres. La poutre à l'étude sera donc moins sollicitée. Une distinction est faite entre la poutre intérieure et extérieure, car la distribution des moments et du cisaillement est non uniforme due au chargement excentrique du camion (CSA, 2014b). Cette distribution dépend notamment de la rigidité flexionnelle et en torsion du tablier. (CSA, 2014b) Une faible rigidité dans tous les cas entraîne une valeur plus faible du  $D_T$ .

Le coefficient de modification de la largeur de voie ( $\mu$ ) est fonction de la largeur de voie carrossable  $W_e$  ( $m$ ), et est calculé comme suit (CAN/CSA-S6-14, Art. 5.6.4.4)

$$\mu = \frac{W_e - 3,3}{0,6} \leq 1,0 \quad \text{Équation 15}$$

Enfin, le paramètre de largeur de voie ( $\lambda_n$ ) est également fonction de la largeur pont (nombre de voies de calcul  $n$ ) ainsi que de la portée libre  $L$  ( $m$ ) de la travée à l'étude. (CAN/CSA-S6-14, Art. 5.6.6.1, Tab 5.3)

Dans le cas de l'étude à ÉLUL, le  $\lambda_n$  est déterminé comme suit :

Poutre intérieure et extérieure :

$$\lambda_n = 0,05 - \frac{0,10}{L} \quad \text{si } n = 1 \quad \text{Équation 16}$$

$$\lambda_n = 0,10 - \frac{0,25}{L} \quad \text{si } n \geq 2 \quad \text{Équation 17}$$

Ce paramètre vient multiplier le coefficient de modification de largeur de voie de calcul.

Dans le cas où un platelage en aluminium est utilisé, c'est le calcul de  $D_T$  qui va changer ainsi que le paramètre de largeur de voie  $\lambda_n$ . Ce dernier va être égal à zéro pour tous les cas étudiés. Cette valeur est plus restrictive, car il vient annuler le paramètre  $\mu$  qui a pour effet d'augmenter le dénominateur dans l'équation du  $FCC$ , et par le fait même diminuer la valeur de ce dernier. Pour ce qui est du  $D_T$ , il doit être déterminé à partir du tableau 5.10 à l'article 5.6.7.4 de la norme S6-14, soit :

$$D_T = 2,40 \quad \text{si } n = 1 \quad \text{Équation 18}$$

$$D_T = 2,55 \quad \text{si } n \geq 2 \quad \text{Équation 19}$$

Ces valeurs sont les plus faibles valeurs recommandées par la norme. Elles sont égales à celles des platelages en madriers de bois données par le tableau 5.8 à l'article 5.6.7.2. L'influence de la portée sur la distribution des efforts (comprise dans le calcul du  $D_T$  pour un platelage en béton) n'est pas prise en compte dans ce cas-ci. La fraction de charge de camion a tendance à diminuer lorsque la portée augmente, car plus la portée est grande, meilleure est la redistribution transversale des efforts (CSA, 2014b). Ainsi, lorsque son effet n'est pas pris en compte, le calcul du  $D_T$  devient encore plus sévère.

Enfin, la détermination de la fraction de charge de camion relève principalement d'équations empiriques, et dépend de plusieurs facteurs. Il est également possible de constater que les paramètres ayant le plus d'impact sur la fraction de charge de camion lorsque l'équation de la norme est utilisée sont l'espacement des poutres  $S$  et le  $D_T$ . Selon l'équation présentée au début de la section pour le calcul du  $FCC$ , le  $D_T$  se retrouve au

dénominateur. C'est pourquoi une faible valeur de  $D_T$  a pour effet d'augmenter la valeur de la fraction de charge de camion de manière significative.

## 2.5 Critique de l'état des connaissances

Il est possible de constater que les connaissances en matière de platelages en aluminium sont encore à leurs débuts. Il existe plusieurs lacunes, notamment concernant les connexions en chantier entre les panneaux de platelage, entre les poutres en acier et le platelage avec ou sans action composite, et avec les glissières de sécurité. De plus, la forme particulière des extrusions ne permet pas autant de liberté qu'avec un platelage coulé en béton, ce qui entraîne une difficulté supplémentaire concernant la pente demandée pour l'écoulement de l'eau. Enfin, par manque de connaissances la norme canadienne des ponts CAN/CSA-S6-14 reste très sévère vis-à-vis les platelages en aluminium concernant le comportement structural de ce type de platelage. Cette sévérité et le manque de précision concernant la conception avec ce type de platelage défavorise l'utilisation du platelage en aluminium.

Ainsi, dans la norme canadienne, seul l'article 17.19.2 parle de la largeur effective du tablier lorsqu'un platelage en aluminium est utilisé. Cet article indique que la largeur effective ne doit pas dépasser l'espacement entre les nervures longitudinales ou le tiers de la portée en absence de méthode d'analyse plus raffinée (CSA, 2014a). La norme s'appuie beaucoup sur ce qui est déjà fait en acier. La largeur effective auquel l'article fait référence est celui du cas de la plaque du platelage qui agit comme semelle supérieure pour une nervure longitudinale, comme ce qui est donné pour les tabliers orthotropes en acier. Aucune définition n'est faite dans le cas où il y aurait action composite entre les poutres et le platelage en aluminium. Toutefois, plusieurs recherches au sein du Centre de recherche sur l'aluminium REGAL en partenariat avec le MTMDET sont en cours de réalisation afin de développer cette action composite. C'est donc une notion qui doit être définie, d'autant plus que la largeur effective a un impact important sur le choix des profilés de poutres.

Enfin, le calcul de la norme pour la fraction de charge de camion pour les platelages en aluminium est très restrictif. Elle prescrit les valeurs de  $D_T$  les plus faibles, soit celles d'un platelage en madrier de bois. Comme il a été vu précédemment, un faible  $D_T$  a pour effet d'augmenter la valeur de la fraction de charge de camion. Une plus grande fraction de

charge de camion entraîne des dimensions de poutres plus importantes, puisque celles-ci doivent résister à de plus grands efforts. L'utilisation de profilés de plus grandes dimensions implique un coût supplémentaire à l'ouvrage.

L'étude de ce mémoire s'attarde plutôt sur les deux derniers points, soit les lacunes de la norme CAN/CSA-S6-14 concernant la largeur effective dans le cas d'une action composite entre le platelage en aluminium et les poutres en acier ainsi que le calcul des fractions de charge de camion, car la méthode de calcul de la norme CAN/CSA-S6-14 donne des valeurs de fraction de charge de camion très prudentes.

# Chapitre 3 Méthodologie utilisée

## 3.1 Introduction

La méthodologie utilisée pour la recherche qui fait l'objet de ce mémoire est basée sur la méthode des éléments finis. Cette méthode comprend plusieurs avantages, dont celui non négligeable de permettre d'effectuer des calculs très complexes en peu de temps. De plus, il est possible d'avoir une bonne estimation du comportement réel d'un système, et ce à moindre coût, comparativement à des tests qui seraient effectués en laboratoire. Dans le cadre de cette maîtrise, l'option de faire des tests en laboratoire n'était pas possible en raison de la faisabilité de reproduire un tablier de pont au complet. Une représentation schématique de la méthodologie utilisée est illustrée à la Figure 3.1.

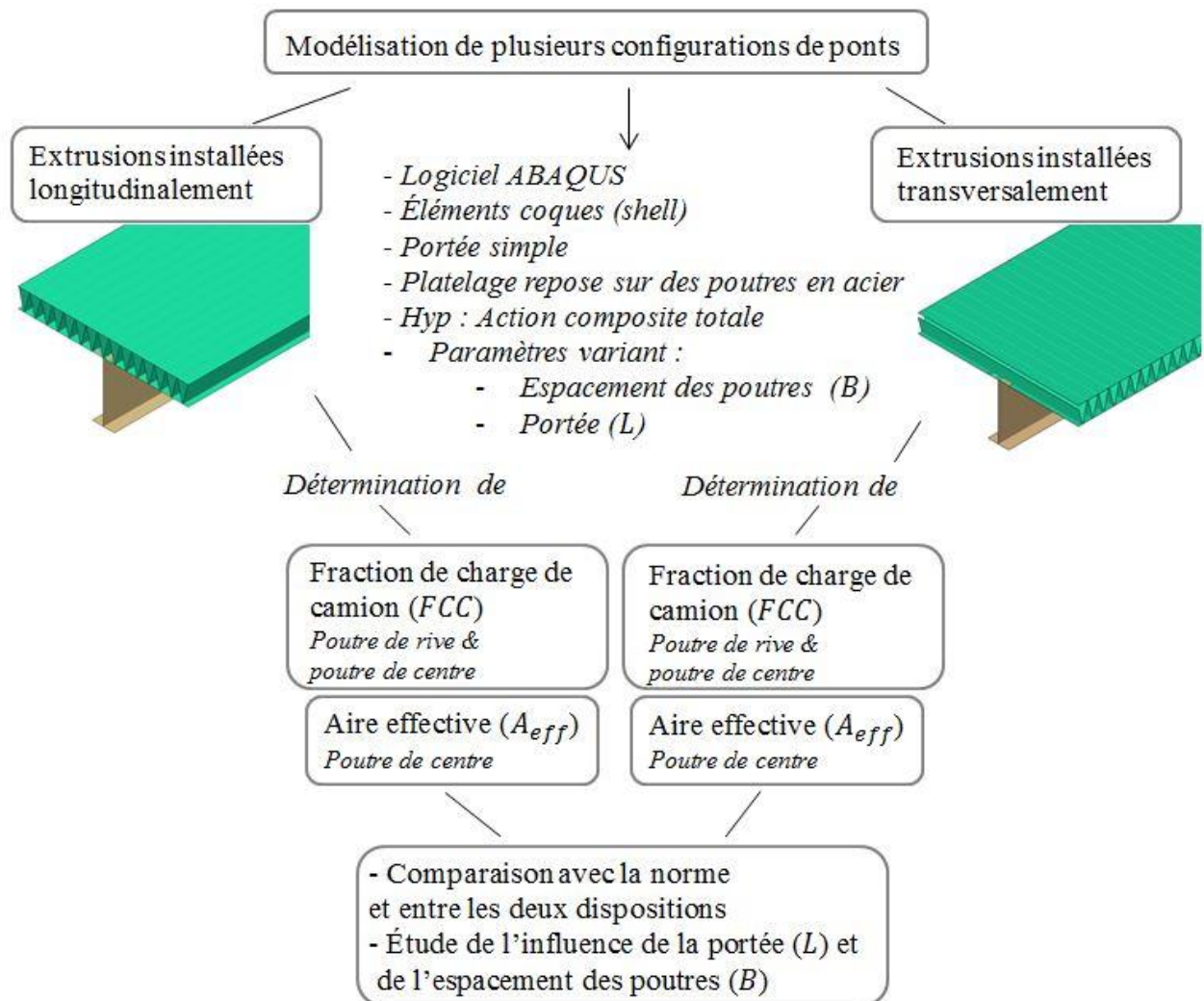


Figure 3.1 : Représentation schématique de la méthodologie utilisée

Le logiciel ABAQUS est utilisé pour effectuer les analyses par éléments finis. Afin de pouvoir étudier la répartition transversale des charges dans le platelage en aluminium, plusieurs configurations de pont sont modélisées.

Les deux paramètres ayant le plus d'impact sur la répartition transversale des charges sont l'espacement des poutres ainsi que la portée du pont (Cheung & Chan, 1978 ; Moffatt & Dowling, 1978). Ce sont donc ces deux paramètres qui varient d'un modèle à un autre. Les valeurs utilisées pour chacun des modèles sont données à la section 3.2. Tous les tabliers ont une portée simple, à des fins de simplification. Le platelage en aluminium repose sur des poutres en acier.

Les deux types de disposition possibles pour le platelage sont étudiés, soit lorsque le sens de l'extrusion est posé transversalement ou longitudinalement par rapport aux poutres. La rigidité du platelage est plus grande lorsque celui-ci travaille dans le sens de l'extrusion, puisque les diagonales formant les alvéoles travaillent également pour résister aux charges. Il est donc possible de supposer que la disposition transversale aux poutres serait plus apte à transférer les charges dans le plan transversal que la disposition longitudinale. En suivant la même logique, lorsque les extrusions sont posées longitudinalement par rapport aux poutres, la résistance au moment longitudinal serait plus grande que lorsque les extrusions sont placées transversalement par rapport aux poutres. La disposition longitudinale serait donc plus avantageuse dans le cas où il y aurait action composite entre le platelage et les poutres. Une comparaison est faite entre les deux dispositions.

Le chargement utilisé pour le calcul des fractions de charge de camion est celui spécifié par la norme S6-14 à l'article 3.8.3.1.2, soit le chargement de camion CL-625. Le même type de chargement est utilisé pour la détermination de l'aire effective. Toutefois, un chargement uniformément réparti est également utilisé pour l'aire effective dans le cas des extrusions posées longitudinalement aux poutres.

Les fractions de charge de camion sont calculées pour la poutre de rive et pour la poutre de centre pour chacun des modèles. L'aire effective est également déterminée, mais seulement pour la poutre de centre à des fins de simplification. En effet, pour la poutre de centre, le chargement de camions le plus critique est symétrique, puisque la poutre se situe au centre

du tablier et que le nombre de voies de circulation est toujours pair (voir section 3.2.2 et Annexe C). Des modèles de tablier complet sont utilisés pour la détermination des fractions de charge de camion pour la poutre de rive, étant donné que le chargement n'est pas symétrique. Cependant, pour tout ce qui a trait à l'étude de la poutre de centre, la symétrie du chargement est utilisée afin de réduire la grosseur des modèles ainsi que le temps de calculs.

Enfin, une comparaison avec les valeurs de la norme canadienne CAN/CSA-S6-14 est réalisée.

## 3.2 Présentation des modèles

### 3.2.1 Généralité

Les configurations de tabliers utilisées pour chacun des modèles sont données au Tableau 3.1 présenté ci-dessous.

*Tableau 3.1: Dimensions des ponts pour chacun des modèles*

Modèles	Longueur porte-à-faux	Espacement des poutres c/c	Longueur portée	Largeur platelage
	m	m	m	m
M_01	0,8775	1,755	15	8,775
M_02			20	
M_03			30	
M_04		2,106	15	10,179
M_05			20	
M_06			30	
M_07		2,457	15	11,583
M_08			20	
M_09			30	
M_10		3,159	15	14,391
M_11			20	
M_12			30	
M_13		4,212	15	18,603
M_14			20	
M_15			30	



Ces dimensions sont utilisées pour construire les modèles avec les extrusions installées longitudinalement ainsi que transversalement par rapport aux poutres. Ainsi, en tout, 30 modèles ont été créés, soit 15 modèles avec les extrusions parallèles aux poutres et 15 avec les extrusions transversales. Les valeurs des dimensions choisies sont posées en fonction du nombre d'extrusions afin de simplifier la construction des modèles dans le logiciel. Les valeurs pour la portée sont arrondies à l'unité afin de faciliter la lecture du tableau. L'espacement des poutres couvre un large spectre, allant jusqu'à un espacement plus grand que 4 m. L'intention est d'observer le comportement du plâtelage à l'extrême. Toutefois, un espacement plus rapproché autour de 2 m est introduit, puisque les espacements de poutres habituels varient autour de cette grandeur. Étant donné que le MTMDET vise d'abord les ponts de courtes à moyennes portées et afin de limiter la grosseur des modèles, la portée maximale est fixée à 30 m.

Le dimensionnement des poutres en acier est fait en suivant les recommandations de la norme CAN/CSA-S6-14. Aucune action composite n'est prise en compte afin de faciliter le dimensionnement. Les dimensions des poutres sont donc très sécuritaires, puisque dans les modèles, une action composite parfaite est modélisée à l'aide de l'outil *Tie* d'ABAQUS, qui permet de fusionner les nœuds de deux surfaces juxtaposées. Il n'y a donc pas de mouvement relatif entre les nœuds fusionnés (ABAQUS 6.12, 2017). Les dimensions utilisées pour chacun des modèles sont présentées au Tableau 3.2.

Tableau 3.2: Dimensions des poutres en acier pour chacun des modèles

Modèles	Hauteur poutre	Épaisseur âme	Largeur ailes supérieures	Épaisseur ailes supérieures	Largeur ailes inférieures	Épaisseur ailes inférieures
	$h$	$t_{ame}$	$b_{sup}$	$t_{sup}$	$b_{inf}$	$t_{inf}$
	mm	mm	mm	Mm	mm	mm
M_1	600	12	230	20	230	20
M_2	1000	14	300	16	350	18
M_3	1400	16	300	18	350	20
M_4	800	12	300	16	300	16
M_5	1000	14	325	16	350	18
M_6	1400	18	350	20	400	20
M_7	800	12	300	16	300	16

Modèles	Hauteur poutre	Épaisseur âme	Largeur ailes supérieures	Épaisseur ailes supérieures	Largeur ailes inférieures	Épaisseur ailes inférieures
	$h$	$t_{ame}$	$b_{sup}$	$t_{sup}$	$b_{inf}$	$t_{inf}$
	mm	mm	mm	mm	mm	mm
M_8	1000	14	325	16	350	18
M_9	1400	18	350	20	400	20
M_10	900	12	325	16	350	18
M_11	1150	18	350	20	400	20
M_12	1400	18	400	20	400	22
M_13	900	13	350	18	350	20
M_14	1150	18	350	20	400	20
M_15	1700	18	400	20	400	22

Enfin, les caractéristiques des matériaux utilisées pour l'élaboration des modèles, soit l'acier et l'aluminium, sont fournies au Tableau 3.3. Toutes les analyses sont effectuées dans le domaine élastique.

Tableau 3.3 : Propriétés des matériaux utilisés dans les modèles

Propriété Acier		
Coefficient de tenue ( $\varphi_s$ )	0,9	
<i>Acier 450W</i>		
Limite élastique ( $F_y$ )	450	Mpa
Module de Young	200 000	MPa
Coefficient de Poisson	0,3	
Propriété Aluminium		
Coefficient de tenue ( $\varphi_y$ )	0,9	
<i>Alliage 6063 T-6</i>		
Limite élastique ( $F_y$ )	170	Mpa
Module de Young	70 000	MPa
Coefficient de Poisson	0,3	

CAN/ CSA-S6-14,  
Art.10.5.7

CAN/ CSA-S6-14,  
Art. 17.5.7

CAN/ CSA-S6-14,  
Art 17.4.2, tab. 17.3

### 3.2.2 Chargement

En premier lieu, le chargement utilisé pour le calcul des fractions de charge de camion et de l'aire effective est celui du camion exigé par la norme, soit le camion CL-625. Les dimensions et charges du camion ainsi que le gabarit d'encombrement sont présentés à la Figure 3.2.

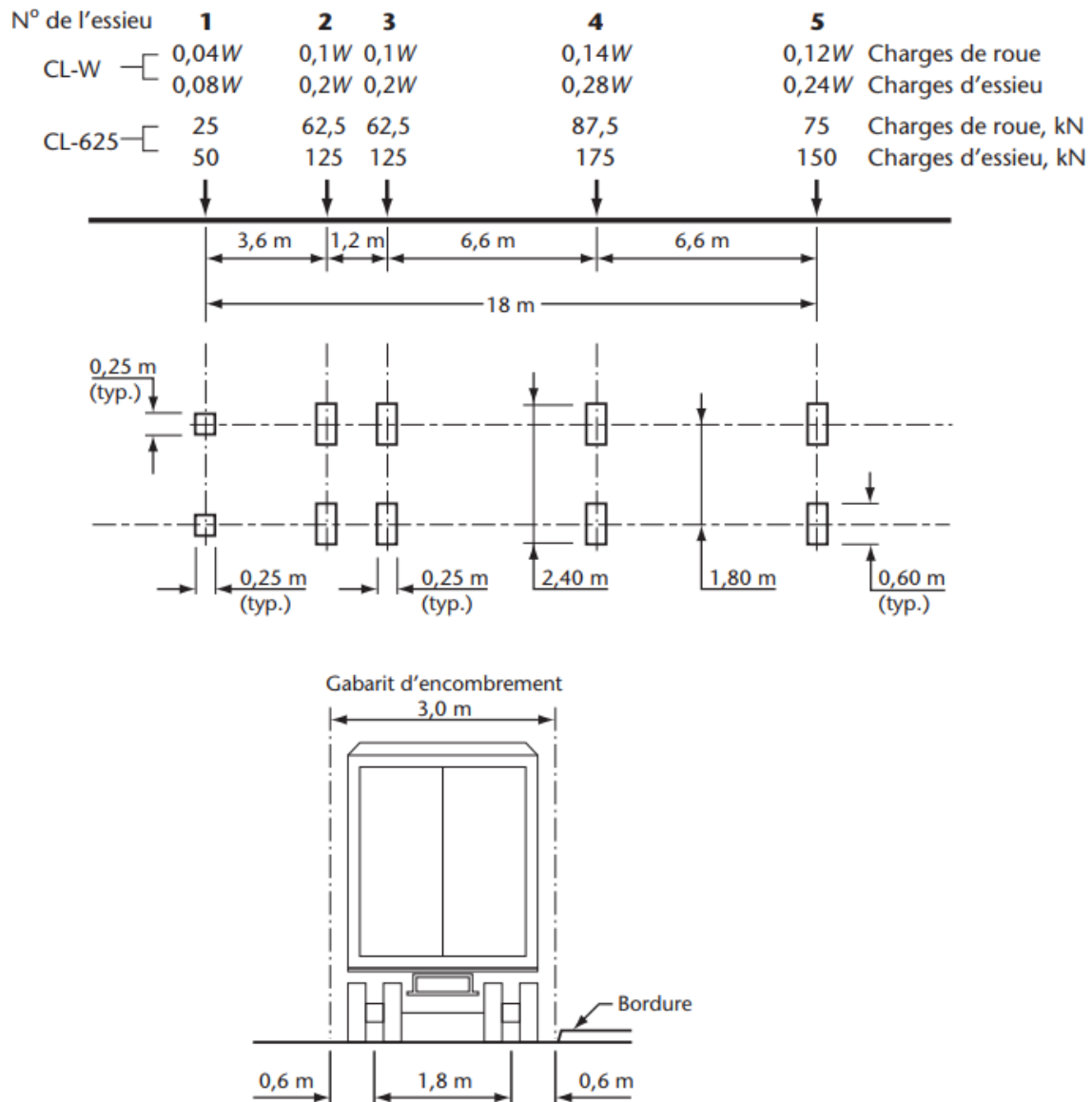


Figure 3.2 : Camion CL-625 exigé par la norme canadienne, tirée de CAN/CSA-S6-14, art. 3.8.3.1.2. (2014)

L'emplacement des camions afin de provoquer le moment maximal dans la poutre à l'étude est fait en deux temps. Tout d'abord, la position transversale des camions est déterminée à

l'aide de la méthode des poutres indépendantes en respectant le gabarit d'encombrement (voir Figure 3.2) et en utilisant les facteurs de modification des charges selon le nombre de voies chargées présentés au Tableau 3.4 (CAN/CSA-S6, art. 3.8.4.2.1). Selon la norme, plusieurs voies peuvent être chargées afin de provoquer le moment maximal dans la poutre à l'étude. Ainsi, selon le nombre de voies chargées, un facteur de modification de charge est utilisé afin de venir prendre en compte la probabilité que plus d'une voie soit chargée.

*Tableau 3.4: Facteur de modification des charges selon le nombre de voies chargées*

<b>Nombre de voies de calcul chargées</b>	<b>Facteur de modification</b>
1	1,00
2	0,90
3	0,80
4	0,70
5	0,60
6 ou plus	0,55

La méthode des poutres indépendantes consiste à déterminer la réaction d'appui maximale dans la poutre à l'étude en faisant varier le nombre de voies chargées. Le tablier est représenté par le platelage reposant sur des appuis simples, soit les poutres. La méthode considère que chacune des poutres travaillent indépendamment (Pasic, 2015). Il n'y a donc pas de continuité entre les appuis. Ainsi, lorsqu'un essieu se retrouve à l'extérieur de la largeur tributaire de la poutre à l'étude, il n'est pas considéré dans le calcul de la réaction d'appui.

Afin d'avoir une comparaison plus juste entre les différentes configurations de ponts, seul un nombre pair de voies a été utilisé. Ainsi, la configuration des chargements des voies ne diffère pas entre les différentes largeurs utilisée. De plus, aucun trottoir n'a été considéré afin d'avoir un chargement de camion plus critique pour la poutre de rive. Une glissière de 0,3 m de largeur est seulement considérée.

Le nombre de voie est calculé selon le tableau fourni par la norme S6-14 à l'article 3.8.2, et reproduit au Tableau 3.5 :

Tableau 3.5: Calcul du nombre de voie

<b>Largeur de la voie carrossable (m)</b>	<b>Nombre de voies</b>
Inférieure à 6,0	1
Supérieur à 6,0 jusqu'à 10,0	2
Supérieur à 10,0 jusqu'à 13,5	2 ou 3
Supérieur à 13,5 jusqu'à 17,0	4
Supérieur à 17,0 jusqu'à 20,5	5
Supérieur à 20,5 jusqu'à 24,0	6
Supérieur à 24,0 jusqu'à 27,5	7
Supérieur à 27,5	8

Ainsi, le nombre de voies utilisé pour chacune des différentes largeurs des modèles est donné au Tableau 3.6.

Tableau 3.6: Nombre de voie utilisé pour les différentes largeurs de ponts utilisés

<b>Espacement des poutres</b>	<b>Largeur carrossable</b>	<b>Nombre de voie</b>
<b>m</b>	<b>m</b>	<b>--</b>
1,755	8,175	2
2,106	9,579	2
2,457	10,983	2
3,159	13,791	4
4,212	18,003	*4

*\*Ici, écart de la norme, car on veut garder un nombre de voies pairs*

Les calculs pour la détermination de l'emplacement transversal des essieux afin de provoquer l'effort maximal dans la poutre de centre et la poutre de rive sont développés à l'Annexe C. Ainsi, pour toutes les configurations de pont, deux voies sont chargées pour la poutre de centre, tandis qu'une seule voie est chargée pour la poutre de rive. Dans le cas des largeurs de tabliers avec deux voies, les deux voies sont chargées, tandis que pour les largeurs de tabliers ayant quatre voies, ce sont les deux voies du milieu qui sont chargées. Les camions sont disposés le plus proche possible de la séparation de voie du milieu, là où se situe la poutre de centre. Pour la poutre de rive, qu'il y ait deux ou quatre voies, le

chargement le plus critique est le même, soit lorsque la voie au-dessus de la poutre de rive est chargée. Le camion est disposé le plus proche possible de la glissière de sécurité.

Puis, l'emplacement longitudinal des essieux du camion est déterminé. Cet emplacement est basé sur le tableau fourni par le MTMDET dans le *Manuel de conception des structures* qui a été créé pour réduire le temps de calcul concernant la détermination de cet emplacement. Ce tableau, présenté à la section *Détermination des fractions de charge de camion* (voir Tableau 3.8), fournit l'emplacement de l'essieu le plus critique selon la portée libre du pont. Avec les dimensions du camion données à l'article 3.8.3.1.2 dans la norme S6-14 (voir Figure 3.2), il est alors possible de positionner longitudinalement tous les essieux.

En second lieu, un chargement uniformément réparti a également été utilisé pour les extrusions installées longitudinalement pour le calcul de l'aire effective. Cette décision a été prise afin d'éviter l'effet local des essieux, plus important avec cette disposition des extrusions. Un calcul de chargement uniformément réparti équivalent à la charge du camion CL-625 de la norme a été effectué. Sachant le moment maximal provoqué par le camion CL-625, le chargement uniformément réparti peut être facilement isolé à l'aide de la relation entre le moment maximal et une charge uniforme.

$$w = \frac{8 * M_{max}}{L^2 * B_e} \quad \text{Équation 20}$$

où

$w$  = Chargement uniformément réparti ( $kN/m^2$ ) ;

$M_{max}$  = Moment maximal provoqué par le camion CL-625 ( $kN * m$ ) ;

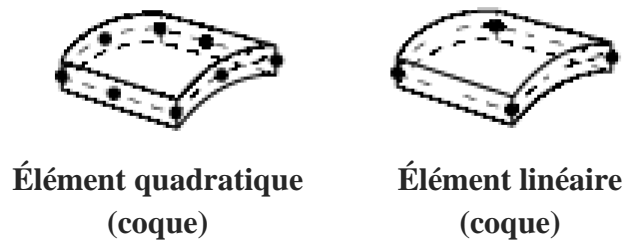
$L$  = Portée du pont ( $m$ ) ;

$B_e$  = Largeur tributaire à la poutre étudiée ( $m$ ).

### 3.2.3 Maillage utilisé

Le type d'éléments utilisé est le type coque (*shell*). Le choix d'élément coque s'est imposé étant donné la dimension des modèles, le nombre de nœuds pouvant aller jusqu'à 3 millions et plus. Ce choix est raisonnable, car les éléments coques représentent bien les parois minces et peuvent être sollicités en flexion (ABAQUS 6.12, 2017). Ils sont ainsi adaptés aux déformations et sollicitations auxquelles la structure est soumise.

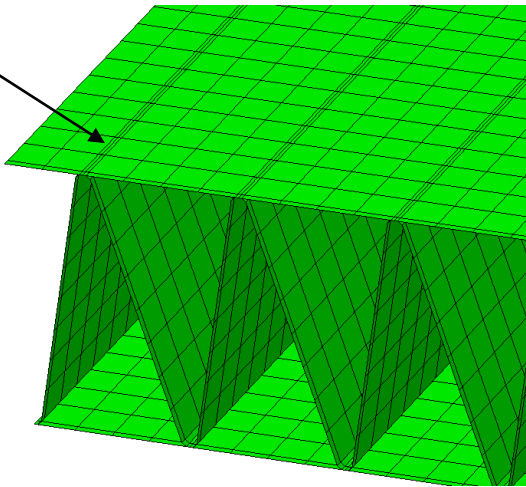
Les éléments sont dit linéaires et ont chacun 4 nœuds. Un élément linéaire utilise une interpolation linéaire entre deux nœuds pour représenter la déformation d'un élément, tandis qu'un élément quadratique permet d'avoir un point intermédiaire entre deux nœuds, et donne une meilleure approximation de la déformation de l'élément. La Figure 3.3 illustre deux éléments, l'un à interpolation quadratique (gauche) et l'autre linéaire (droite).



*Figure 3.3 : Différence entre un élément linéaire et quadratique, adaptée d'ABAQUS User's Guide 6.12, (2017)*

Le type linéaire a été choisi afin de réduire le temps de calcul, étant donné la dimension des modèles. De plus, lors des tests effectués afin de déterminer le type d'élément, le logiciel éprouvait de la difficulté à générer un maillage qui soit fonctionnel avec les éléments quadratiques, et les modèles devenaient très lourds. La difficulté à générer le maillage pour les éléments quadratiques pourrait être dû à l'arrondi présent dans l'extrusion (voir Figure 3.9). En effet, dû à la faible largeur de l'arrondi, le modèle génère des éléments étroits à ces endroits, ce qui provoque une hétérogénéité dans le maillage. Afin d'éviter d'avoir des éléments allongés, il aurait fallu utiliser un maillage très fin, de l'ordre de 5 mm par 5 mm. Toutefois le modèle aurait été trop lourd et demandant en mémoire. Une représentation du maillage est donnée à la Figure 3.4 afin d'illustrer les éléments générés par le logiciel pour modéliser l'arrondi.

*Éléments allongés  
pour représenter  
l'arrondi*



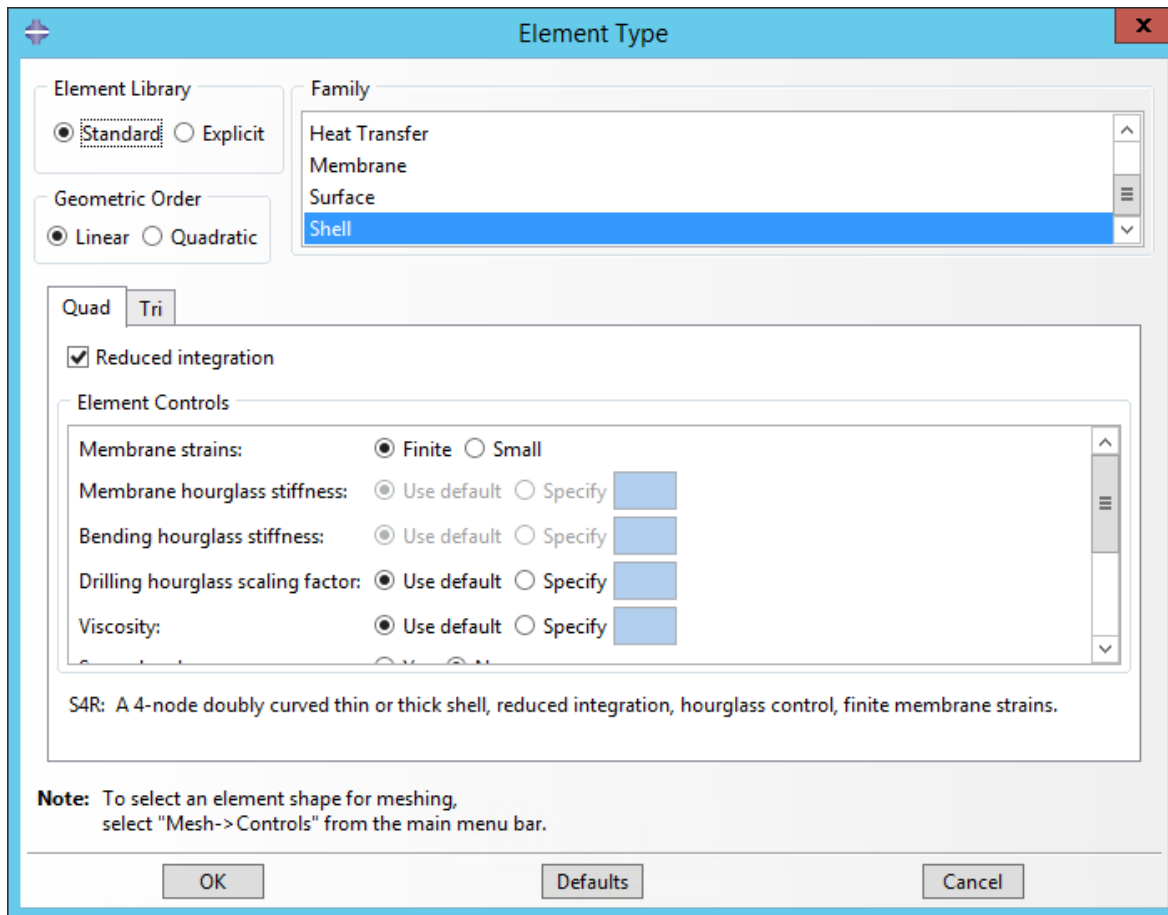
*Figure 3.4 : Représentation des éléments générés par le logiciel pour modéliser l'arrondi de l'extrusion*

Ainsi, la réponse souvent plus réaliste de la déformation des éléments quadratiques n'est pas assez importante pour compenser la différence de temps de calcul et les problèmes générés par ceux-ci. De plus, pour les analyses de cette étude, c'est plutôt la réponse globale du modèle qui est importante, et non pas la réponse locale d'un élément.

L'utilisation d'une intégration dite réduite a été choisie. Une intégration réduite utilise moins de points d'intégration lors de la résolution de l'intégration numérique des éléments finis (ABAQUS 6.12, 2017). Le logiciel ABAQUS utilise la méthode d'intégration de Gauss pour la majorité de ses calculs. Ainsi, dans ABAQUS, lorsque l'intégration réduite est choisie, pour un élément à quatre nœuds par exemple, il y aura un seul point d'intégration de Gauss utilisé. Puis le résultat est extrapolé aux nœuds de l'élément (ABAQUS 6.12, 2017). Un test a été effectué, et la différence des résultats étaient non significative entre la résolution réduite et non réduite. C'est pourquoi, afin de diminuer le temps de calcul, l'intégration réduite a été utilisée.

Enfin, l'analyse se fait entièrement dans le domaine linéaire, puisque la sollicitation utilisée ne permet pas de déformations permanentes. L'utilisation de la bibliothèque de type *Standard* est donc choisie. La Figure 3.5 représente les choix faits pour le type d'élément dans le logiciel ABAQUS pour chacun des modèles. Les résultats des tests pour déterminer le type d'élément utilisé sont présentés à l'Annexe D.



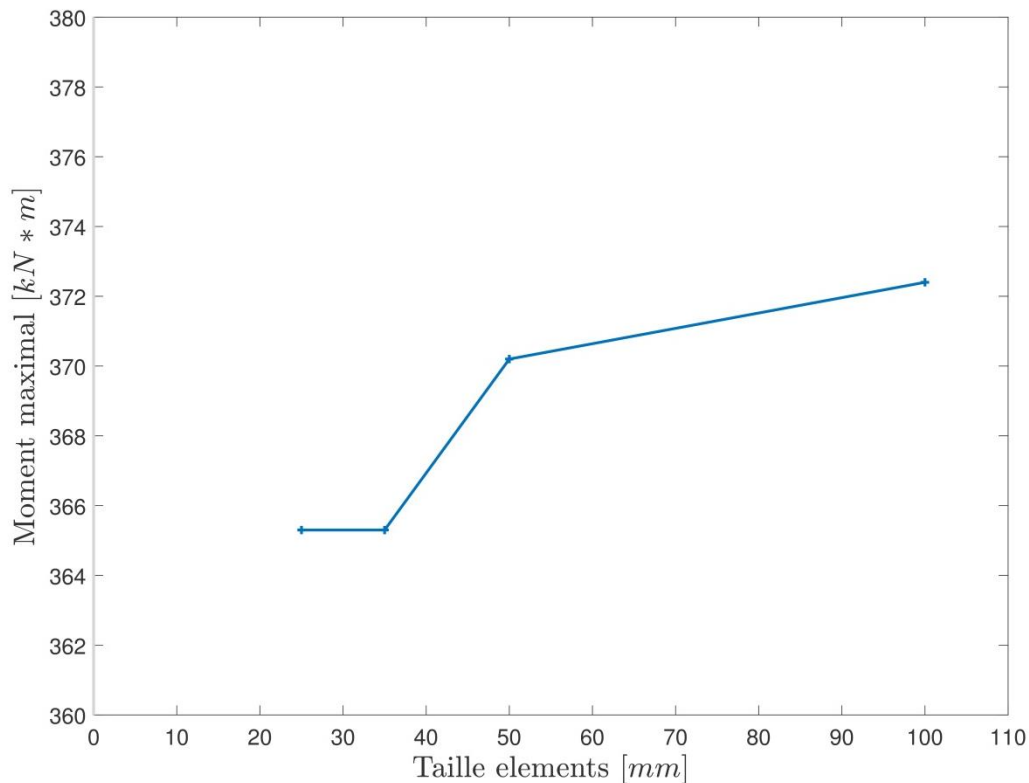


*Figure 3.5: Type d'éléments utilisés*

Pour la création du maillage, des essais ont été effectués pour déterminer la dimension idéale des éléments. Il a été constaté que lorsque le maillage n'était pas assez fin, le contact entre la poutre et le plâtrage se faisait mal. De plus, afin d'avoir une répartition transversale convenable des contraintes, le maillage devait également être relativement fin. La taille des éléments est fonction des dimensions de la face transversale des extrusions. Afin d'avoir des éléments pas trop allongés, la longueur longitudinale des éléments est imposée comme étant égale à celle transversale. Ce sont donc des éléments carrés qui sont imposés. La taille des éléments fait donc référence à la longueur utilisée pour les deux côtés.

Le graphique suivant représente l'analyse de convergence qui a été réalisée. Le modèle 1 avec les extrusions parallèles aux poutres a été utilisé pour effectuer l'analyse de convergence. Le moment maximal a été choisi comme critère de convergence étant donné

que c'est une sortie de donnée importante utilisée dans cette étude. Il est déterminé à l'aide de l'outil *Free body cut* d'ABAQUS (voir section 3.3).

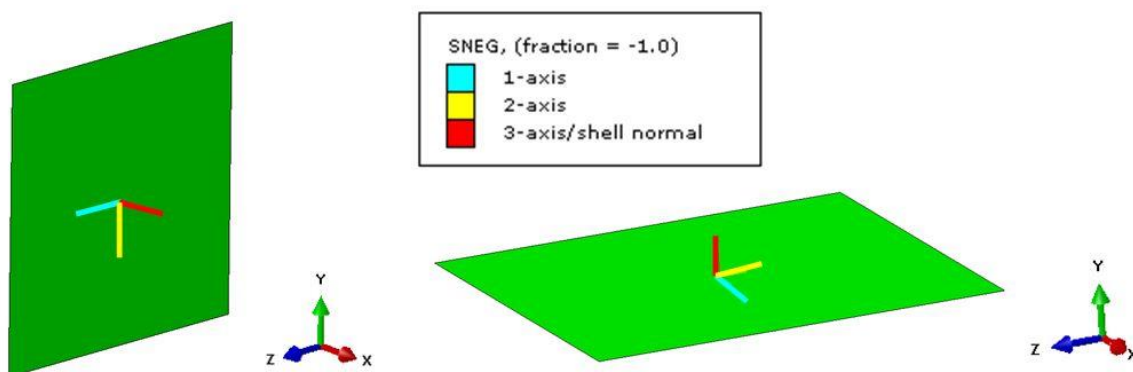


*Figure 3.6 : Analyse de convergence pour la détermination de la dimension des éléments*

Avec le graphique d'analyse de convergence, il est possible de constater qu'à partir d'une dimension d'élément de 35 mm, la valeur du moment maximal tend vers une valeur fixe. Ainsi, le raffinement du maillage à partir de cette valeur-là ne donne pas des résultats plus précis. Le maillage utilisé est donc de 25 mm par 25 mm pour chacun des éléments. Ce choix se base sur le fait que la différence de temps entre 35 mm et 25 mm était relativement faible, et la génération du maillage était plus facile avec une taille d'élément de 25 mm.

Cependant, tel que discuté précédemment, étant donné l'arrondi dans l'extrusion (voir Figure 3.9), des éléments de taille 25 mm par 25 mm ne peuvent être générés à ces endroits. Les éléments sont plutôt étroits générant un maillage non homogène (voir Figure 3.4). Il a toutefois été décidé de garder une taille de 25 mm puisque une taille de 5 mm était considérée trop exigeante pour le logiciel étant donné la taille des modèles.

Enfin, il a été constaté que pour extraire les résultats des contraintes pour les éléments coques, il faut porter une attention particulière à l'orientation des éléments. Une différence existe entre l'orientation des éléments verticaux et horizontaux. Comme il est possible de le voir sur la Figure 3.7, l'axe 1, pour les éléments verticaux, correspond à l'axe des z dans le système d'axe global, tandis que pour les éléments horizontaux, c'est plutôt l'axe 2 qui correspond à l'axe z. Ainsi, lorsque la contrainte dans le plan longitudinal (selon l'axe z) doit être extraire, c'est la contrainte dite S11 pour un élément vertical qu'il faut extraire, tandis que c'est la contrainte S22 qui doit être extraite pour un élément horizontal.



*Figure 3.7 : Comparaison entre les orientations des éléments coques verticaux et horizontaux*

### 3.2.4 Extrusion du platelage en aluminium utilisée

L'extrusion utilisée pour les modélisations est celle conçue par un étudiant du groupe de recherche (Burgelin, 2017). Il a été décidé de ne pas prendre un platelage déjà existant, puisque le MTMDET désire développer un nouveau platelage entièrement québécois. Le choix de l'extrusion s'est donc arrêté sur le premier prototype québécois. Il faut garder en tête que l'extrusion peut encore être optimisée, et que c'est seulement un prototype initial. D'autres recherches sont en cours concernant la conception de cette extrusion. Une représentation schématique de l'extrusion utilisée en éléments coques est donnée à la Figure 3.8. L'image provient des modèles réalisées dans ABAQUS.

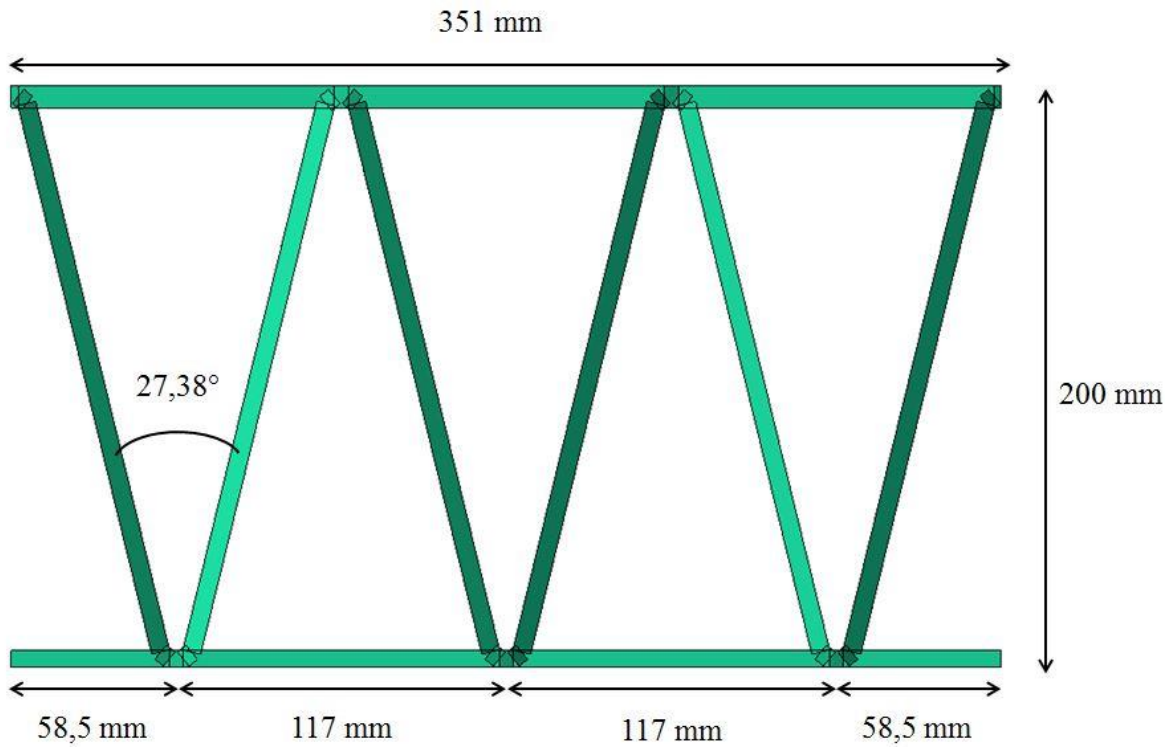


Figure 3.8 : Dimensions de l'extrusion utilisée

L'extrusion conçue par Burgelin (2017) a d'abord été pensée pour une modélisation avec des éléments solides. Les dimensions de l'extrusion présentées à la Figure 3.8 sont donc légèrement modifiées de l'extrusion originale afin d'être adaptées pour des éléments coques. De plus, afin de prendre en compte le congé nécessaire pour ne pas avoir de concentration de contraintes, une courbure similaire est créée pour le modèle de l'extrusion en éléments coques. Cette courbure est représentée plus en détail à la Figure 3.9.

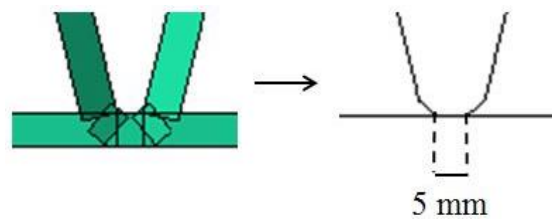


Figure 3.9 : Représentation de l'arrondi

Les diagonales formant l'arrondi ont également une longueur de 5 mm. Les épaisseurs utilisées pour les parois de l'extrusion sont données au Tableau 3.7.

Tableau 3.7 : Épaisseurs des parois de l'extrusion utilisée

	mm
<b>Diagonale</b>	6,5
<b>Haut</b>	8
<b>bas</b>	6

Une représentation finale de l'extrusion créée avec les éléments coques est donnée à la Figure 3.10 et provient directement des modèles.

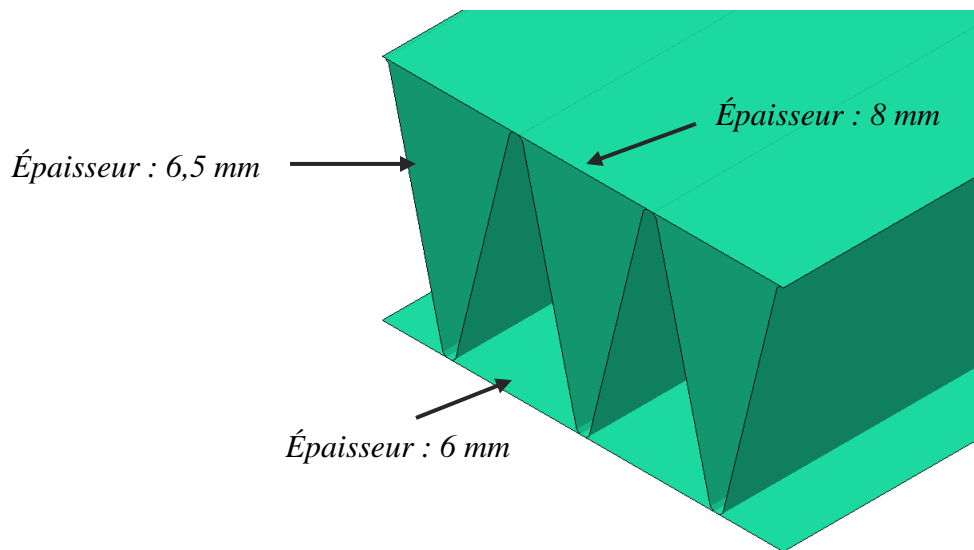


Figure 3.10 : Représentation 3D de l'extrusion avec les éléments de coque

### 3.3 Détermination des fractions de charge de camion

Afin de déterminer les fractions de charge de camion pour la poutre de rive et la poutre de centre de chacun des modèles, la définition même du concept est utilisée. Ainsi, il suffit de calculer la fraction de la charge du camion CL-625 que la poutre à l'étude reprend. Pour cela, un rapport des moments est calculé, soit :

$$FCC = \frac{M_{poutre}}{M_{max}} \quad \text{Équation 21}$$

où

$FCC$  = Fraction de charge de camion ;

$M_{poutre}$  = Moment maximal repris par la poutre à l'étude ( $kN * m$ ) ;

$M_{max}$  = Moment maximal absolu provoqué par un camion lorsqu'une seule poutre reprend la charge ( $kN * m$ ).

Le calcul du moment maximal absolu pour une charge mobile est réalisé à l'aide de la méthode des lignes d'influence qui repose sur la théorie des poutres et les équations de statique de base. La poutre est alors représentée en 2D sur appuis simples.

Le moment maximal produit par une charge quelconque d'un groupe de charge est atteint lorsque cette charge et le centre de gravité des charges concentrées sont à égale distance du centre de la poutre sur appuis simples (Wang & Eckel, 1957). Il faut donc calculer le moment maximal produit par chacune des charges et ainsi déterminer lequel est maximal. Ce moment est défini comme étant le moment maximal absolu. Bien souvent, le moment maximal absolu va être produit par la charge la plus proche du centre de gravité du groupe de charges concentrées. De plus, le moment maximal absolu d'un groupement de charges concentrées est habituellement très proche de la valeur du moment maximal au centre de la portée (Wang & Eckel, 1957). La différence entre les deux valeurs peut toutefois être plus grande lorsque la distance entre les charges concentrées est grande comparativement à la portée.

Enfin, le calcul du moment maximal absolu peut être assez long et fastidieux, surtout lorsque plusieurs portées doivent être évaluées. C'est pourquoi le MTMDET dans le *Manuel de conception des structures* fournit un tableau permettant de déterminer le moment maximal absolu provoqué par le camion lorsqu'une seule poutre reprend la charge. À des fins de simplification, ce tableau a été utilisé pour le calcul des moments maximaux, les portées des modèles étant toutes comprises entre 0 et 50 m. Le tableau est présenté ci-dessous.

*Tableau 3.8 : Détermination du moment fléchissant maximal provoqué par le camion lorsqu'une seule poutre reprend la charge*

<b>Portée (L)</b>	<b>Essieux présents déterminants</b>	<b>Emplacement essieu souligné</b>	<b>Moment fléchissant maximal (Mmax)</b>
<b>m</b>	<b>kN</b>	<b>M</b>	<b>kN*m</b>
0 à 4,554	<u>175</u> ;	L/2	43,75 L
4,554 à 7,434	125, <u>175</u> ;	L/2 + 0,3	(62,5 L <sup>2</sup> - 75 L + 22,5)/ L
7,434 à 14,2155	50, <u>125</u> , 125 ;	L/2 + 0,05	(75 L <sup>2</sup> - 165 L + 0,75)/ L
14,2155 à 23,3035	175, <u>125</u> , 125, 50 ;	L/2 + 0,805	(118,75 L <sup>2</sup> - 772,5 L + 308)/ L
23,3035 à 27,3	150, 175, <u>125</u> , 125, 50 ;	L/2 + 2,196	(156,25 L <sup>2</sup> - 1762,5 L + 3014)/ L
27,3 à 49,0165	50, 125, 125, <u>175</u> , 150 ;	L/2 + 1,104	(156,25 L <sup>2</sup> - 1680 L + 761,76)/ L
49,0165 à 50	Surcharge de voie		

Le tableau permet ainsi de déterminer le moment maximal absolu fléchissant. Selon la portée, il indique quel regroupement de charges du camion CL-625 doit être utilisé et quel est l'emplacement de la charge critique (essieu souligné) de ce regroupement qui provoque le moment maximal absolu.

Enfin, la détermination du moment repris par la poutre à l'étude est réalisée grâce à l'outil *Free body cut* du logiciel ABAQUS. Cet outil permet d'obtenir les moments et efforts selon un plan de coupe choisi. Le plan de coupe utilisé est celui perpendiculaire à l'axe longitudinal de la poutre à l'étude et la coupe est effectuée à l'endroit où le moment est maximal. Le logiciel intègre les contraintes qui sont dans le plan en utilisant les principes de la mécanique des solides déformables. L'équation ci-dessous donne l'équation

permettant de calculer le moment selon une coupe transversale dans le plan xy le long de z (Craig, 2000).

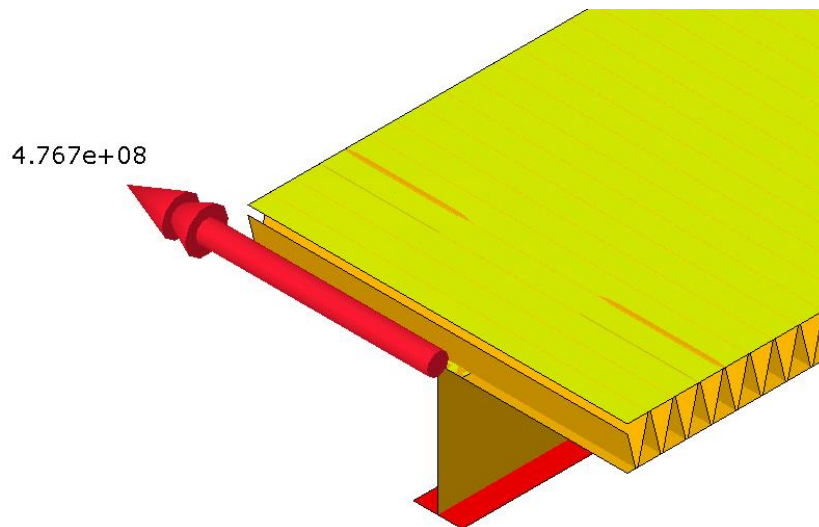
$$M_x(z) = - \int_A y \sigma_z dA \quad \text{Équation 22}$$

où

$y$  = Distance p/r à l'axe neutre (mm) ;

$\sigma_z$  = Contrainte dans le plan longitudinal (MPa).

Une représentation de l'outil *Free body cut* d'ABAQUS, tirée d'un modèle avec les extrusions transversales, est présentée à la Figure 3.11.



*Figure 3.11 : Représentation de l'outil Free body cut d'ABAQUS utilisé pour la détermination de la fraction de charge de camion*



### 3.4 Détermination de l'aire effective

La littérature sur le sujet offre plusieurs équations relativement semblables pour déterminer la largeur effective d'un platelage. Ainsi, la majorité des équations présentées utilise la relation entre la force et la contrainte tirée de la théorie des poutres. La force de compression totale ainsi que les contraintes de compression dans le platelage doivent être connues, et alors il suffit d'isoler la largeur tributaire de la relation. Pour cette étude, l'équation de Chiewanichakorn et col. (2004) est utilisée. Elle a été développée pour un platelage en béton et prend en compte la distribution linéaire verticale dans le platelage, contrairement à certaines autres études, telles que celle réalisée par Cheung et Chan (1978), qui considère la distribution de contrainte selon l'épaisseur du platelage comme étant uniforme.

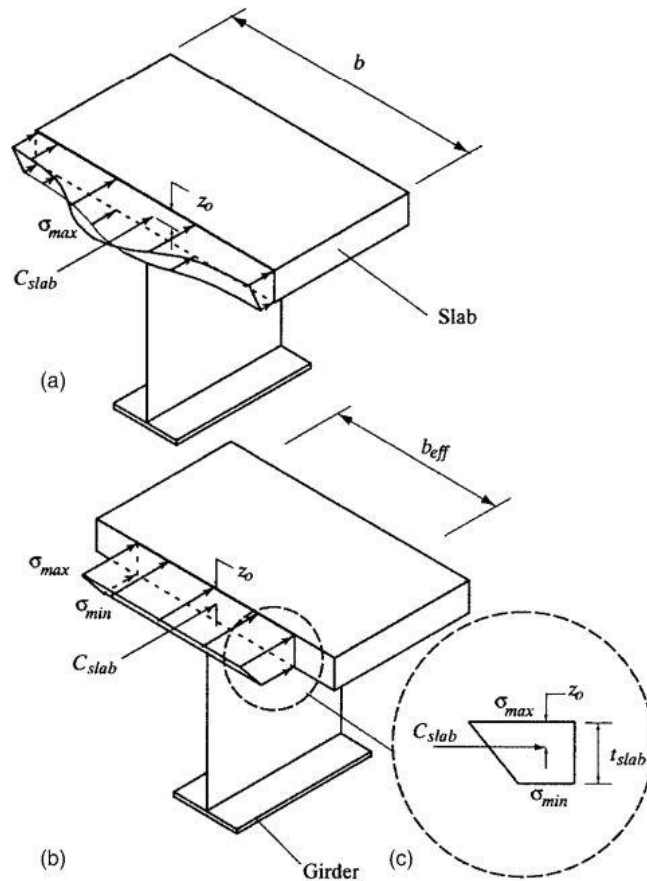


Figure 3.12 : Représentation schématique de la définition de la largeur effective définie par Chiewanichakorn et col. (2004)

Ainsi, l'équation utilisée se base sur l'équation de la force qui est égale à l'aire multipliée par la contrainte :

$$B_e = \frac{C_{\text{platelage}}}{t_{\text{platelage}} * \left( \frac{\sigma_{\text{max}} + \sigma_{\text{min}}}{2} \right)} \quad \text{Équation 23}$$

où

$B_e$  = Largeur effective (mm) ;

$C_{\text{platelage}}$  = Force de compression totale dans le platelage (N) ;

$t_{\text{platelage}}$  = Épaisseur du platelage (mm) ;

$\sigma_{\text{max}}, \sigma_{\text{min}}$  = Contrainte de compression longitudinale dans le haut et dans le bas du platelage, respectivement (MPa).

Étant donné que le platelage en aluminium n'est pas plein, il est plus difficile d'isoler la largeur effective de l'équation. C'est pourquoi pour cette étude la définition d'aire effective sera utilisée plutôt que celle de largeur effective. L'équation de Chiewanichakorn et col. (2004) donne alors comme définition pour l'aire effective :

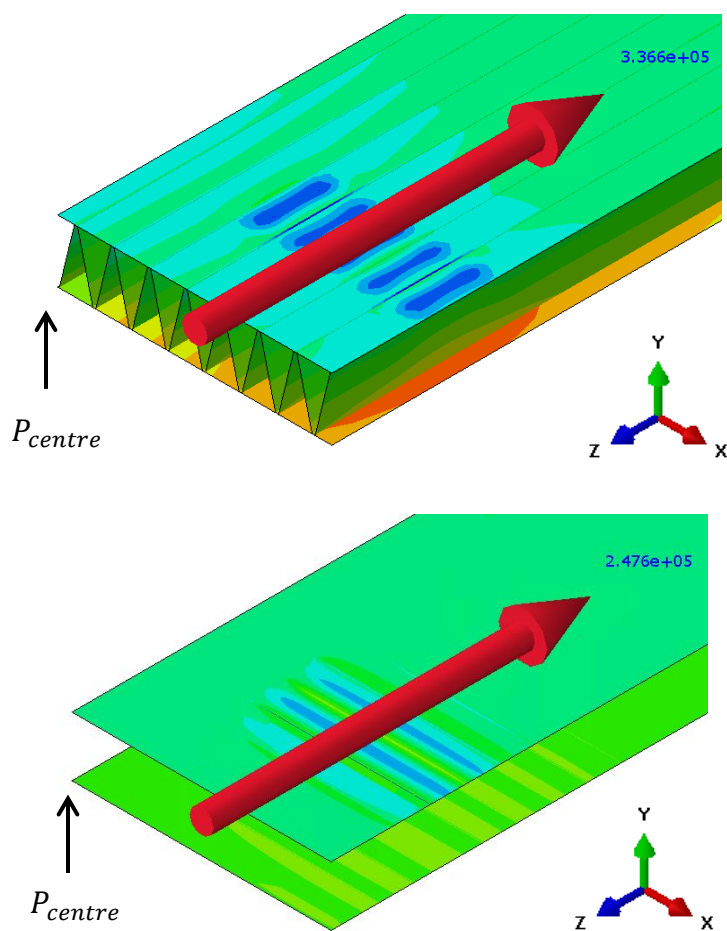
$$A_{\text{eff}} = \frac{C_{\text{platelage}}}{\left( \frac{\sigma_{\text{max}} + \sigma_{\text{min}}}{2} \right)} \quad \text{Équation 24}$$

où

$A_{\text{eff}}$  = Aire effective (mm<sup>2</sup>).

Ainsi, afin de déterminer l'aire effective, la force de compression totale dans le platelage doit être trouvée ainsi que la répartition des contraintes dans le haut et le bas du platelage. Pour cela une coupe est faite à l'endroit où le moment est maximal en utilisant le même outil que pour la détermination de la fraction de charge de camion. Toutefois, cette fois-ci c'est la force de compression dans le platelage qui doit être extraite. Pour les extrusions longitudinales, tous les éléments en compression sont utilisés pour le calcul de la force de compression, tandis que pour les extrusions transversales, seul le haut et le bas du platelage

sont considérés dans le calcul. La participation des éléments diagonaux à la résistance au moment longitudinal est négligée lorsque les extrusions sont installées perpendiculairement aux poutres. La force de compression est déterminée par le logiciel en faisant simplement l'intégration des contraintes longitudinales (axe z) dans le plan de coupe. Une illustration de comment la force de compression est obtenue à partir des modèles est donnée à la Figure 3.13.



*Figure 3.13 : Détermination de la force de compression dans le platelage pour les extrusions disposées longitudinalement (haut) et transversalement (bas)*

La Figure 3.13 est tirée des modèles utilisant la symétrie selon l'axe x. La coupe est faite en isolant la largeur tributaire de la poutre du centre.

Puis, les contraintes dans le haut et le bas du platelage sont extraites à l'aide de l'outil *Path* d'ABAQUS (voir Figure 3.14). Cet outil permet de créer un chemin de nœuds pour lesquels des valeurs de contraintes peuvent être extraites. Ainsi, un chemin est créé dans le haut et le bas du platelage le long de la largeur tributaire de la poutre de centre. Enfin, les

contraintes dans le plan longitudinal (xz) sont extraites pour chacun des nœuds sélectionnés pour former le *Path*. Une représentation de l'outil est illustrée à la Figure 3.14 avec un modèle avec les extrusions disposées transversalement pour le bas du platelage.

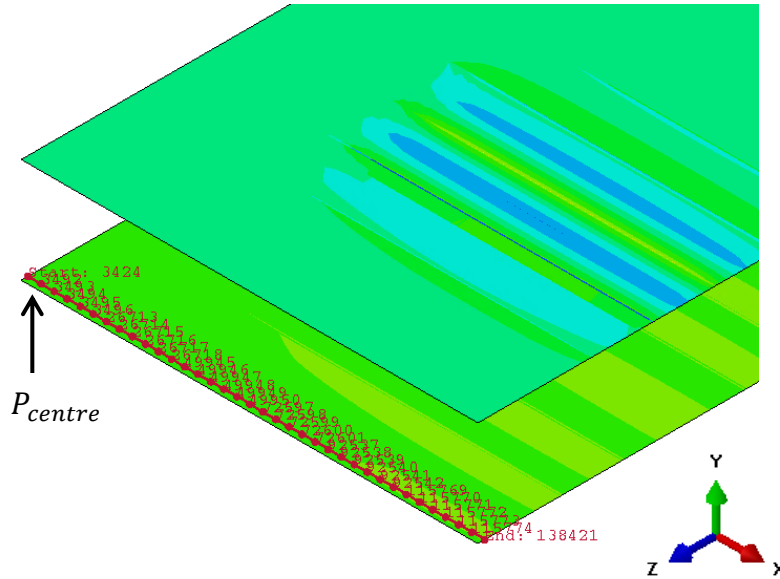


Figure 3.14 : Illustration de l'outil *Path* permettant de déterminer la répartition des contraintes dans le haut et le bas du platelage

Grâce à cet outil, les contraintes maximale et minimale peuvent être trouvées, et ainsi l'aire effective calculée.

Enfin, afin de faciliter la comparaison entre les résultats obtenus, un rapport est calculé, soit :

$$\frac{A_{eff}}{A_{tot}} \quad \text{Équation 25}$$

où

$A_{eff}$  = Aire effective ( $mm^2$ ) ;

$A_{tot}$  = Aire totale correspondant à l'aire du platelage tributaire à la poutre de centre ( $mm^2$ ).

L'aire des diagonales n'est pas comprise dans l'aire totale pour les modèles avec les extrusions transversales aux poutres puisqu'elles ne participent pas pour résister au moment longitudinal.

## Chapitre 4 Présentation des résultats

### 4.1 Fraction de charge de camion

Les résultats présentés ci-dessous montrent les résultats typiques obtenus à l'aide des modélisations pour les fractions de charge de camion.

#### 4.1.1 Extrusions installées transversalement

Les fractions de charge de camion pour la poutre de centre et la poutre de rive avec les extrusions installées transversalement aux poutres sont présentées à la Figure 4.1. Les traits pointillés représentent les valeurs pour la poutre de rive, et tandis que les traits pleins sont associés à la poutre de centre.

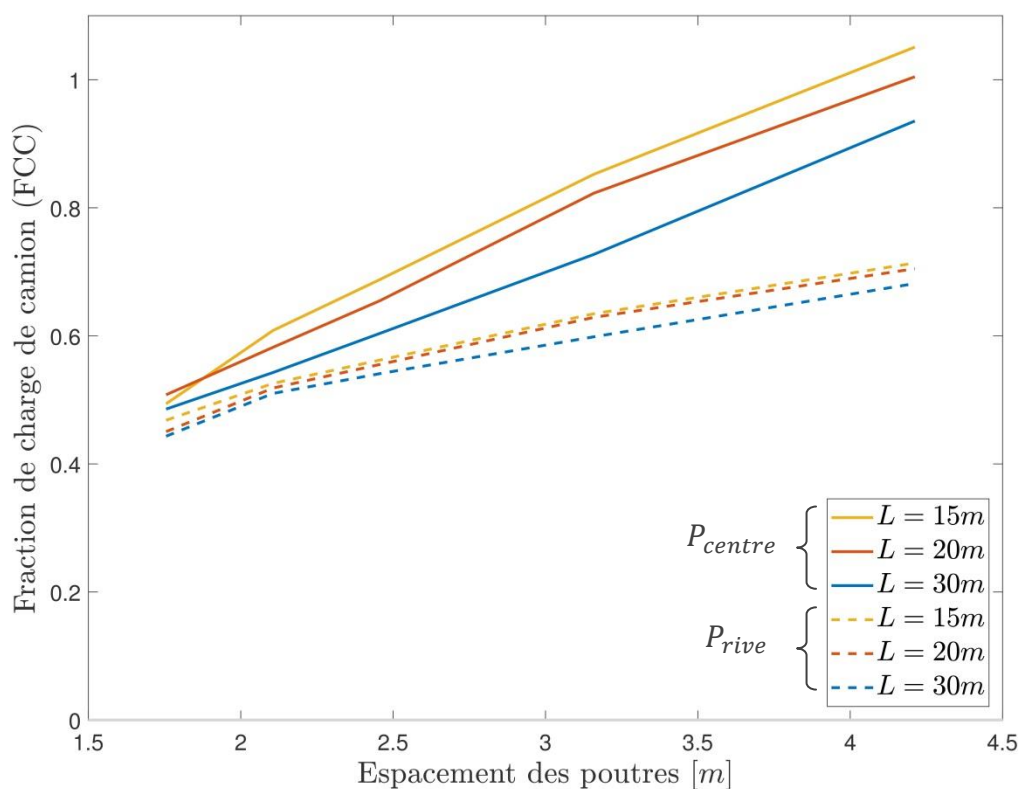


Figure 4.1 : Fractions de charge de camion pour la poutre de centre et la poutre de rive avec les extrusions installées transversalement aux poutres

Tout d'abord, il est possible de constater que plus l'espacement des poutres augmente, plus la fraction de charge augmente également. Ce résultat est celui attendu, puisque plus les poutres sont espacées, plus il est difficile de transférer le poids des camions aux autres poutres. Enfin, il est également possible de remarquer que plus la portée est grande, plus la fraction de charge de camion est faible. Ce résultat est également attendu, puisque la distribution transversale des efforts est meilleure plus la portée est grande (CSA, 2014b).

Ensuite, il est possible de remarquer que toutes les valeurs de fraction de charge de camion pour la poutre de rive sont inférieures à celles obtenues avec la poutre de centre. De plus, l'écart augmente plus l'espacement des poutres augmente. Enfin, les trois courbes de portées différentes pour la poutre de rive sont beaucoup plus rapprochées que pour la poutre de centre.

#### 4.1.2 Extrusions installées longitudinalement

Les fractions de charge de camion pour la poutre de centre et la poutre de rive avec les extrusions installées longitudinalement aux poutres sont présentées à la Figure 4.2. Les traits pointillés représentent les valeurs pour la poutre de rive, et tandis que les traits pleins sont associés à la poutre de centre.

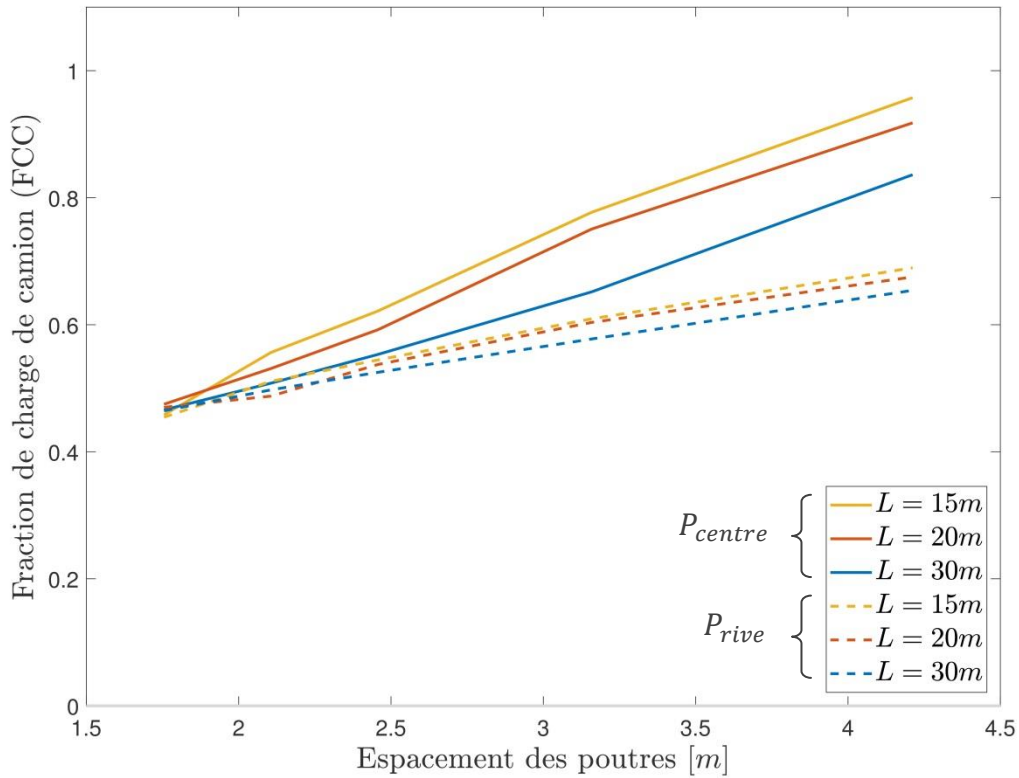


Figure 4.2 : Fractions de charge de camion pour la poutre de centre et la poutre de rive avec les extrusions posées longitudinalement aux poutres

Les mêmes observations faites pour les extrusions transversales aux poutres peuvent être appliquées aux valeurs des fractions de charge de camion pour les extrusions posées longitudinalement. Ainsi, plus l'espacement des poutres augmente, plus la valeur de la fraction de charge de camion augmente également. De plus, plus la portée augmente, plus la fraction de charge diminue. Enfin, les courbes de la poutre de rive sont toujours en-dessous de celles de la poutre de centre, et l'écart augmente avec l'espacement de la portée. Les courbes de poutre de rive sont également plus rapprochées les uns des autres que pour la poutre de centre.

## 4.2 Aire effective

Les résultats présentés ci-dessous montrent les résultats typiques obtenus à l'aide des modélisations pour le calcul de l'aire effective. Seule la poutre de centre a été étudiée puisque son chargement de camion est symétrique et cela simplifiait les calculs.

### 4.2.1 Extrusions installées transversalement

Les résultats présentés dans cette section proviennent des analyses faites avec les modèles avec les extrusions transversales aux poutres pour le chargement de camion. La Figure 4.3 représente la répartition des contraintes dans le haut du platelage pour le modèle 1. Le modèle 1 est celui avec la plus petite portée, soit 15 m, et le plus petit espacement, soit 1,775 m. Les contraintes sont prises le long de la largeur tributaire de la poutre de centre. Étant donné que les modèles utilisent la symétrie de chargement selon le plan transversal, seul la répartition des contraintes d'un côté de la poutre est représentée.

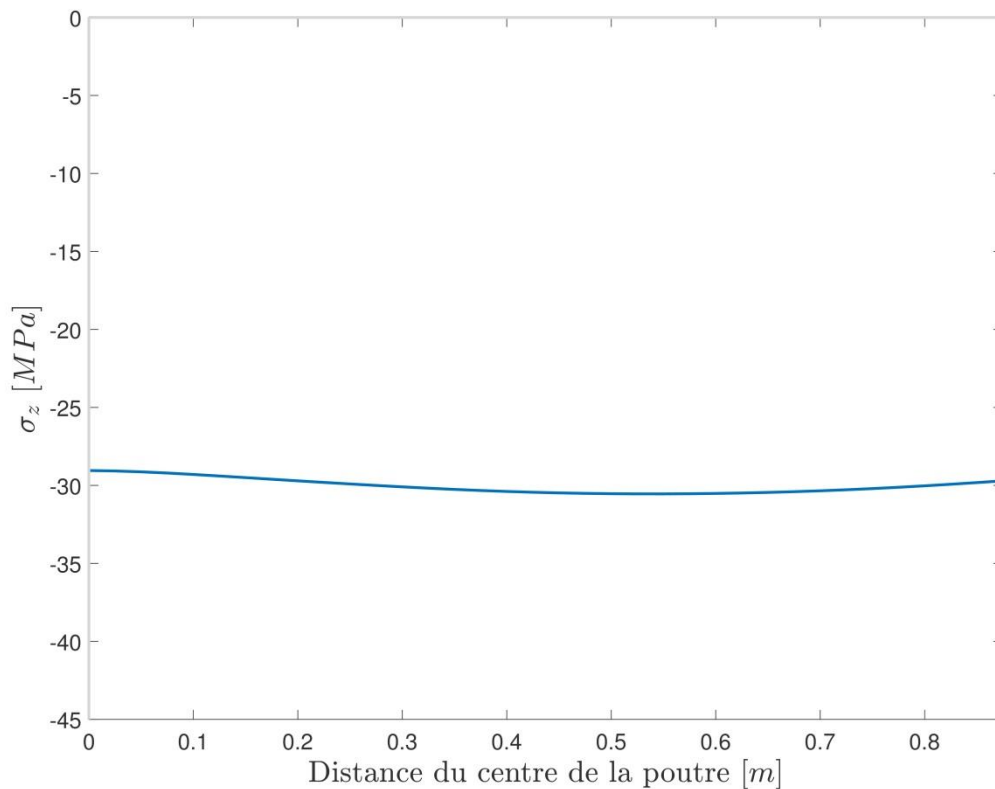


Figure 4.3 : Répartition des contraintes dans le haut du platelage pour le modèle 1 avec les extrusions posées transversalement pour le chargement de camions



La répartition des contraintes dans le haut du platelage est quasiment uniforme le long de la largeur tribulaire de la poutre. Il est possible d'observer une légère augmentation des contraintes à l'endroit où les essieux sont situés. La contrainte dite « maximale » pour le calcul de l'aire effective est prise juste au-dessus de la poutre, malgré le fait que les contraintes sous les essieux soient légèrement plus importantes. L'effet des concentrations locales des contraintes sous les essieux ne doit pas être pris en compte pour le calcul de l'aire effective. Il est également possible de constater que l'effet des concentrations de contraintes dû au décalage au cisaillement n'est pas présent dans le haut du platelage. Ceci est dû au fait que la concentration de contrainte se fait plutôt dans la paroi attachée à la poutre, soit le bas du platelage, là où le cisaillement se transmet.

La Figure 4.4 représente la répartition des contraintes dans le bas du platelage pour le même modèle.

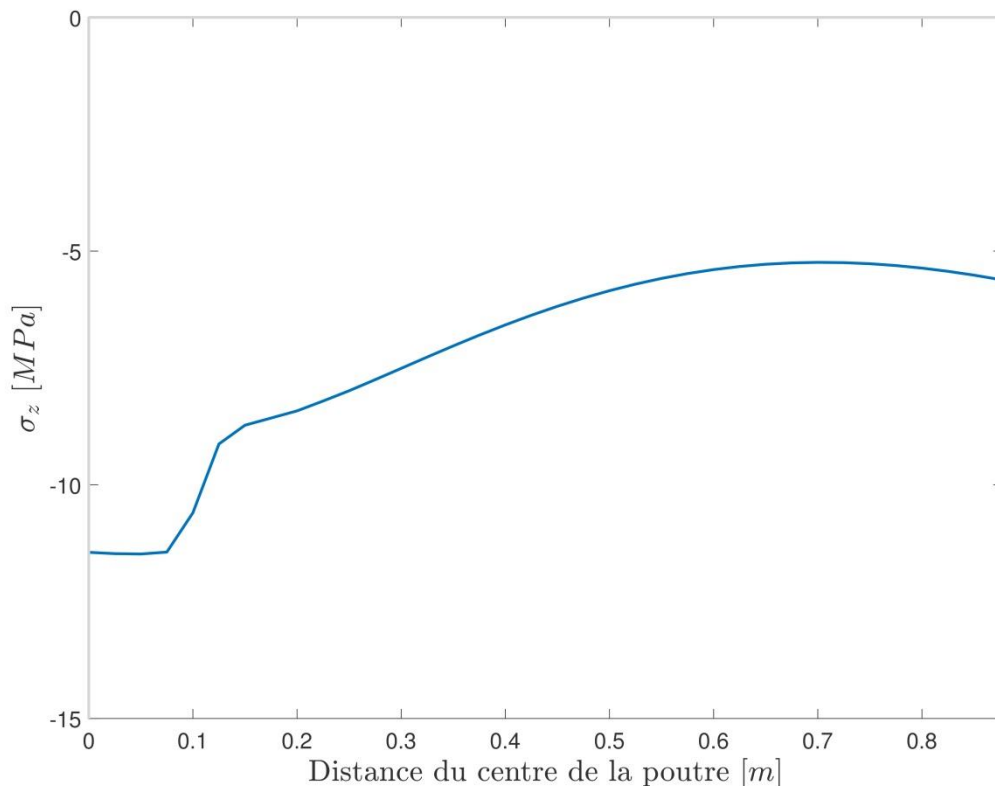


Figure 4.4 : Répartition des contraintes dans le bas du platelage pour le modèle 1 avec les extrusions posées longitudinalement pour le chargement de camions

La répartition des contraintes dans le bas du platelage permet de constater l'effet du décalage en cisaillement dans la paroi attachée. Il y a donc concentration de contraintes au-dessus de la poutre. La contrainte dite « minimale » pour le calcul de l'aire effective est prise à cet endroit. La distribution n'a toutefois pas l'allure attendue, soit une courbe de forme parabolique. Le plateau du centre pourrait être une conséquence de l'utilisation de l'outil *Tie* d'ABAQUS, qui fusionne les nœuds des surfaces attachées afin de représenter l'action composite parfaite. Cette contrainte est une représentation beaucoup plus rigide que ce qui est fait en réalité comme connexion entre la poutre et le platelage. Pour cette contrainte, la surface *master* est celle de la poutre. Les contraintes obtenues dans le bas du platelage sont donc influencées par celles de la poutre. Enfin, le saut existant entre le plateau et le reste de la courbe représente la transition entre l'arête de l'aile supérieure de la poutre et le bas du platelage.

Les graphiques de répartition de contraintes sont essentiels pour le calcul de l'aire effective. Tous les graphiques des autres modèles sont donnés à l'Annexe E.

Un exemple de calcul d'aire effective est présenté ci-dessous. Les valeurs utilisées sont celles du modèle 1 avec les extrusions posées transversalement aux poutres. La portée est de 15 m et l'espacement des poutres est de 1,755 m. Le type de chargement est le camion CL-625.

L'équation utilisée est la suivante (voir section 3.4) :

$$A_{eff} = \frac{C_{platelage}}{0,5 * (\sigma_{max} + \sigma_{min})} \quad \text{Équation 26}$$

La valeur de  $\sigma_{max}$  correspond à la valeur de la contrainte longitudinale dans le haut du platelage tandis que  $\sigma_{min}$  correspond à celle dans le bas du platelage. La force de compression totale dans le haut et le bas du platelage est obtenue à l'aide de l'outil *Free body cut* du logiciel ABAQUS (voir section 3.4). Les diagonales ne sont pas prises en compte, car elles ne travaillent pas pour résister au moment longitudinal lorsque les extrusions sont installées transversalement aux poutres.

Ainsi l'aire effective obtenue pour le premier modèle correspond à :

$$A_{eff} = \frac{-248650 \text{ N}}{0,5 * (-29,0451 \text{ MPa} + -11,4449 \text{ MPa})} = 12282,04 \text{ mm}^2$$

Puis, pour le calcul de l'aire totale tributaire à la poutre, encore une fois, l'aire des diagonales est négligée. La largeur tributaire est divisée en deux, car la symétrie de la charge pour la poutre de centre est utilisée. Ainsi, l'aire totale correspond à :

$$A_{tot} = \frac{B}{2} * (t_{bas} + t_{haut}) \quad \text{Équation 27}$$

où

$A_{tot}$  = Aire tributaire à la poutre à l'étude ( $mm^2$ ) ;

$B$  = Largeur tributaire de la poutre à l'étude ( $mm$ ) ;

$t_{bas}$  = Épaisseur du bas du platelage ( $mm$ ) ;

$t_{haut}$  = Épaisseur du haut du platelage ( $mm$ ).

L'aire totale donne donc :

$$A_{tot} = \frac{1775}{2} \text{ mm} * (6 \text{ mm} + 8 \text{ mm}) = 12425 \text{ mm}^2$$

Le ratio qui sera utilisé pour la comparaison entre les différents modèles devient alors :

$$\frac{A_{eff}}{A_{tot}} = \frac{12282,04 \text{ mm}^2}{12425 \text{ mm}^2} = 0,9885$$

Les résultats des ratios pour tous les autres modèles avec les extrusions transversales sont présentés à la Figure 4.5.

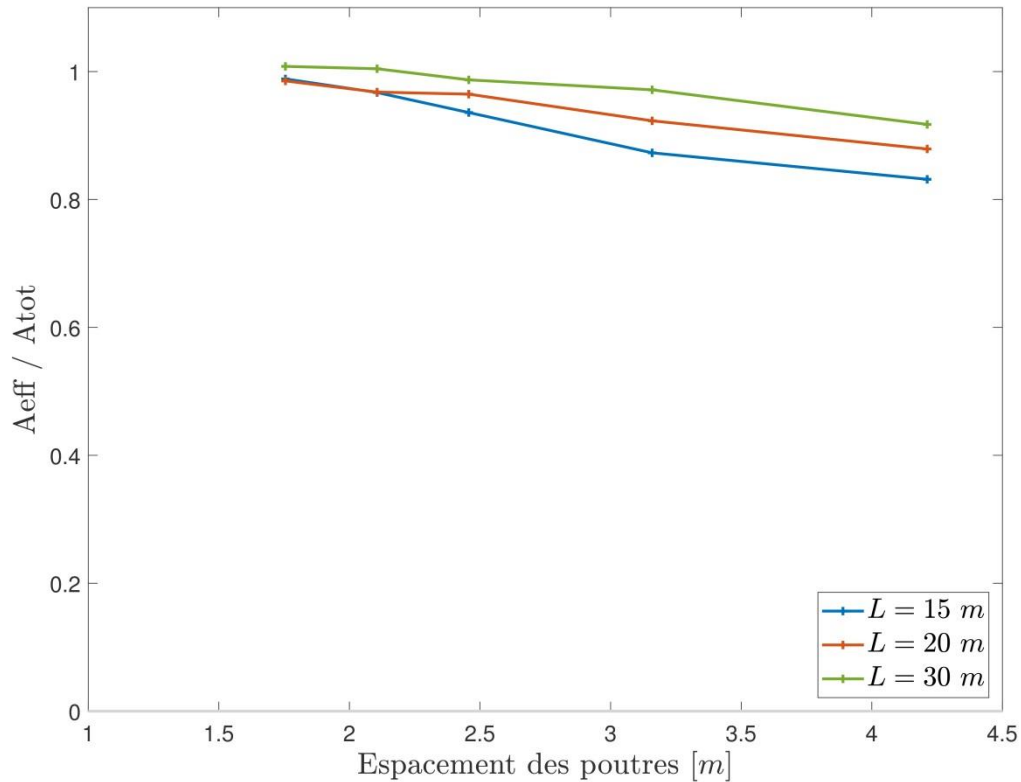


Figure 4.5 : Ratio d'aire effective sur l'aire totale pour tous les modèles avec les extrusions posées transversalement

Les tendances observées sur le graphique sont celles attendues. Ainsi, plus la portée augmente, plus l'aire effective augmente également. En fait, lorsque la portée augmente, l'effet du décalage en cisaillement est moins important puisque la longueur totale de l'assemblage correspond à la portée du pont. Comme il a été vu à la section 2.3.3, une plus grande longueur d'assemblage tend à diminuer l'effet du décalage en cisaillement. Ainsi, l'aire effective augmente avec la portée puisque le décalage en cisaillement est moins important. De plus, plus l'espacement des poutres augmente, plus l'aire effective diminue. Ce résultat est logique, car plus la largeur tributaire est grande, plus il est difficile d'avoir la participation totale du platelage.

## 4.2.2 Extrusions installées longitudinalement

Les résultats présentés dans cette section proviennent des analyses faites avec les modèles avec les extrusions parallèles aux poutres.

### 4.2.2.1 Charge de camion

Les résultats qui suivent proviennent des analyses faites avec le chargement de camion recommandé par la norme canadienne, soit le CL-625.

La Figure 4.6 représente la répartition des contraintes dans le haut du platelage pour le modèle 1 avec les extrusions installées longitudinalement.

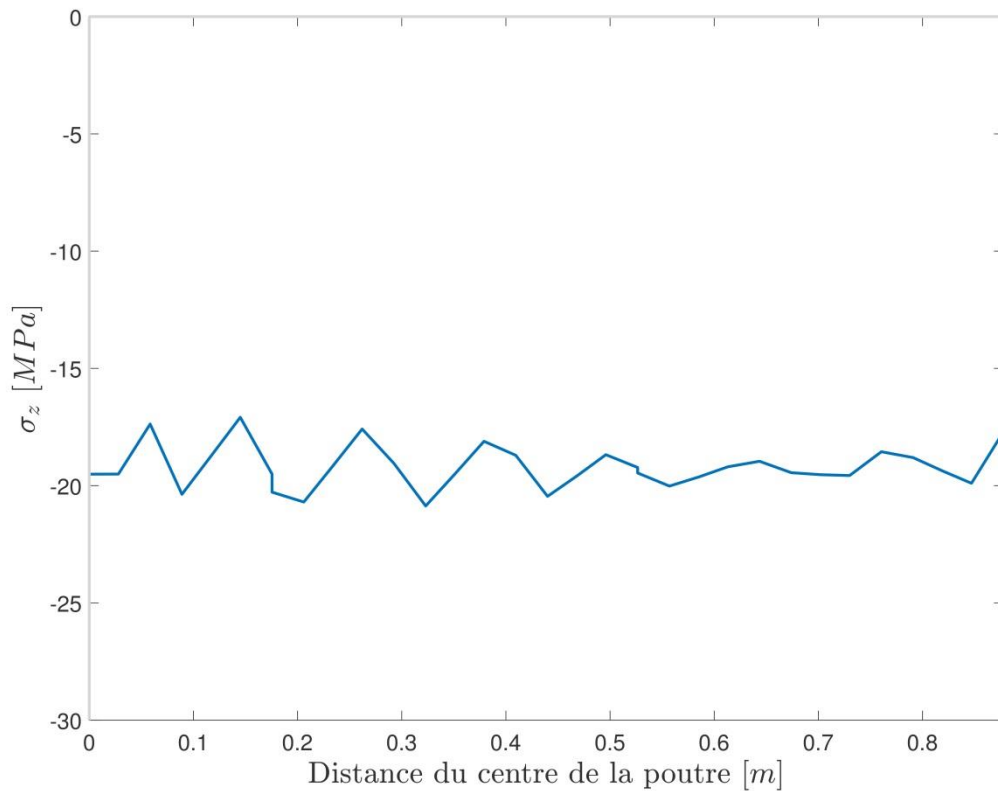


Figure 4.6 : Répartition des contraintes dans le haut du platelage pour le modèle 1 avec les extrusions posées longitudinalement aux poutres avec le chargement de camion

La distribution des contraintes est beaucoup moins lisse que lorsque les extrusions sont transversales. La forme des extrusions crée des concentrations de contraintes très locales là

où les diagonales viennent se rattacher au haut ou au bas du platelage. Ainsi, une hypothèse de calcul a été posée afin d'avoir une meilleure comparaison entre les résultats. La valeur prise pour le calcul de l'aire effective sera toujours celle de la contrainte du platelage directement au-dessus de la poutre. Enfin, il est possible de constater que la valeur des contraintes est globalement constante pour le haut du platelage. Il ne semble pas avoir de concentration de contraintes globale au-dessus de la poutre due à l'effet du décalage en cisaillement. Le même raisonnement que pour les extrusions transversales peut être appliqué, soit que la concentration de contrainte se produit plutôt dans la paroi rattachée. L'effet local des essieux est représenté par un « écrasement » des contraintes sous l'essieu.

La Figure 4.7 donne la distribution des contraintes dans le bas du platelage pour le même modèle.

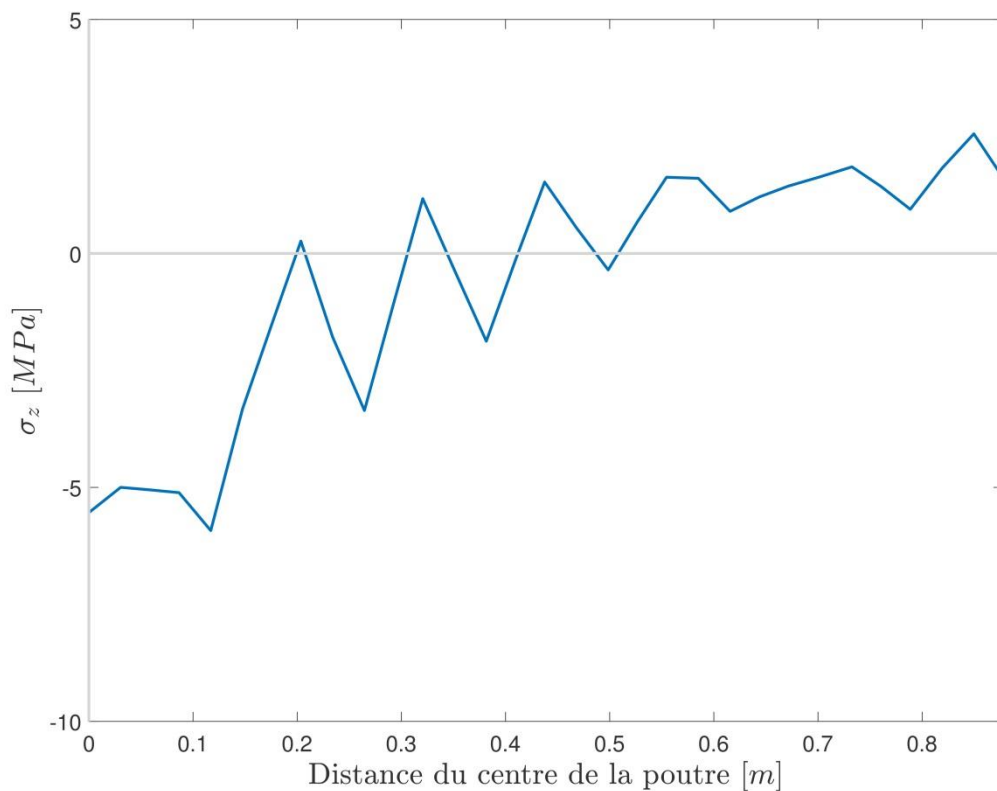


Figure 4.7 : Répartition des contraintes dans le bas du platelage pour le modèle 1 avec les extrusions posées longitudinalement aux poutres pour le chargement de camions

Encore une fois, la distribution des contraintes présente des concentrations de contraintes très locales dues à la géométrie des extrusions. Malgré tout, il est possible de constater une concentration globale des contraintes au-dessus de la poutre due au décalage en cisaillement. La valeur de la contrainte dite « minimale » est toujours prise juste au-dessus de la poutre, à des fins de simplification pour la comparaison entre les modèles. Enfin, il est possible de constater que les contraintes deviennent rapidement positives en s'éloignant de la poutre. Ce constat est dû au phénomène local des essieux, qui est plus important lorsque les extrusions sont parallèles aux poutres. Le platelage est plus résistant lorsqu'il travaille dans le sens de l'extrusion. Ainsi, lorsque le sens de l'extrusion du platelage est posé dans le sens longitudinal, la résistance au moment transversal provoqué par la présence des essieux entre les poutres est plus faible. De la traction se développe alors rapidement dans le bas du platelage. Pour le calcul de l'aire effective, seuls les éléments en compression sont considérés comme contribuant à la résistance de la poutre mixte.

Un exemple de calcul est montré ci-dessous. Les valeurs utilisées sont celles du modèle 1 avec les extrusions posées longitudinalement. La portée est de 15 m et l'espacement des poutres est de 1,755 m.

L'équation utilisée est toujours la même, soit

$$A_{eff} = \frac{C_{platelage}}{0,5 * (\sigma_{max} + \sigma_{min})} \quad \text{Équation 28}$$

La méthode pour déterminer la force de compression dans le platelage est légèrement différente de celle utilisée avec les extrusions posées transversalement. L'outil *Free body cut* d'ABAQUS est encore utilisé, mais en isolant les diagonales et le haut du platelage. Étant donné qu'il y a de la traction qui se développe dans le bas du platelage, le calcul de la force de compression se fait à la main pour cette partie du platelage. Ainsi, la valeur de force de compression dans les diagonales et le haut du platelage trouvée à l'aide du logiciel est additionnée à celle trouvée pour le bas du platelage afin de trouver la force de compression totale dans le platelage.

Afin de déterminer la force de compression dans le bas du platelage, l'équation suivante est utilisée :

$$C_{\text{platelage\_bas}} = \sum_i^{n\_elem} \sigma_{\text{comp}_i} * A_i \quad \text{Équation 29}$$

où

$C_{\text{platelage\_bas}}$  = Force de compression totale dans le bas du platelage ( $N$ ) ;

$n\_elem$  = Nombre d'éléments en compression ;

$\sigma_{\text{comp}_i}$  = Contraintes de compression dans l'élément  $i$  ( $MPa$ ) ;

$A_i$  = Aire de l'élément  $i$  ( $mm^2$ ).

À des fins de simplification de calcul, une aire moyenne des éléments est calculée, soit :

$$A_{\text{moy\_elem}} = L_{\text{moy}} * t_{\text{bas}} \quad \text{Équation 30}$$

où

$A_{\text{moy\_elem}}$  = Aire moyenne pour les éléments du bas ( $mm^2$ ) ;

$L_{\text{moy}}$  = Longueur moyenne pour les éléments du bas ( $mm$ ) ;

$t_{\text{bas}}$  = Épaisseur du bas du platelage ( $mm$ ).

L'équation de départ pour le calcul de la force de compression devient alors :

$$C_{\text{platelage\_bas}} = A_{\text{moy\_elem}} \sum_i^n \sigma_{\text{comp}_i} \quad \text{Équation 31}$$

Ainsi, pour le modèle 1 avec les extrusions parallèles, l'aire moyenne des éléments du bas donnait :

$$A_{\text{moy\_elem}} = 29,25 \text{ mm} * 6 \text{ mm} = 175,5 \text{ mm}^2$$



La somme des contraintes de compression est calculée à l'aide des contraintes extraites le long de la largeur tribulaire de la poutre. Pour le modèle 1, la somme des contraintes de compression donne -40,41 MPa.

Ainsi, la force de compression dans le bas du platelage devient :

$$C_{\text{platelage\_bas}} = A_{\text{moyelem}} \sum_i^n \sigma_{\text{comp}_i} = 175,5 \text{ mm}^2 * -40,41 \text{ MPa} = -7092,4 \text{ N}$$

La force de compression dans les diagonales et le haut du platelage déterminée à l'aide de l'outil *Free body cut* d'ABAQUS peut alors être additionnée à celle du bas du platelage, ce qui donne :

$$C_{\text{platelage}} = C_{\text{platelage\_bas}} + C_{\text{platelage\_diag\_haut}} \quad \text{Équation 32}$$

$$C_{\text{platelage}} = -7092,4 \text{ N} + -335400 \text{ N} = -342492,4 \text{ N}$$

Il est possible de remarquer que la contribution du bas du platelage est beaucoup plus faible que celle des diagonales avec le haut du platelage.

L'aire effective donne donc :

$$A_{\text{eff}} = \frac{-342492,4 \text{ N}}{0,5 * (-19,51 + -5,54)} = 27345,70 \text{ mm}^2$$

Enfin, le ratio d'aire effective sur l'aire totale est calculé. Pour les extrusions posées longitudinalement aux poutres, les diagonales travaillent pour résister au moment longitudinal. C'est pourquoi l'aire totale est posée comme étant l'aire d'une section d'extrusion multipliée par le nombre d'extrusion présent dans la largeur tribulaire de la poutre. Ainsi,

$$A_{\text{tot}} = A_{\text{section}} * n_{\text{section}} \quad \text{Équation 33}$$

où

$A_{\text{tot}}$  = Aire totale tribulaire à la poutre à l'étude ( $\text{mm}^2$ ) ;

$A_{\text{section}}$  = Aire d'une section d'extrusion ( $\text{mm}^2$ ) ;

$n_{section}$  = Nombre de section dans la largeur effective de la poutre.

Avec les données pour le modèle 1, l'aire totale devient :

$$A_{tot} = 17954,82 \text{ mm}^2 * 2,5 = 44887,05 \text{ mm}^2$$

Ici, seulement la moitié de l'aire tributaire est utilisée, car la poutre de centre est coupée en deux par la symétrie utilisée pour la création du modèle. C'est pourquoi seulement 2,5 extrusions sont comptées dans le calcul de l'aire totale.

Finalement, le ratio peut être calculé comme suit :

$$\frac{A_{eff}}{A_{tot}} = \frac{27345,70 \text{ mm}^2}{44887,05 \text{ mm}^2} = 0,61$$

Les résultats du ratio pour tous les autres modèles sont présentés à la Figure 4.8.

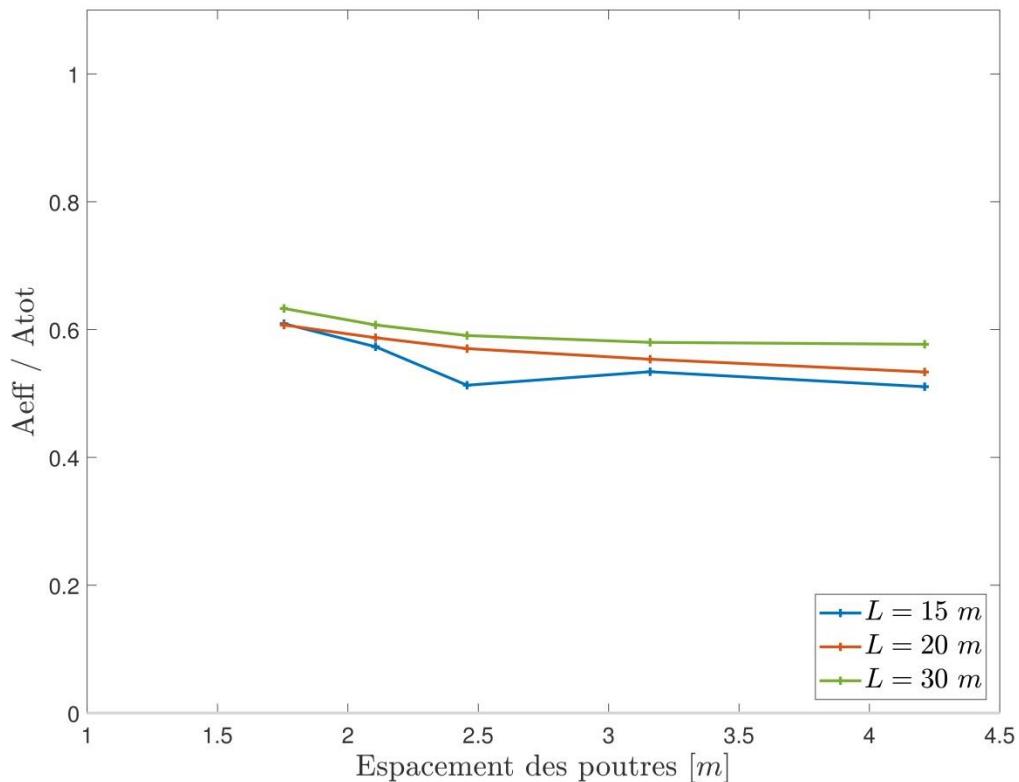


Figure 4.8 : Ratio d'aire effective sur l'aire totale pour tous les modèles avec les extrusions posées longitudinalement pour le chargement de camions

Les mêmes tendances que celles pour les extrusions transversales peuvent être observées pour les résultats des ratios d'aire effective sur l'aire totale. Ainsi, plus l'espacement des poutres augmente, plus l'aire effective diminue. De plus, plus la portée augmente, plus l'aire effective augmente. L'aire effective augmente avec la portée, car l'effet du décalage en cisaillement diminue plus l'assemblage est long. Enfin, plus les poutres sont distancées, plus il est difficile d'atteindre la participation de toute l'aire totale sur la largeur tributaire de la poutre à l'étude.

#### 4.2.2.2 Charge uniformément répartie

Les résultats qui suivent proviennent des analyses faites avec un chargement uniformément réparti, équivalent à celui du camion recommandé par la norme canadienne (voir section 3.2.2). La Figure 4.9 représente la répartition des contraintes dans le haut du platelage pour le modèle 1 avec les extrusions installées longitudinalement aux poutres.

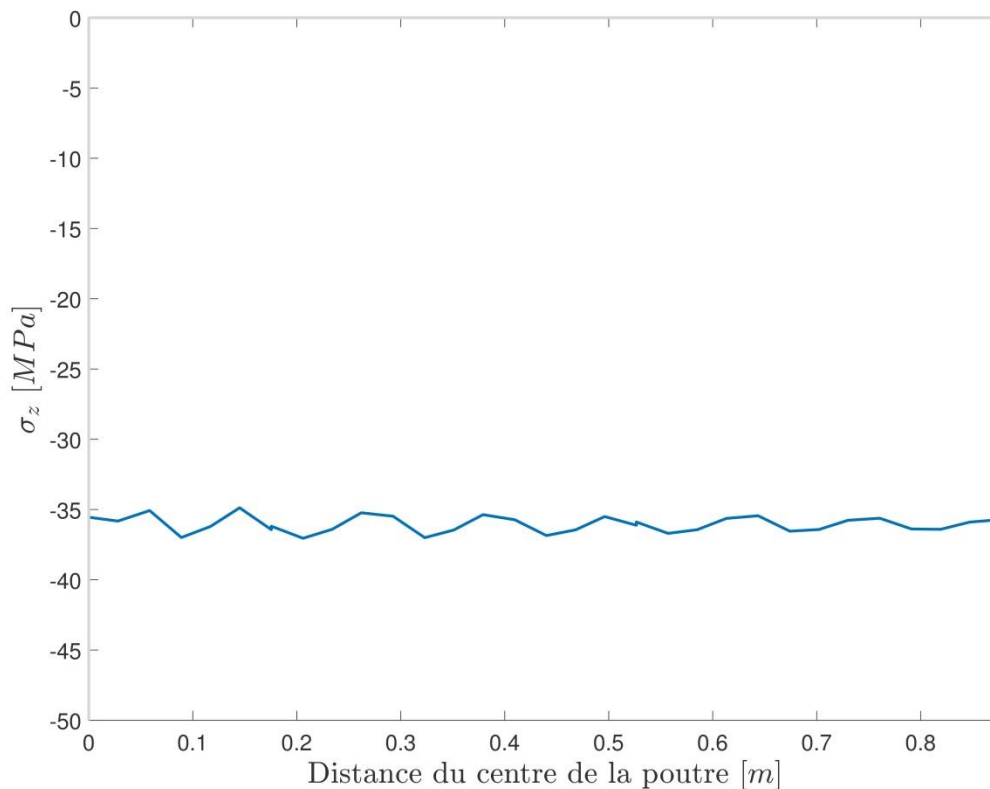
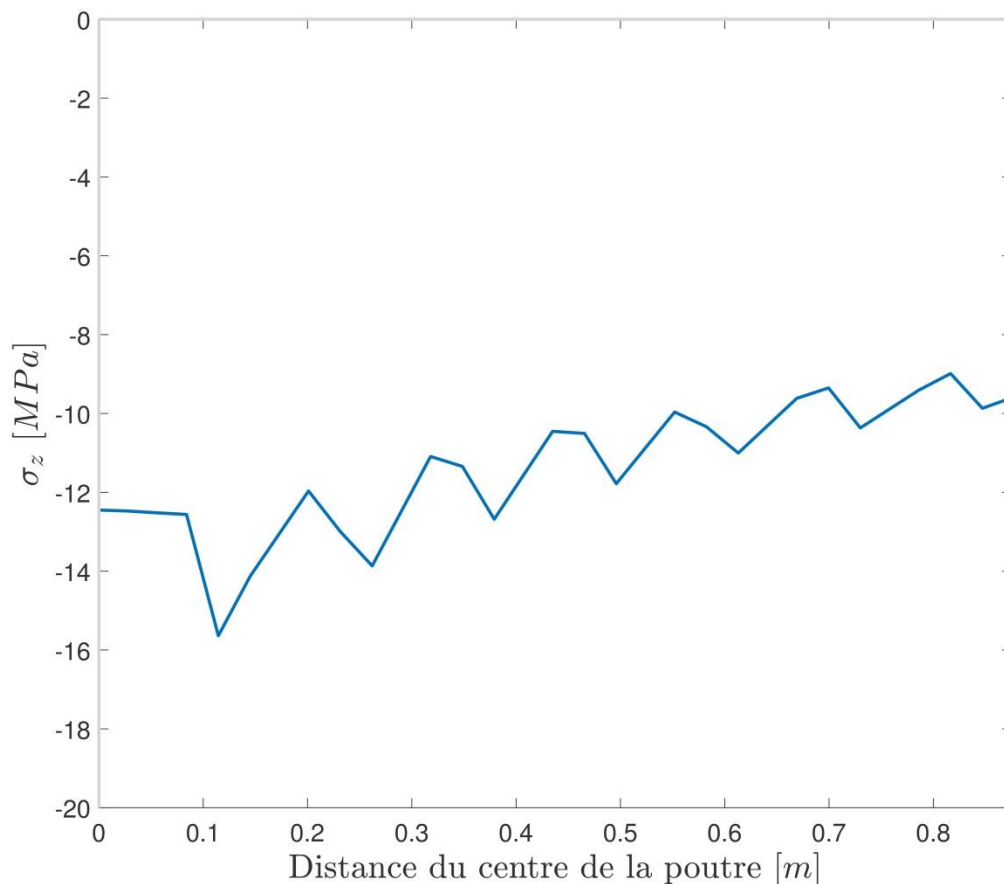


Figure 4.9 : Répartition des contraintes dans le haut du platelage pour le modèle 1 avec les extrusions posées longitudinalement pour le chargement uniforme

Il est possible de constater que la répartition des contraintes semble relativement uniforme, mise à part des concentrations très locales de contraintes dues à la géométrie de l'extrusion. Cependant, la perturbation due à ces concentrations locales est moins importante que ce qu'il est possible d'observer avec le chargement de camions. Enfin, il n'y a pas de concentration globale dû au décalage en cisaillement, comme c'était le cas pour toutes les autres répartitions de contraintes dans le haut du platelage.

Le graphique suivant représente la répartition des contraintes dans le bas du platelage pour le même modèle.



*Figure 4.10 : Répartition des contraintes dans le bas du platelage pour le modèle 1 avec les extrusions posées longitudinalement pour le chargement uniforme*

La répartition des contraintes dans le bas du platelage présente un plateau là où l'aile de la poutre se situe. Directement après, une concentration de contrainte très locale est observée. Cette concentration semble être due encore une fois à la géométrie de l'extrusion, comme

c'est le cas des autres concentrations très locales de contraintes. La même logique est appliquée pour le choix de la contrainte à utiliser pour le calcul de l'aire effective. Ainsi, malgré qu'il existe des contraintes plus élevées, c'est celle directement au-dessus de la poutre qui est utilisée. De plus, il est possible de constater une augmentation des contraintes proche de la poutre. C'est l'effet du décalage en cisaillement. Enfin, aucune traction ne s'est développée dans le bas du platelage.

La Figure 4.11 montre tous les résultats des ratios d'aire effective pour les autres modèles avec le chargement uniformément réparti.

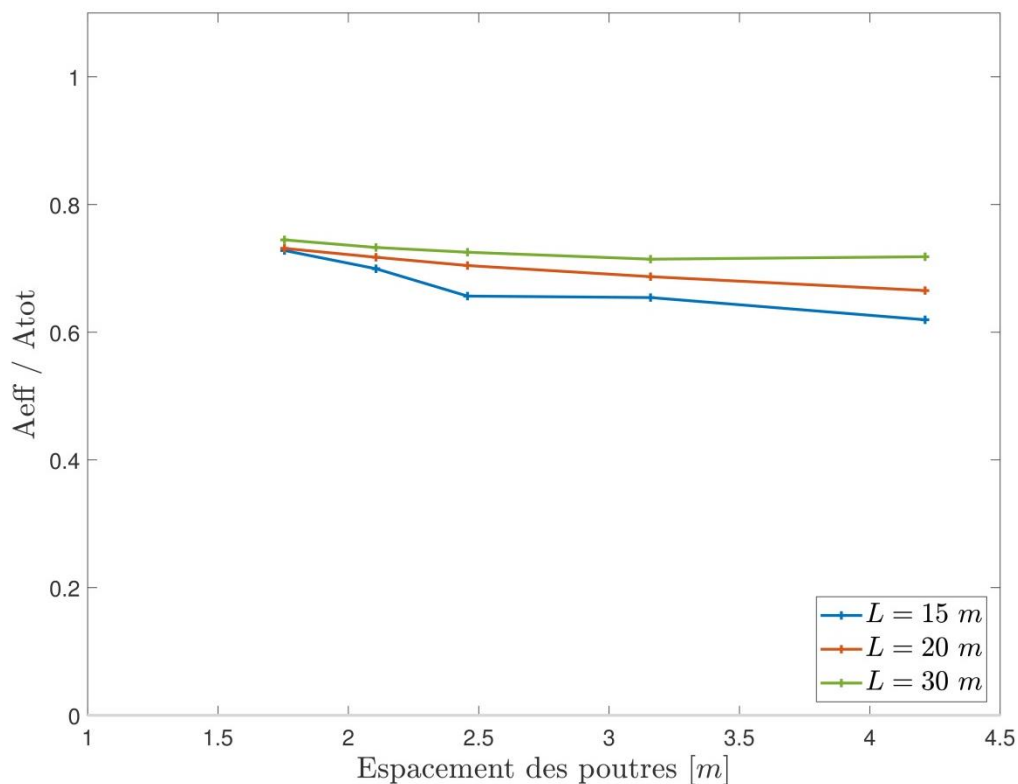


Figure 4.11 : Ratio d'aire effective sur l'aire totale pour tous les modèles avec les extrusions posées longitudinalement pour le chargement uniforme

Les mêmes observations peuvent être appliquées pour les résultats des ratios d'aire effective sur l'aire totale. Ainsi, plus la portée augmente, plus l'aire effective augmente et plus l'espacement des poutres augmente, plus l'aire effective diminue.

# Chapitre 5 Discussion

## 5.1 Fraction de charge de camion

### 5.1.1 Comparaison entre les deux dispositions

La Figure 5.1 contient les résultats des fractions de charge obtenus pour les extrusions installées transversalement et longitudinalement aux poutres pour la poutre de centre. Les traits pointillés correspondent à la disposition transversale des extrusions tandis que les traits continus correspondent à la disposition longitudinale.

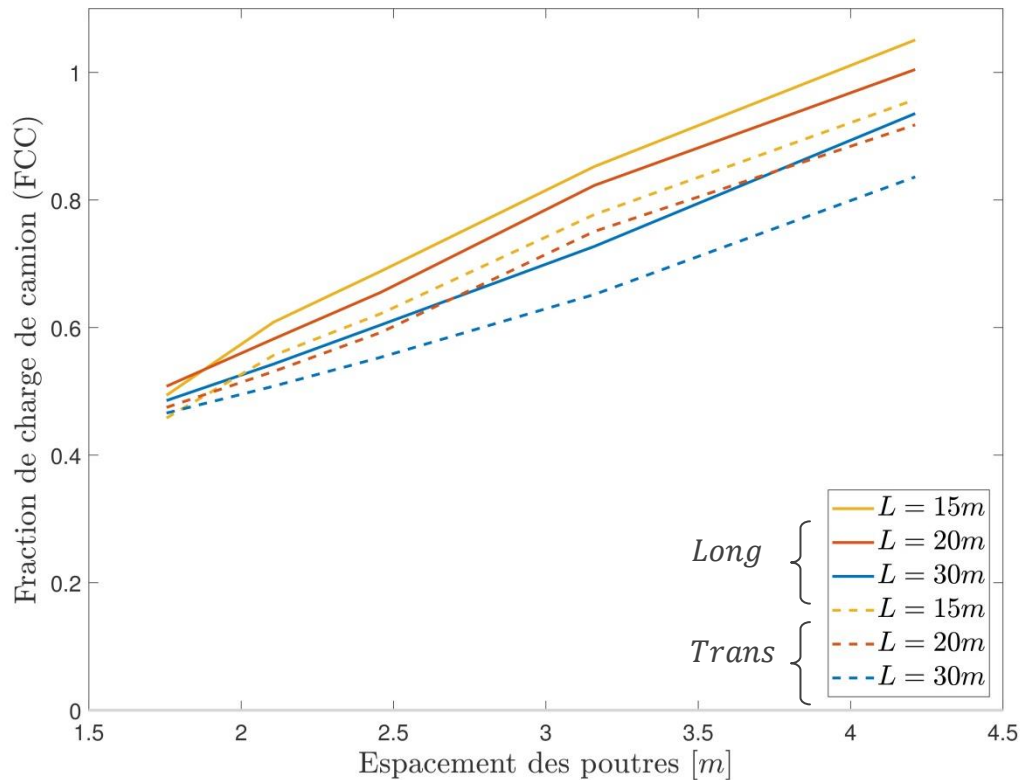


Figure 5.1 : Comparaison des fractions de charge de camion entre les deux dispositions des extrusions pour la poutre de centre

À l'aide de la Figure 5.1, il est possible de venir comparer les résultats des fractions de charge obtenus pour la poutre de centre pour les deux dispositions. Pour toutes les configurations de ponts, les valeurs obtenues avec les extrusions parallèles sont toujours supérieures à celles obtenues avec les extrusions transversales. Cette constatation est celle attendue, étant donné que la résistance du plâlage est plus grande lorsque ce dernier travaille dans le sens de l'extrusion. Ainsi, lorsque le sens de l'extrusion est transversal aux

poutres, le platelage est plus apte à transférer les charges aux autres poutres. Toutefois, la différence entre les résultats obtenus pour les deux dispositions est relativement faible, allant de 5% à 10%. Ce résultat est assez surprenant, car la différence de rigidité flexionnelle entre la résistance du platelage lorsque celui-ci travaille dans le sens des extrusions et lorsqu'il travaille perpendiculairement au sens de l'extrusion est d'environ 35%. Cette valeur est basée sur des analyses faites à partir de modèles représentant le platelage sur appui simple soumis à un chargement uniformément réparti. Le ratio de la portée sur la largeur du platelage modélisé varie d'un modèle à un autre. La démarche complète ainsi que les résultats des modèles sont présentés à l'Annexe F.

La Figure 5.2 donne les résultats obtenus pour la poutre de rive pour les deux dispositions. Les traits pointillés représentent la disposition transversale des extrusions, tandis que les traits continus sont utilisés pour la disposition longitudinale.

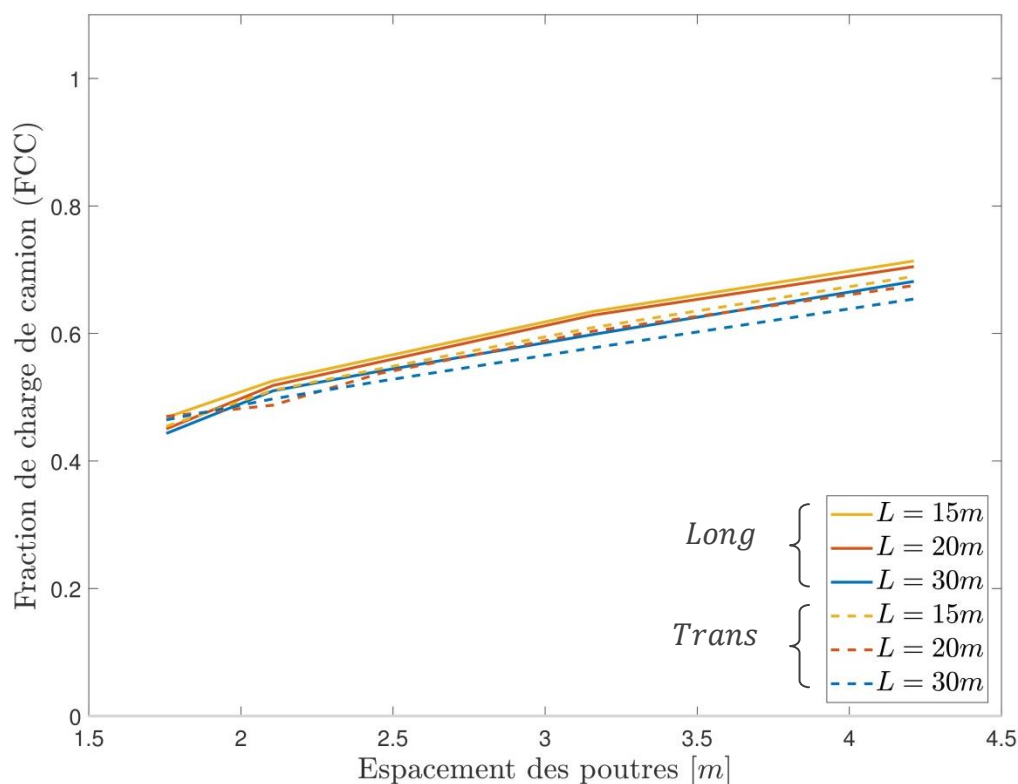


Figure 5.2 : Comparaison des fractions de charge de camion entre les deux dispositions des extrusions pour la poutre de rive

Il est possible de constater qu'encore une fois, les valeurs des fractions de charge de camion pour la disposition longitudinale des extrusions sont toujours supérieures à celles trouvées pour la disposition transversale. Cependant, la différence entre les deux est minime, soit de l'ordre de 3% à 5%. Ainsi, en observant la Figure 5.2, il est possible de remarquer que toutes les courbes de portées différentes se retrouvent relativement superposées l'une sur l'autre. Ce qui signifie que l'influence de la portée sur la fraction de charge de camion est relativement minime. L'espacement des poutres a un impact plus important sur les fractions de charge obtenues, les valeurs passant de 0,5 à 0,7 environ plus l'espacement augmente. Toutefois, son influence est moins grande que pour la poutre de centre. En fait, un des paramètres ayant le plus d'impact sur la poutre de rive pour la fraction de charge de camion est la longueur en porte-à-faux ; cette dernière était constante pour tous les modèles. Les résultats pour la poutre de rive ne sont donc pas très concluants.

#### 5.1.2 Comparaison avec la norme S6

Une comparaison avec les résultats de la norme lorsqu'un platelage en aluminium est utilisé a également été faite. Le graphique suivant permet de comparer les valeurs obtenues à l'aide des modèles avec celles que la norme fournit. À des fins de clarté visuelle, seuls les résultats pour la portée de 15 m pour la poutre de centre sont montrés sur le graphique, car ce sont les plus grandes valeurs obtenues avec les modèles (voir section 4.1.1 et section 4.1.2). La comparaison est donc faite avec les valeurs les plus critiques.



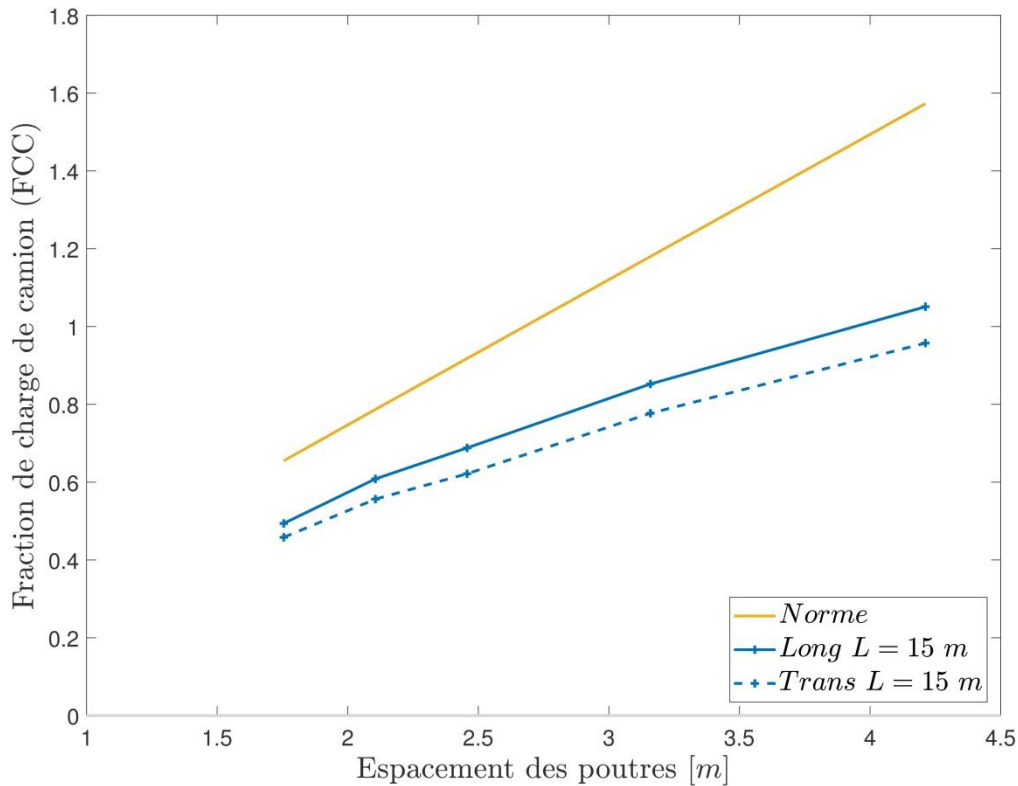
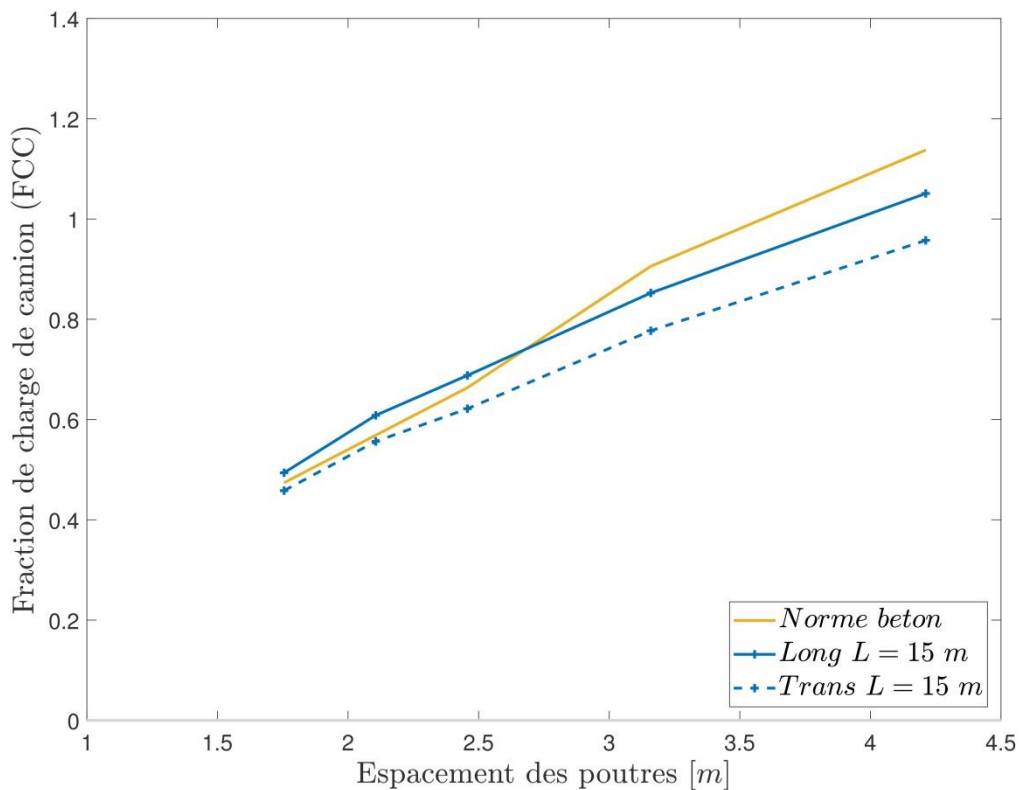


Figure 5.3 : Comparaison avec la norme avec les résultats des fractions de charge obtenus avec les modèles

Tout d’abord, les valeurs obtenues dépassent parfois la valeur de 1, car lorsque le chargement de type camion est utilisé en suivant les étapes de la norme, il est possible de se retrouver avec plus d’un camion, dépendamment du chargement le plus critique pour la poutre à l’étude (voir section 3.2.2). Lorsque plus d’une voie est chargée, un coefficient de réduction est utilisé (voir Tableau 3.4). Enfin, il est possible de constater qu’effectivement, la norme fournit des valeurs nettement supérieures à ce qui a été calculé avec les modèles d’éléments finis. L’écart entre les résultats est d’environ 25% à 40% pour les plus grands espacements. Les espacements de plus de 3 m entre les poutres sont assez rares en pratique, c’est pourquoi il est possible de voir un aussi grand écart entre la norme et les modèles. De plus, la norme indique à l’article 5.6.2, paragraphe h) et v) que l’utilisation de la méthode simplifiée proposée limite l’espacement des poutres à 4 m et moins. Le choix d’avoir pris de si grands espacements était basé sur un désir de voir le comportement du platelage à l’extrême. L’extrapolation de la méthode de la norme à une valeur d’espacement de poutre

de 4,212 m est admise. La comparaison avec la norme a pour but d'avoir une idée de la différence entre ses valeurs préconisées et celles obtenues avec les modèles, et la tendance est claire dès le début que la norme est trop restrictive. Une fraction de charge de 30% plus élevée a un grand impact sur les dimensions des poutres requises.

Par curiosité, une comparaison avec les valeurs données par la norme dans le cas où un platelage en béton serait utilisé a été réalisée. La Figure 5.4 montre les résultats obtenus.



*Figure 5.4 : Comparaison des valeurs des fractions de charge pour un platelage en béton avec celles obtenues avec les modèles*

Les valeurs trouvées à l'aide de la norme pour un platelage en béton sont assez proches de celles obtenues avec les modèles. Pour les espacements de poutres de moins de 3 m, les valeurs obtenues avec le platelage en béton sont plus faibles que celles obtenues avec les modèles aux extrusions installées longitudinalement aux poutres. Toutefois, elles sont légèrement au-dessus de celles obtenues avec les extrusions posées transversalement. Ainsi, selon les résultats, la disposition transversale des extrusions a un aussi bon comportement,

voire légèrement mieux que le platelage en béton pour transmettre les charges de camion aux poutres. De plus, lorsque l'espacement des poutres devient plus grand que 3 m, les fractions de charge de camion pour le platelage en béton sont plus élevées que celles pour un platelage en aluminium, qu'importe l'orientation des extrusions. Toutefois, il est connu que la norme produit des valeurs toujours plus sécuritaires que la réalité, et la méthode proposée pour le calcul des fractions de charge de camion est limitée à un espacement de 4 m. Les résultats avec cette échelle d'espacements de poutres sont donc moins concluants.

## **5.2 Aire effective**

### **5.2.1 Comparaison entre les deux dispositions**

La Figure 5.5 montre la comparaison entre les résultats des ratios d'aire effective sur l'aire totale des modèles avec les extrusions posées longitudinalement et celles posées transversalement. Le type de chargement utilisé est celui du camion CL-625. L'axe des abscisses représente le ratio de la portée ( $L$ ) sur l'espacement des poutres ( $B$ ). En utilisant un tel ratio, il est possible de voir l'influence des deux paramètres avec une seule courbe. De plus, la comparaison entre les deux types de dispositions est plus simple lorsqu'une seule courbe est utilisée pour toutes les configurations des modèles.

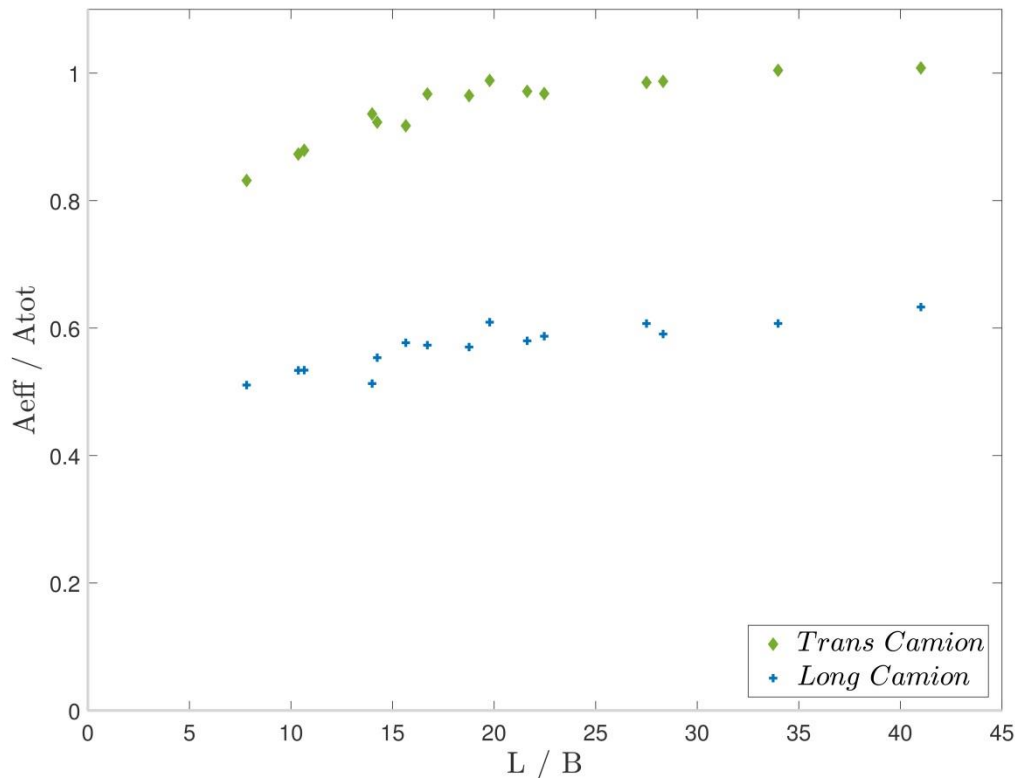


Figure 5.5 : Comparaison des ratios d'aire effective sur l'aire totale pour les deux dispositions dans le cas du chargement du camion CL-625

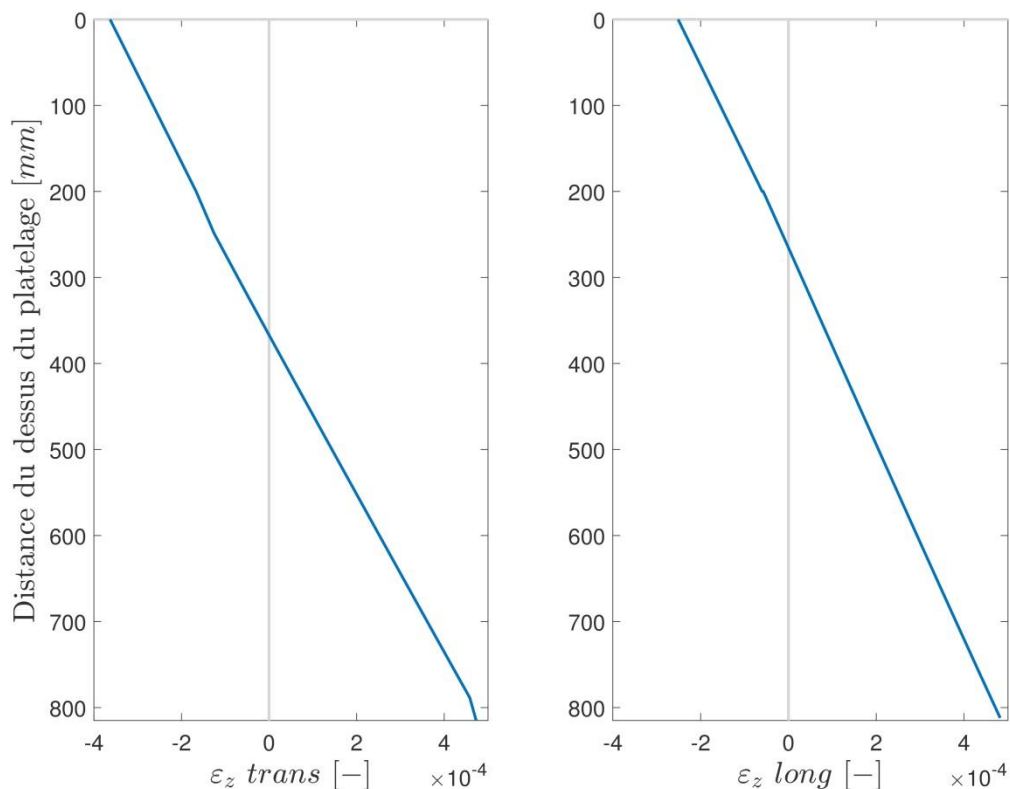
Il est possible de voir que les résultats pour la disposition longitudinale des extrusions sont toujours bien plus bas que ceux avec la disposition transversale. Les valeurs des ratios pour les extrusions parallèles n'atteignent même pas 0,65, ce qui est très faible.

Deux hypothèses sont supposées pour expliquer des valeurs si faibles d'aire effective. Tout d'abord, il a été observé que de la traction se développait rapidement sous les essieux du camion. Comme il a été démontré à la section 4.2.2, les éléments en traction ne sont pas pris en compte dans le calcul de l'aire effective, ce qui réduit nécessairement l'aire considérée comme travaillant avec la poutre composite.

De plus, les diagonales sont prises en compte pour résister au moment longitudinal lorsque les extrusions sont installées longitudinalement aux poutres, contrairement aux extrusions transversales, où seulement le haut et le bas du platelage sont considérés. Il est donc possible d'admettre comme hypothèse que l'axe neutre de la poutre composite est plus haut lorsque les extrusions sont installées longitudinalement aux poutres. Un axe neutre plus

proche du bas du platelage contribue à ce que de la traction se développe plus rapidement sous l'effet local des essieux. Afin de valider cette hypothèse, l'axe neutre de tous les modèles a été déterminé. Les graphiques comparant l'axe neutre pour tous les modèles sont présentés à l'Annexe G

Un exemple est donné à la Figure 5.6. La figure donne la distribution des déformations selon l'axe longitudinal  $z$  le long de la hauteur de la poutre composite pour le modèle 1. Le haut du platelage est le point zéro de l'axe des  $y$  sur les graphiques. Le graphique de gauche est celui avec les extrusions posées transversalement et celui de droite est celui avec les extrusions posées longitudinalement. La position de l'axe neutre se situe là où la déformation est nulle.



*Figure 5.6 : Comparaison de la position de l'axe neutre entre le modèle 1 avec les extrusions posées transversalement et longitudinalement*

L'axe neutre pour le modèle 1 avec la disposition transversale des extrusions se situe à 367 mm tandis que pour la disposition longitudinale, l'axe neutre se situe plutôt à 265 mm. Une

différence d'environ 100 mm est observée. L'axe neutre pour le modèle avec la disposition longitudinale est donc effectivement plus proche du bas du platelage. Cette observation a été faite pour tous les autres modèles également (voir Annexe G). Ainsi, l'hypothèse est validée. Afin de ne plus avoir l'effet des essieux, et éviter le plus possible qu'il n'y ait de la traction qui se développe, il a été décidé d'utiliser un chargement uniformément réparti équivalent. Une comparaison est faite entre les deux types de chargements à la section suivante.

### 5.2.2 Comparaison entre les deux types de chargements

Le graphique suivant montre les résultats pour les deux types de chargements qui ont été utilisés pour les extrusions installées longitudinalement aux poutres. Les résultats des modèles avec les extrusions posées transversalement sont également présentés à titre de comparatif.

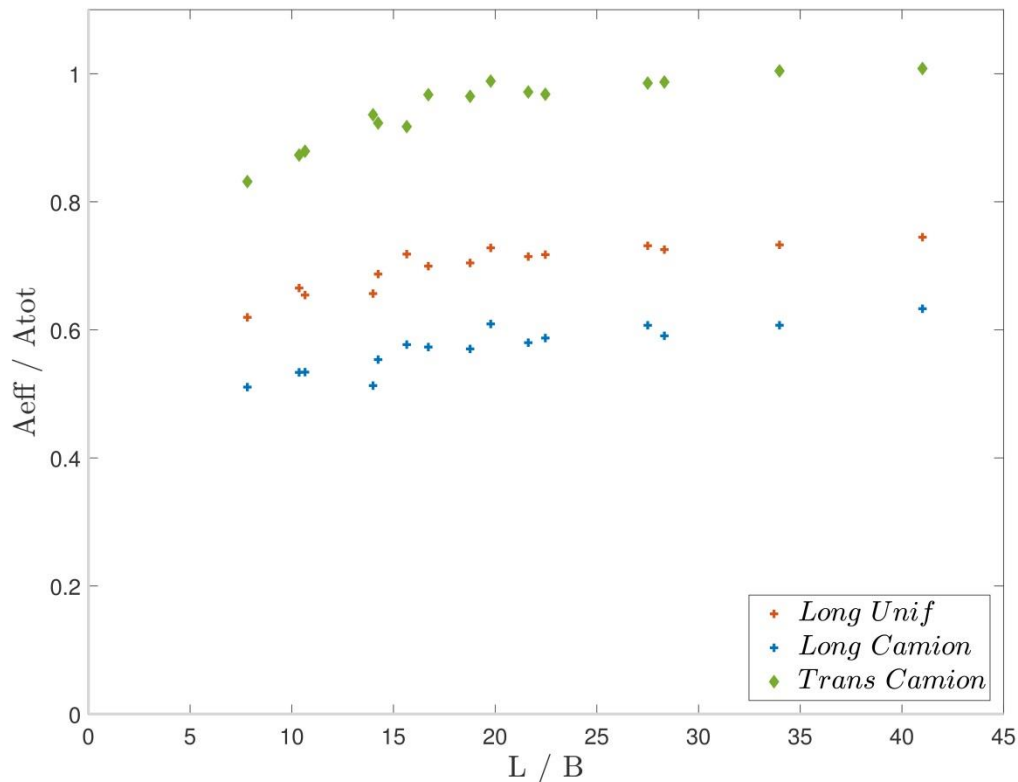


Figure 5.7 : Comparaison des ratios de l'aire effective sur l'aire totale pour les deux types de chargements utilisés

Les résultats obtenus avec le chargement uniformément réparti sont tous supérieurs à ceux obtenus avec le chargement de camion. Il a été également observé à l'aide des graphiques de répartition que les contraintes de compression obtenues avec le chargement uniformément réparti étaient toutes supérieures à celle obtenues avec le chargement de camion (voir Annexe E). Le chargement uniformément réparti calculé provoque donc des efforts plus importants. L'équivalence entre ce chargement et celui du chargement de camion comportait des hypothèses assez simplificatrices, et donc les deux chargements ne semblent pas exactement équivalents. Le chargement uniformément réparti serait donc plus important que celui du camion. Enfin, lorsqu'un chargement uniformément réparti est utilisé, la distribution des contraintes est meilleure, car la charge est appliquée partout uniformément.

Toutefois, malgré l'absence de traction le long de la largeur tribulaire de la poutre de centre (voir Annexe E), les valeurs trouvées pour les aires effectives lorsqu'un chargement uniformément réparti est appliqué sont assez faibles. La valeur maximale atteinte pour le ratio d'aire effective sur l'aire totale ne dépasse pas 0,75, comparativement à une valeur maximale de 1 pour les extrusions posées transversalement. Ce résultat est assez surprenant. Il serait étonnant que cette diminution importante de l'aire effective soit seulement due au décalage en cisaillement, surtout que le phénomène se produit seulement dans la paroi du bas. L'équation utilisée pour déterminer l'aire effective prend en considération que la distribution des contraintes le long de l'épaisseur du platelage varie linéairement (Timoshenko & Goodier, 1970). Toutefois, il a été constaté que pour le platelage en aluminium, cette distribution linéaire était plus ou moins respectée (voir Annexe H). Les diagonales travaillent différemment pour reprendre les efforts de compression et l'hypothèse de la distribution linéaire n'est pas tout à fait juste. Ainsi, l'équation utilisée n'est pas parfaitement adaptée pour un platelage ayant des ouvertures, comme c'est le cas pour un platelage en aluminium, et c'est peut-être pour cette raison que les valeurs des aires effectives sont aussi basses.

Normalement, le platelage est plus résistant lorsqu'il travaille dans le sens de l'extrusion puisque les diagonales travaillent également pour résister au moment flexionnel. Toutefois, l'aire effective issue des modules à extrusions parallèles est très faible, diminuant le

moment résistant de ces modèles. Afin de vérifier l'impact de cette faible aire effective sur le moment résistant de la poutre composite, ce dernier est calculé pour les deux dispositions (transversale et longitudinale) en prenant en compte l'aire effective obtenue. Le calcul est détaillé à la section suivante (section 5.2.3).

### 5.2.3 Calcul du moment résistant

Le calcul du moment résistant se fait à l'aide d'un document *Matlab* développé par un étudiant stagiaire, Samuel Petitclerc (Petitclerc, 2016). La méthodologie utilisée est basée sur la théorie des poutres. La poutre mixte acier et platelage d'aluminium est divisée en 100 couches. Tout d'abord, une courbure initiale est imposée, et par itérations, l'équilibre des forces est trouvé. Avec l'équilibre des forces, l'axe neutre est déterminé et il est alors possible de calculer le moment résistant. Puis, il y a incrémentation de la courbure, un nouvel équilibre des forces est calculé par itération, et ainsi de suite jusqu'à ce qu'une couche dépasse la déformation élastique. Le moment résistant maximal est alors trouvé.

L'aire du platelage utilisée pour le calcul du moment résistant correspond à l'aire du platelage tributaire à la poutre diminuée selon le rapport de l'aire effective sur l'aire totale (Équation 25) trouvé pour chacun des modèles (voir section 3.4).

Les ratios d'aire effective sur l'aire totale utilisés sont ceux trouvés avec le chargement de camion afin d'avoir le même type de chargement pour les deux dispositions. En effet, pour la disposition transversale des extrusions, seul le chargement de camion a été analysé. La comparaison entre les moments résistants pour les deux dispositions est donc plus juste. Elle est également plus critique, puisque les ratios obtenus avec ce type de chargement sont les plus faibles pour la disposition longitudinale.

Le graphique suivant montre le ratio des moments résistants maximaux pour les deux dispositions du platelage. Les résultats pour tous les modèles sont présentés.



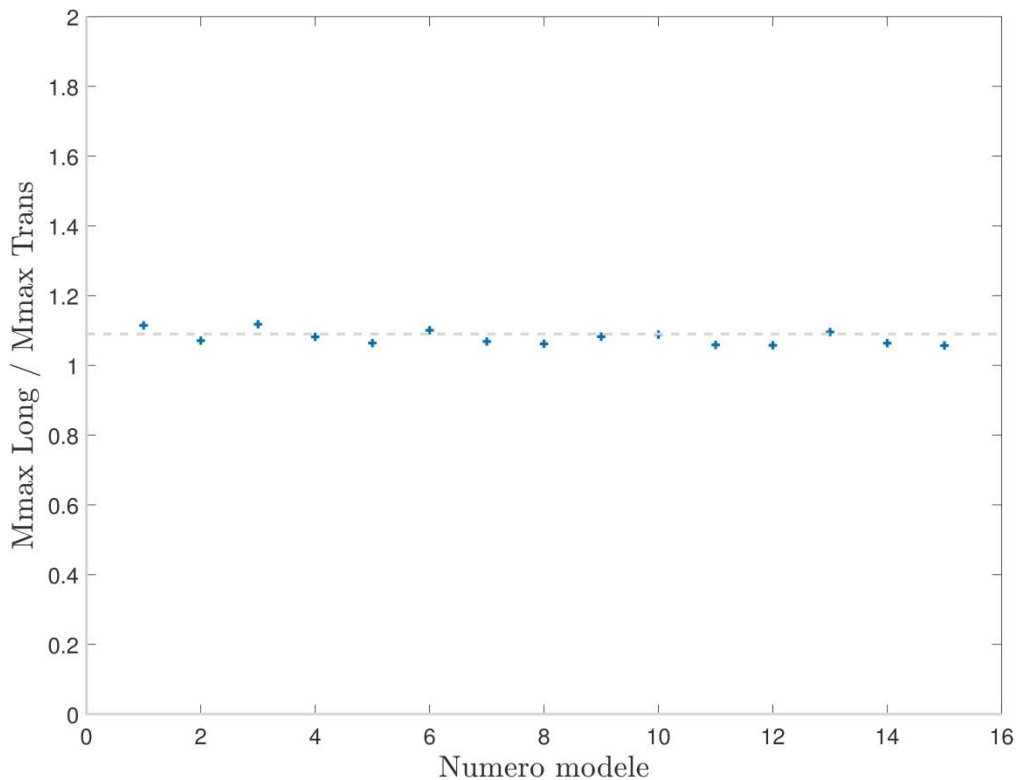


Figure 5.8: Ratios des moments maximaux résistants pour les deux types de dispositions

Il est possible de remarquer que le rapport des moments maximaux est toujours à peu près constant, et tourne autour d'une valeur de 1,1. Ainsi, malgré la diminution significative de l'aire effective dans le cas des modèles avec les extrusions installées longitudinalement lorsque le chargement de camion est utilisé, la résistance au moment longitudinal est plus élevée que lorsque les extrusions sont transversales aux poutres. Le ratio de résistance diffère toutefois du ratio de rigidité flexionnelle entre les deux dispositions, qui tourne plutôt autour de 1,5 (voir Annexe F). L'influence de l'aire effective a donc un impact important sur la rigidité de la poutre composite.

#### 5.2.4 Comparaison avec la norme S6

Enfin, une comparaison avec les valeurs de la norme lorsqu'un platelage en béton est utilisé a été réalisée. La comparaison se fait par rapport aux valeurs pour un platelage en béton, car pour l'instant la norme ne considère aucune action composite avec un platelage en

aluminium. De plus, il est intéressant de se comparer avec ces valeurs, car c'est le type de platelage le plus utilisé lorsqu'il y a action composite.

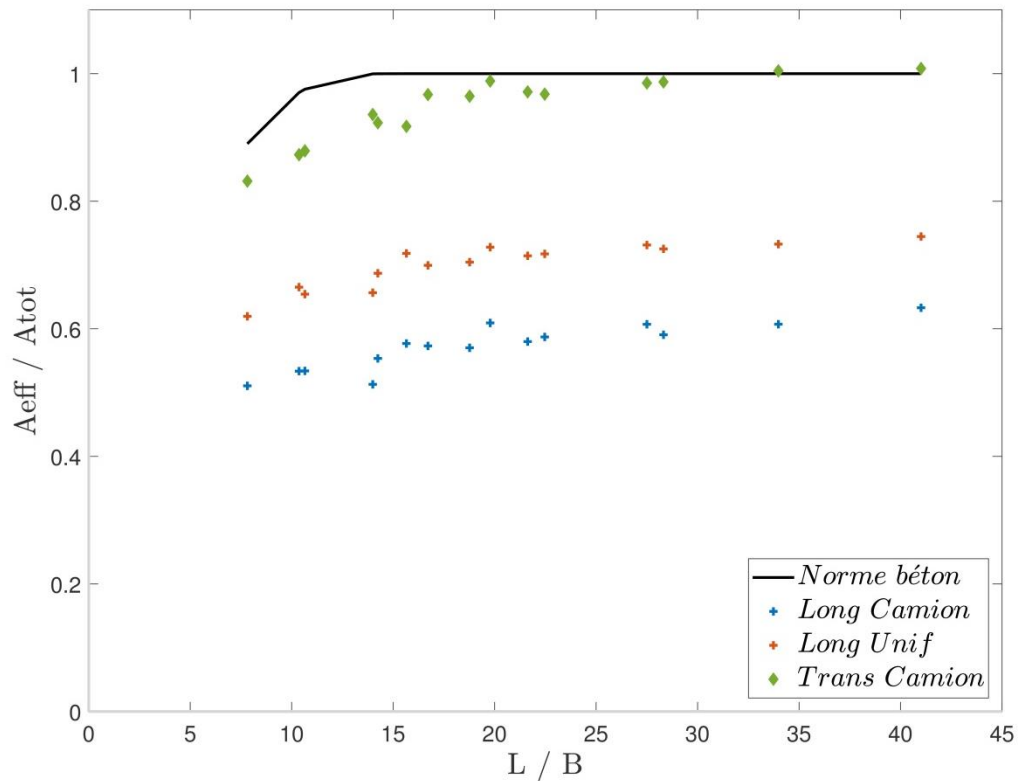


Figure 5.9 : Comparaison avec la norme des ratios d'aire effective sur l'aire totale

La même tendance peut être observée sur toutes les courbes, soit que le ratio d'aire effective sur l'aire totale augmente de manière plus accentuée, pour ensuite se stabiliser autour d'une valeur. Il est également possible de constater que les valeurs fournies par la norme lorsqu'un platelage en béton est utilisé sont toujours supérieures ou égales à celles obtenues avec les modèles.



# Chapitre 6 Conclusion

## 6.1 Principales conclusions

L'étude avait pour but d'approfondir les connaissances sur le comportement structural du platelage en aluminium, plus particulièrement en étudiant la répartition transversale des charges. La méthode des éléments finis a été utilisée. Plusieurs modèles avec différentes configurations de ponts ont été créés. Les paramètres étudiés étaient l'espacement des poutres ainsi que la portée. Pour chacune des configurations, les deux types de dispositions du platelage ont été modélisés. Ainsi, pour un espacement de poutre et une portée quelconque, un modèle était créé avec le sens des extrusions installées transversalement aux poutres, et un deuxième modèle était créé avec le sens des extrusions parallèle aux poutres. Pour chacun des modèles, une valeur de fraction de charge de camion a été calculée pour la poutre de centre et la poutre de rive. Un calcul d'aire effective a également été réalisé pour la poutre de centre. Puis, une comparaison entre les deux types de dispositions a été réalisée. Enfin, une comparaison avec la norme canadienne des ponts routiers CAN/CSA-S6-14 a également été faite.

Tout d'abord, pour ce qui est des résultats concernant les fractions de charge de camion, il a été trouvé que les valeurs obtenues avec les extrusions transversales aux poutres étaient toujours supérieures à celles obtenues avec les extrusions parallèles. La disposition transversale est donc plus efficace pour transférer les charges de camion aux poutres. Toutefois, la différence est relativement minime, de l'ordre de 5% à 10% pour la poutre de centre, et de 3% à 5% pour la poutre de rive. Puis, lors de la comparaison avec les valeurs données par la norme pour un platelage en aluminium, il a été démontré qu'effectivement la norme est trop restrictive. La surestimation des valeurs fournies par la norme allait de 25% pour les espacements plus usuels jusqu'à 40% pour les plus grands espacements. Une telle surestimation des fractions de charge de camion entraîne un dimensionnement plus important des poutres, et une augmentation des coûts. La norme désavantage donc l'option du platelage en aluminium en étant si sévère sur les valeurs des fractions de charge de camion. Enfin, une dernière comparaison a été réalisée avec les valeurs des fractions de charge de camion fournies par la norme dans le cas où un platelage en béton est utilisé. Les résultats sont plutôt positifs pour le platelage en aluminium. Ainsi, les valeurs obtenues

avec la norme pour le platelage en béton sont toujours supérieures à celle obtenues lorsque les extrusions transversales. Selon les résultats, le platelage avec la disposition transversale transfère les charges de camion de manière autant, voire peut-être plus efficacement que le platelage en béton. Cependant, la différence entre les deux est toutefois relativement faible, et la norme fournit toujours des valeurs plus sécuritaires que la réalité. Enfin, la comparaison est moins positive lorsque les extrusions sont parallèles aux poutres, car pour les espacements plus bas que 3 m, les fractions de charge de camion trouvées à l'aide des modèles étaient toutes supérieures à celles trouvées pour le platelage en béton.

Pour ce qui est des résultats sur l'aire effective, les valeurs pour les extrusions parallèles étaient toutes beaucoup plus basses que celles trouvées avec les extrusions transversales. Cette grande différence, de l'ordre de 40%, pourrait être entre autres le résultat de l'effet local des essieux. Des contraintes de traction dans le bas du platelage se développaient rapidement sous les essieux lorsque les extrusions étaient parallèles aux poutres. Un chargement uniformément réparti équivalent à la charge de camion a donc été appliqué. Cependant, les résultats obtenus avec ce chargement uniforme restent faibles, malgré le fait qu'ils soient effectivement supérieurs à ceux obtenus avec le chargement de camion et qu'aucune traction ne se développait dans le bas du platelage. Ce résultat est assez surprenant, et pourrait être dû au fait que l'équation utilisée pour le calcul de l'aire effective ne soit pas tout à fait adaptée pour un platelage ayant des ouvertures (voir section 5.2.2). Enfin, un moment résistant maximal a été calculé pour chacun des modèles en prenant en compte l'aire effective calculée. Il a été possible de conclure que malgré une aire effective toujours plus faible pour ce qui est des extrusions installées longitudinalement, le moment résistant maximal est toujours supérieur à celui calculé pour les extrusions posées transversalement aux poutres. Enfin, une comparaison avec les valeurs données par la norme pour un platelage en béton a été réalisée. Il a été constaté que les valeurs avec le platelage en béton étaient toujours supérieures ou égales à celles trouvées avec le platelage en aluminium, peu importe la disposition des extrusions.

## 6.2 Améliorations et travaux futurs

Certaines critiques ou améliorations peuvent être faites par rapport à la méthodologie utilisée. Ainsi, le choix d'avoir des espacements de poutres plus grand que 4 m, alors que la méthode simplifiée proposée par la norme était limitée à un espacement de 4 m peut être critiqué. Le but était de voir comment à l'extrême le platelage allait se comporter. Toutefois, il aurait pu y avoir plus d'espacements rapprochés autour des valeurs plus usuelles, et les espacements plus extrêmes auraient pu être inférieurs ou égales à 4 m. Il aurait été intéressant également d'utiliser des ratios de la portée sur l'espacement des poutres plus petits, comme ce qui avait été fait par Cheung et Chan (1978) (voir Annexe B). Ainsi, le début de la courbe du ratio d'aire effective sur l'aire totale par rapport au ratio de la portée sur l'espacement des poutres aurait pu être validé.

De plus, il a été constaté que les deux paramètres variant choisis pour l'étude n'avaient pas un grand effet sur les résultats obtenus pour la poutre de rive. Il aurait été pertinent de faire varier la longueur en porte-à-faux afin d'avoir un paramètre ayant un réel impact sur la poutre de rive.

Également, tel que discuté à la section 3.2.3, dû aux arrondis présent dans l'extrusion, le maillage produit n'était pas tout à fait homogène. Ainsi, les modèles créés pourraient être optimisés en travaillant d'avantage le maillage, en effectuant une analyse de convergence plus poussée et en faisant des tests supplémentaires concernant le type d'élément le plus efficient.

L'utilisation de la contrainte *Tie* d'ABAQUS avait été choisie afin de simplifier le modèle et de diminuer le temps de calcul. La surface *slave* d'ABAQUS est habituellement celle ayant le maillage le plus raffiné, soit ici le platelage, tandis que la surface *master* d'ABAQUS qui a été choisie est celle de la poutre, car elle doit être la plus « rigide » et la plus large. Toutefois, cela venait influencer la valeur des contraintes dans le bas du platelage, comme il a été constaté avec le plateau obtenu au-dessus de la poutre dans les profils de contraintes. De plus, ce type de connexion est beaucoup plus rigide que ce qui est retrouvé en réalité. Une amélioration possible aurait été de modéliser une connexion plus

réaliste, car il a été prouvé que le type de connexion avait une influence sur l'aire effective (Fahmy, 1985).

Enfin, les résultats concernant l'aire effective pour les extrusions installées longitudinalement aux poutres sont surprenant bas. Comme il a été expliquée à la section 5.2.2, il se pourrait que ce soit dû au fait que l'équation utilisée pour déterminer l'aire effective ne soit pas parfaitement adaptée pour un platelage ayant des ouvertures, comme c'est le cas pour un platelage en aluminium. Il faudrait donc pousser l'analyse afin de mieux comprendre l'effet des ouvertures dans la répartition transversale des efforts, et comparer avec des essais en laboratoire. De plus, la contrainte minimale ( $\sigma_{min}$  dans Équation 24) utilisée pour le calcul de l'aire effective est celle fournie par les analyses d'éléments finis. Toutefois, il a été constaté que la contrainte minimale devant être utilisée avec l'équation proposée par Chiewanichakorn et col. (2004) doit être calculé par itérations en suivant la théorie des poutres afin de pouvoir respecter les hypothèses de l'équation. Cette incidence pourrait peut-être expliquer les résultats surprenants des aires effectives.

Certains travaux futurs pourraient être effectués afin d'approfondir et compléter l'étude réalisée. Ainsi, il serait intéressant de :

- Effectuer une analyse avec un chargement réparti pour le platelage avec les extrusions posées transversalement aux poutres ;
- Faire le calcul pour la détermination de l'aire effective pour la poutre de rive. Ce calcul serait plus complexe, à cause du chargement non symétrique de la poutre de rive ;
- Déterminer une équation pour le calcul de la largeur effective. Pour l'instant, tous les calculs sont faits en termes d'aire effective, à cause de la géométrie particulière de l'extrusion du platelage. Il faudrait également que l'équation soit adaptée pour un platelage ayant des ouvertures afin de respecter la distribution linéaire des contraintes le long de l'épaisseur pour pouvoir utiliser la théorie des poutres ;
- Faire des expériences en laboratoire afin de pouvoir comparer les résultats des analyses des éléments finis et valider les modèles d'éléments finis.

## Bibliographie

- ABAQUS 6.12. (2017). *Shell elements: overview and Characterizing elements*  
*ABAQUS (Ed.) Analysis User's Manual* Tiré de  
<http://abaqus.software.polimi.it/v6.12/books/usb/default.htm>
- Ahn, I.S, Chiewanichakorn, M., Chen, S.S., & Aref, A.J. (2004). Effective width provisions for composite steel bridges. *Journal Engineering Structure*, Vol. 26, pp.1843-1852.
- AlumaBridge. (2017). AlumaBridge Advanced Aluminum Bridge Deck Design – Unmatched advantages over Concrete Decking and Steel Decking. Tiré de  
[http://www.alumabridge.com/products\\_alumabridge.htm](http://www.alumabridge.com/products_alumabridge.htm)
- Ampleman, M. (2016). Quelle est la différence entre la métallisation et la galvanisation à chaud? Tiré de <https://www.canambridges.com/fr/quelle-est-la-difference-entre-la-metallisation-et-la-galvanisation-a-chaud/>
- Ampleman, M. (2016). [Consultation personnelle].
- Arrien, P. (1995). *Remplacement d'un tablier de pont par un tablier en aluminium*. (Mémoire), Université Laval, Québec, Canada.
- B. Vincent, R., & Laoubi, K. (2012). *Un nouveau tablier de pont orthotrope conçu pour ponts à poutres longitudinales multiples*. Québec, Canada: Groupe Canam.
- Beaulieu, D. (2003). *Calcul des charpentes d'aluminium*. Chicoutimi, Québec.
- Beaulieu, D., Picard, A., Tremblay, R., Grondin, G., & Massicotte, M. (2005). *Calcul des charpentes d'acier*. Canada: Institut canadien de la construction en acier.
- Beaulieu, D. (2013). *Les caractéristiques de l'aluminium structural* (2e ed.). Montréal, Québec.
- Beaulieu, D., Internoscia, J., & Hartlieb, M. (2015). *Ponts et passerelles en aluminium, Rapport de visites et de rencontres en Suède, en Hollande et aux États-Unis*. Rapport présenté pour AluQuébec.
- Brookline Connection. (2015). Smithfield Street Bridge. Tiré de  
<http://www.brooklineconnection.com/history/Facts/Smithfield.html>



- Burgelin, J.-B. (2017). *Nouveau concept de tablier de pont tout aluminium à portée simple et assemblage en chantier*. (Maîtrise Mémoire), Université Laval, Québec, Canada.
- Caron, A. (2016). [Consultation personnelle].
- Cecobois. (2017). Tablier en bois (platelage en madriers). Tiré de <https://www.cecobois.com/tablier-en-bois-platelage-en-madriers>
- Cheung, M.S., & Chan, M.Y.T. (1978). Finite strip evaluation flange width of bridge girders. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 5, pp.174-186.
- Chiewanichakorn, M., Aref, A., Chen, S., & Ahn, I. (2004). Effective flange width definition for steel-concrete composite bridge girder. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 12, pp.2016-2032.
- Craig, R. R. Jr. (2000). *Mechanics of materials*. États-Unis: John Wiley & Sons.
- CSA. (2014a). Code canadien sur le calcul des ponts routiers (Vol. CAN-CSA S6-14). Canada.
- CSA. (2014b). Commentary on CSA S6-14, Canadian Highway Bridge Design Code (Vol. CAN-CSA-S6-14). Canada.
- Fahmy, E.H., & Robinson, H. (1985). Effective Slab Widths for Simple Composite Beams with Ribbed Metal Deck. *Modeling, Simulation & Control*, Vol.3, pp.19-36.
- Fortin, D. (2017). [Consultation personnelle].
- IndexMundi. (2013). Aluminum, Primary Production by Country. Tiré de <http://www.indexmundi.com/minerals/?product=aluminum>
- Leclerc, J. (2018). Utilisation innovatrice de l'aluminium dans les ponts : effets de la variation de la température sur le comportement structural d'un tablier d'aluminium sur les poutres d'acier, à l'action composite. (Maîtrise Mémoire), Université Laval, Québec, Canada.
- Lévesque, É. (2014). Le tablier orthotrope en acier, une solution de développement durable. Tiré de <https://www.canambridges.com/fr/le-tablier-orthotrope-en-acier-une-solution-de-developpement-durable/>

- MCC, "Ministère de la Culture et des Communications". (2013). *Pont d'aluminium d'Arvida*. Québec, Canada: Gouvernement du Québec Tiré de [http://www.patrimoine-culturel.gouv.qc.ca/rpcq/detail.do?methode=consulter&id=93514&type=bien#.WQYpMBM1\\_RY](http://www.patrimoine-culturel.gouv.qc.ca/rpcq/detail.do?methode=consulter&id=93514&type=bien#.WQYpMBM1_RY).
- MESI, "Ministère de l'Économie, Science et Innovation". (2015). *L'avenir prend forme, Stratégie de développement de l'aluminium 2015-2025*. Québec, Canada: Gouvernement du Québec.
- MESI, "Ministère de l'Économie, Science et Innovation". (2017). *Secteur de l'aluminium : Présentation de l'industrie*. Québec, Canada: Gouvernement du Québec.
- Martin, Y. (2015). *Développement d'assemblages de dispositif de retenue pour les ponts à tabliers orthotropes en acier*. (Maîtrise Mémoire), Université Laval, Québec, Canada.
- Morin, C. (2006). *Le décalage en cisaillement dans les assemblages*. (Maîtrise Mémoire), Université Laval, Québec, Canada.
- MTMDET, "Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports". (2015). *Bilan de l'état des structures du réseau routier supérieur québécois*. Québec, Canada: Gouvernement du Québec.
- MTMDET, "Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports". (2016a). *Liste des prix suggérés 2016 - Consultation et réparation*. Québec, Canada: Gouvernement du Québec.
- MTMDET, "Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports". (2016). *Manuel de conception des structures*. Québec, Canada: Gouvernement du Québec.
- Osberg, G., & Vachon, M. (2014). *Aluminium bridge decking advancements and applications*. Article présenté à la 9th International Conference on short and Medium Span Bridges, Calgary, Alberta, Canada.
- Pasic, A. (2015). *Distribution transversale des charges de camion : Méthode des poutres transversales indépendantes*. Université Laval, Québec, Canada.
- Patton, G. (2015). *5-inch Aluminium Orthotropic Deck Research and Development*.

Aluminium Bridge deck Meeting. Florida Department of Transportation. AlumaBridge.

Petitclerc, S. (2018). *Calcul de la résistance aux états limites en flexion de pont composite aluminium/acier*. (Affiche, conférence) Journée des étudiants – REGAL, Québec, Canada.

Potvin, S. (2006). *Répertoire du patrimoine culturel du Québec*. Québec, Canada: Gouvernement du Québec Tiré de <http://www.patrimoineculturel.gouv.qc.ca/rpcq/detail.do?methode=consulter&id=93514&type=bien#.WH5GJtiQyUk>.

RS Clare & Co. (2017). BIMAGRIP- Antiskid surfacing, Application. Tiré de <http://www.rsclare.com/bimagrip--antiskid-surfacing/320.html>

Salama, T., & Nassif, H. H. (2010). Effective Flange Width for Composite Steel Beams. *Journal of Engineering Research*, Vol.18, pp.28-43.

Svensson, L., & Peterson, L. (1990). *Aluminum extrusions Bridge Rehabilitation System. Bridge Management : Inspection, Maintenance, Assesment, and Repaid*. Article présenté à la International Conférence on Bridge Management, London.

Timoshenko, S., & Goodier, J. N. (1970). *Theory of Elasticity*. New-York, É-U.: McGraw-Hill Co., .

Tindall, P. (2008). *Aluminium in bridges*. Londres, Royaume-Uni.

Viami International Inc., & The Technology Strategies Group. (2013). *Market Study for Aluminium Use in Roadway Bridges*. Association de l'Aluminium du Canada

Wang, C., & Eckel, C.L. (1957). *Elementary Theory of Structures*. New-York, États-Unis: McGraw-Hill Co. .

Yam, L.C.P., & Chapman, J.C. (1968). The Inelastic Behavior of Simply Supported Composite Beams of Steel and Concrete., *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Vol 41, pp.651-683.

Annexe A Photographie du pont d'Arvida entièrement fait d'aluminium



*Figure A.1: Photographie du pont d'Arvida entièrement fait en aluminium, construit en 1950, réalisée par Potvin (2006)*

Annexe B Graphique présentant les résultats de largeur effective de l'étude de Cheung et Chan (1978)



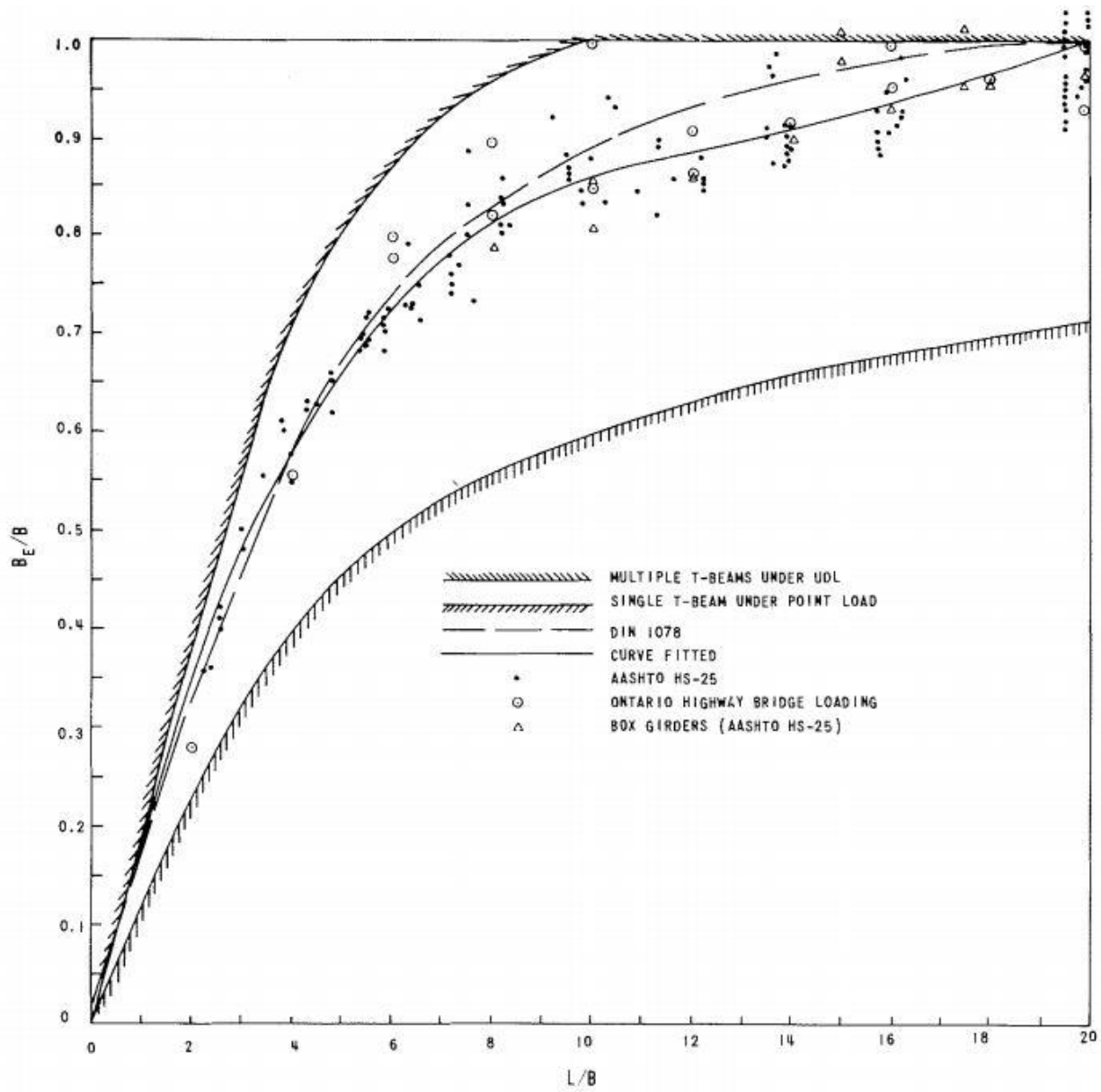


Figure B.1: Résultats des ratios de largeur effective sur la largeur tributaire selon le ratio de la portée sur l'espacement des poutres de l'étude faite par Cheung et Chan (1978)



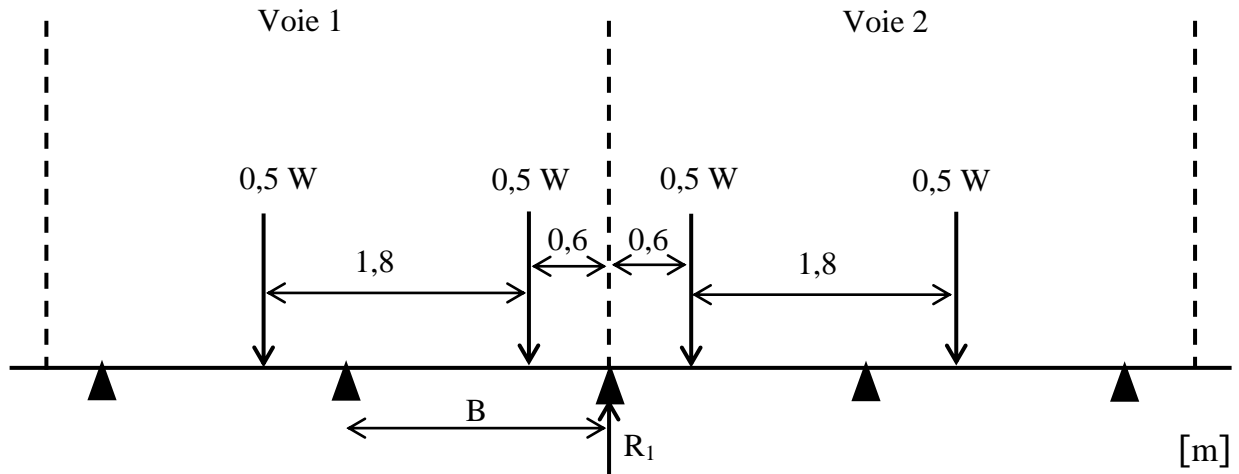


## Annexe C Détermination du positionnement transversale du camion



## Poutre de centre

### Cas 2 voies :



Pour  $B = 1,755 \text{ m}$

Cas Voie 1 chargée :

$$R_1 = 0,5W * ((1,755 - 0,6)/1,755)$$

$$R_1 = 0,328 W$$

Cas Voie 1 et 2 chargées :

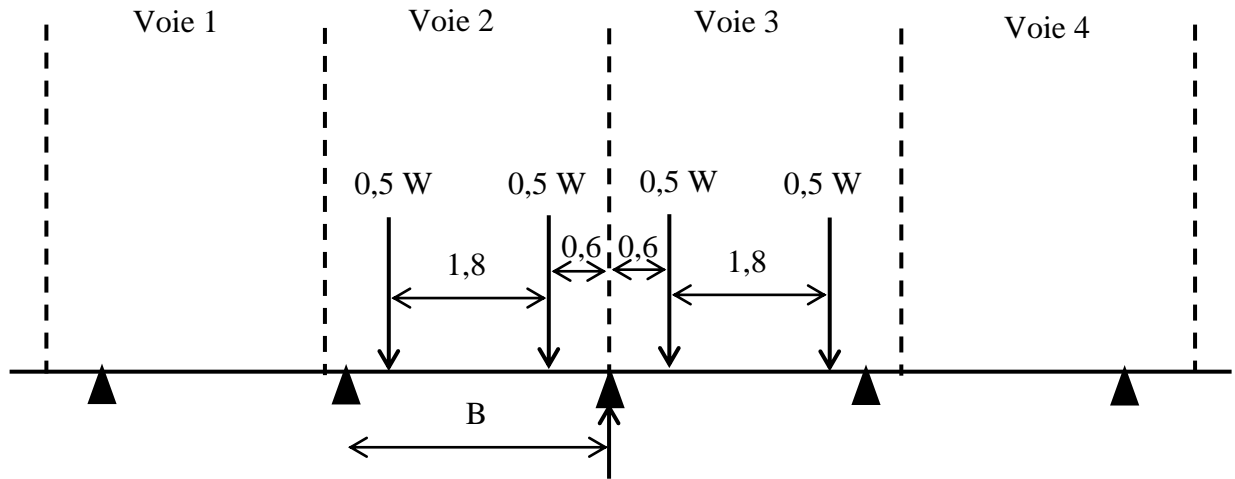
$$R_1 = 0,9 * (2 * 0,329W)$$

$$R_1 = 0,592 W$$

### Cas critique : Voie 1 et 2 chargées

Par logique, il est possible de dire que le chargement le plus critique sera toujours lorsque les deux voies seront chargées, car le chargement est symétrique. Ainsi, pour toutes les autres largeurs de tabliers avec deux voies carrossables, les deux voies sont chargées.

#### Cas 4 voies :



Pour  $B = 3,159 \text{ m}$

Cas Voie 2 chargée :

$$R_1 = 0,5W * ((3,159 - 0,6 - 1,8)/3,159) + 0,5W * ((3,159 - 0,6)/3,159)$$

$$R_1 = 0,525 W$$

Cas Voie 2 et 3 chargées :

$$R_1 = 0,9 * (2 * 0,525W)$$

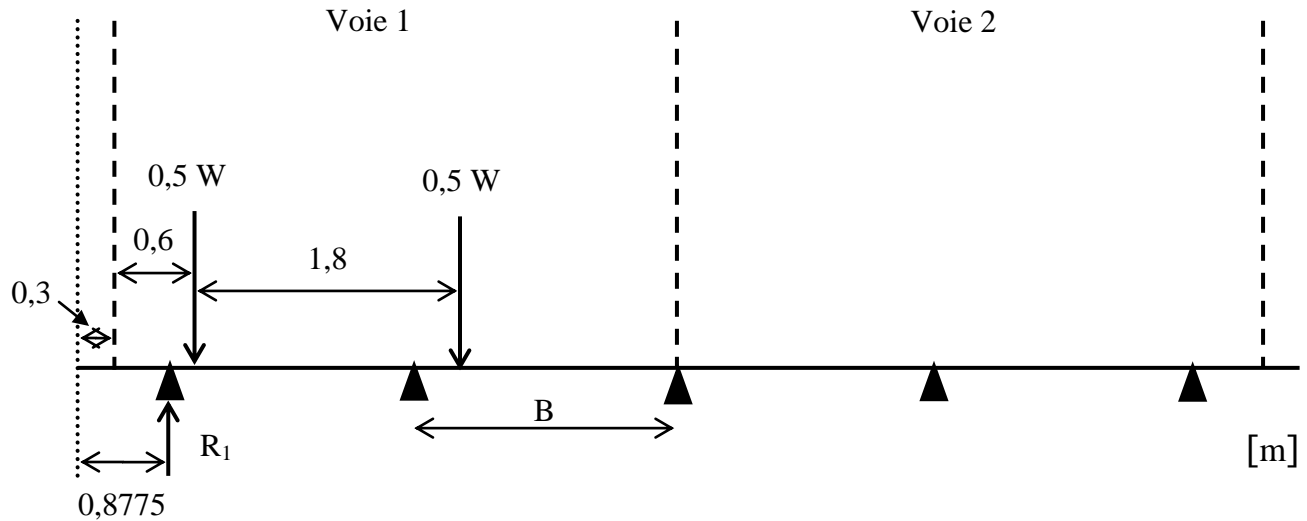
$$R_1 = 0,945 W$$

#### Cas critique : Voie 2 et 3 chargées

Par logique, il est possible de dire que le chargement le plus critique sera toujours lorsque les deux voies seront chargées, car le chargement est symétrique. Ainsi, pour toutes les autres largeurs de tabliers ayant 4 voies carrossables, les deux voies du milieu sont chargées.

## Poutre de rive

### Cas 2 voies :



Pour  $B = 1,755$  m

Cas Voie 1 chargée :

$$R_1 = 0,5W * (1,755 - (0,6 - (0,8775 - 0,3)))/1,755)$$

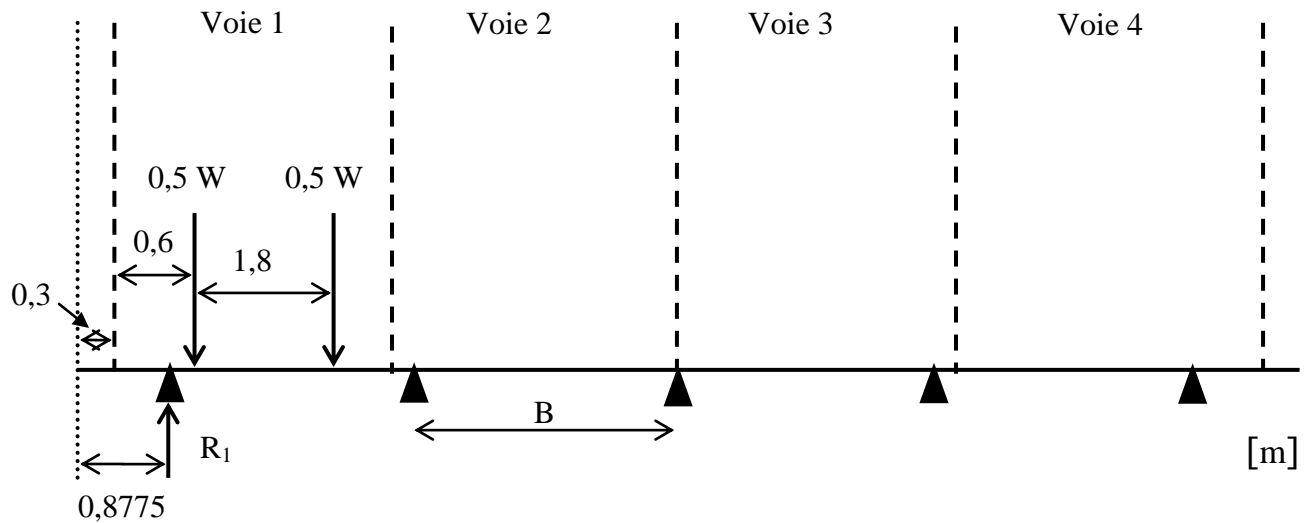
$$R_1 = 0,493 W$$

**Cas critique (seul cas possible) : Voie 1 chargée**

Par logique, il est possible de dire que le chargement le plus critique sera toujours lorsque la voie de l'extrémité sera chargée lorsqu'il y aura deux voies. Ainsi, pour toutes les autres largeurs de tabliers ayant 2 voies carrossables, seule la voie de l'extrémité est chargée.

## Poutre de rive

### Cas 2 voies :



### Pour $B = 3,159$ m

#### Cas Voie 1 chargée :

$$R_1 = 0,5W * (3,159 - (0,6 - (0,8775 - 0,3)) / 3,159) + 0,5W \\ * (3,159 - (1,8 - (0,6 - (0,8775 - 0,3))) / 3,159)$$

$$R_1 = 0,496 W + 0,212W = 0,708W$$

#### Cas critique (seul cas possible) : Voie 1 chargée

Par logique, il est possible de dire que le chargement le plus critique sera toujours lorsque la voie de l'extrémité sera chargée lorsqu'il y aura quatre voies. Ainsi, pour toutes les autres largeurs de tabliers ayant 4 voies carrossables, seule la voie de l'extrémité est chargée.

## Annexe D Essais avec différents types d'éléments



Des essais ont été effectués afin de déterminer le type d'élément utilisé. Les répartitions de contraintes obtenues avec les différents types d'éléments sont comparées afin de voir l'influence du type d'élément sur les principaux résultats utilisés pour cette étude. Les dimensions utilisées pour les essais sont les mêmes que pour le modèle 1, soit la portée de 15 m et l'espacement des poutres de 1,775m. La grosseur des éléments est celle déterminée à l'aide de l'analyse de convergence utilisée, soit 25 mm par 25 mm environ.

Le tableau suivant donne les temps de calcul respectifs pour les essais réalisés avec les différents types d'éléments.

*Tableau D.1 : Temps de calcul des essais réalisés avec les différents types d'éléments*

<b>Type d'élément</b>	<b>Temps de calcul</b>
--	<b>heure</b>
Éléments solides, linéaires	2,57
Éléments coques linéaire SANS intégration réduite	0,71
Éléments coques linéaire AVEC intégration réduite	0,36

La figure suivante montre les répartitions de contraintes obtenues lors des essais effectués. Les graphiques de la première ligne représentent les contraintes obtenues avec les éléments solides, la deuxième ligne, celles obtenues avec les éléments coques sans intégration réduite et la dernière ligne, celles obtenues avec les éléments coques avec intégration réduite.

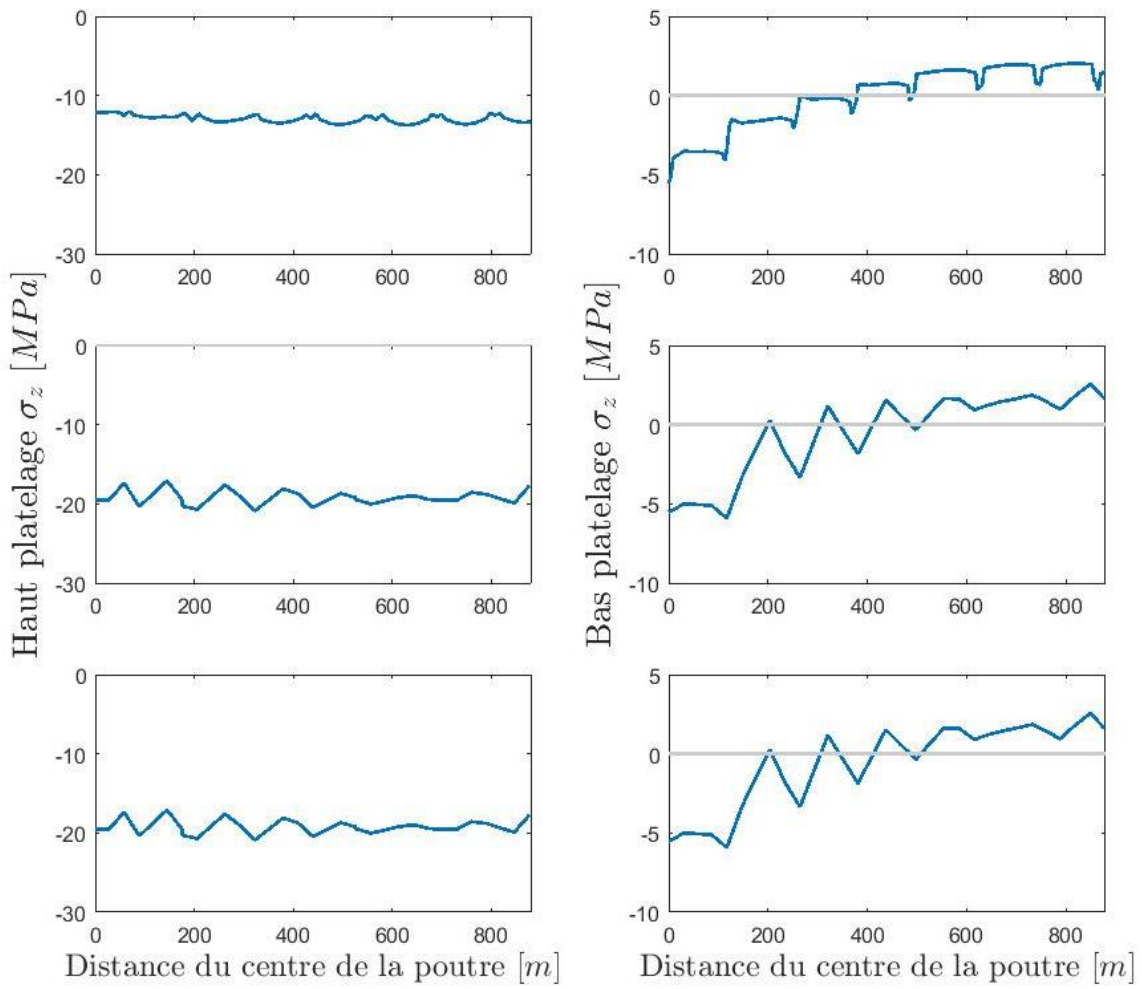
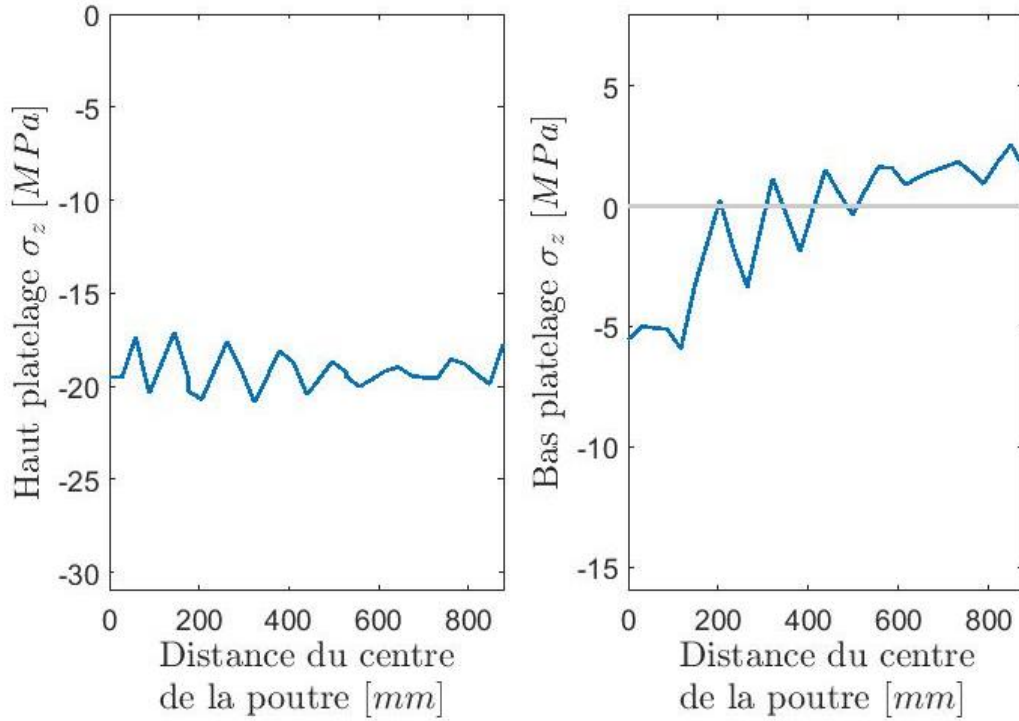


Figure D.1: Comparaison des répartition de contraintes obtenues avec les différents types d'éléments utilisés

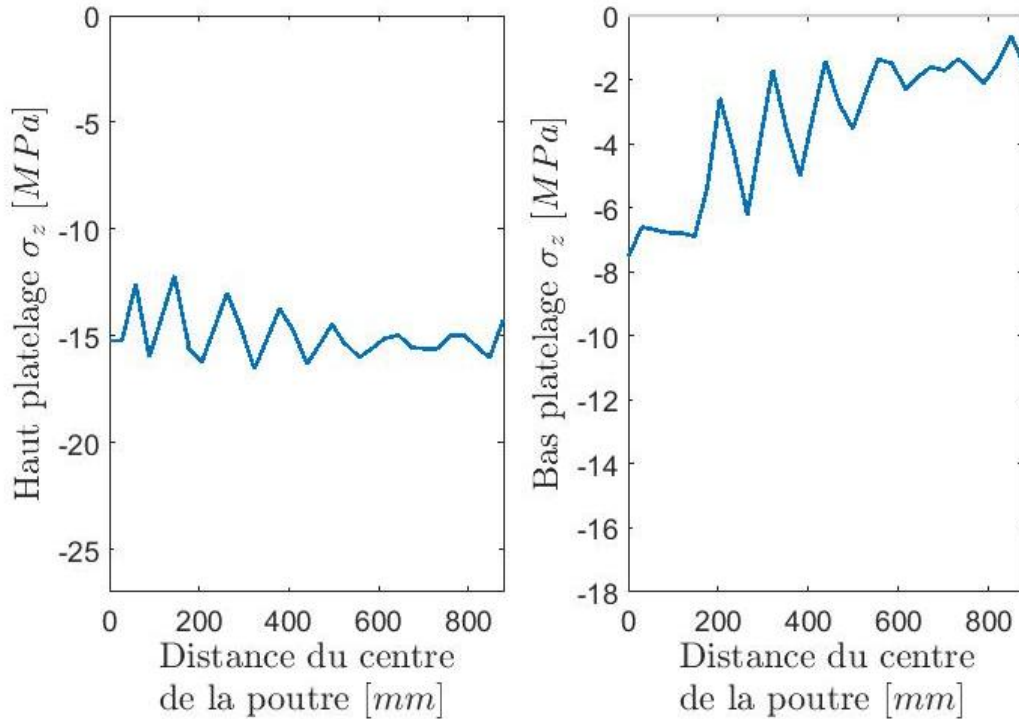


## Annexe E Graphiques des répartitions de contraintes

**Disposition des extrusions : Longitudinale**  
**Chargement : Camion**



*Figure E.1 : Répartition des contraintes pour le modèle 1 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement de camion*



*Figure E.2 : Répartition des contraintes pour le modèle 2 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement de camion*

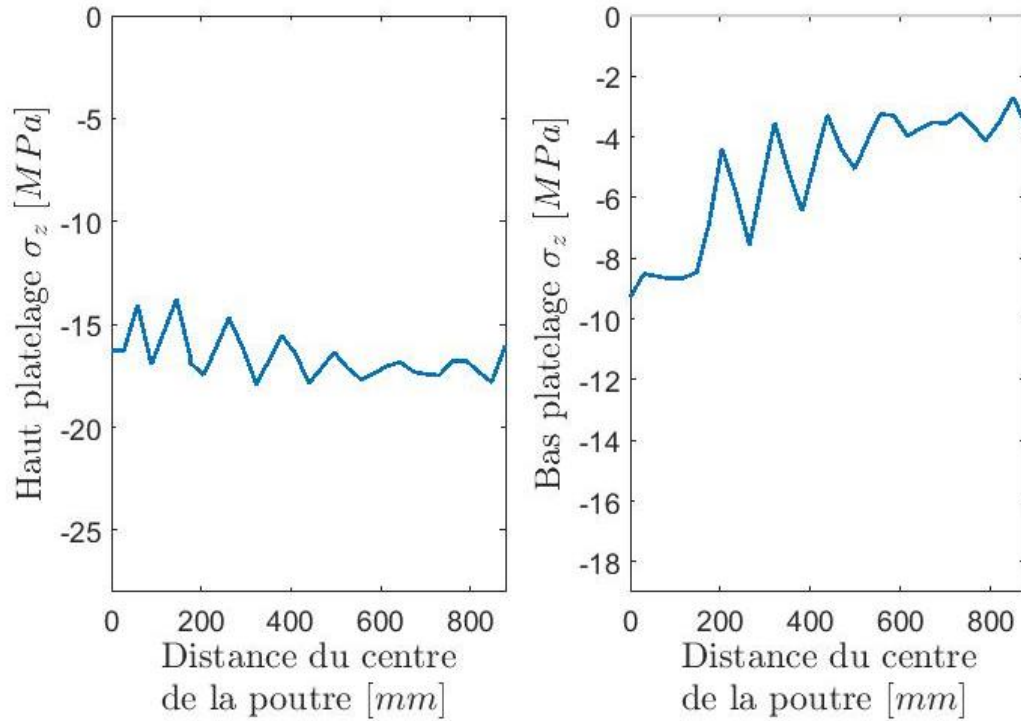


Figure E.3 : Répartition des contraintes pour le modèle 3 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement de camion

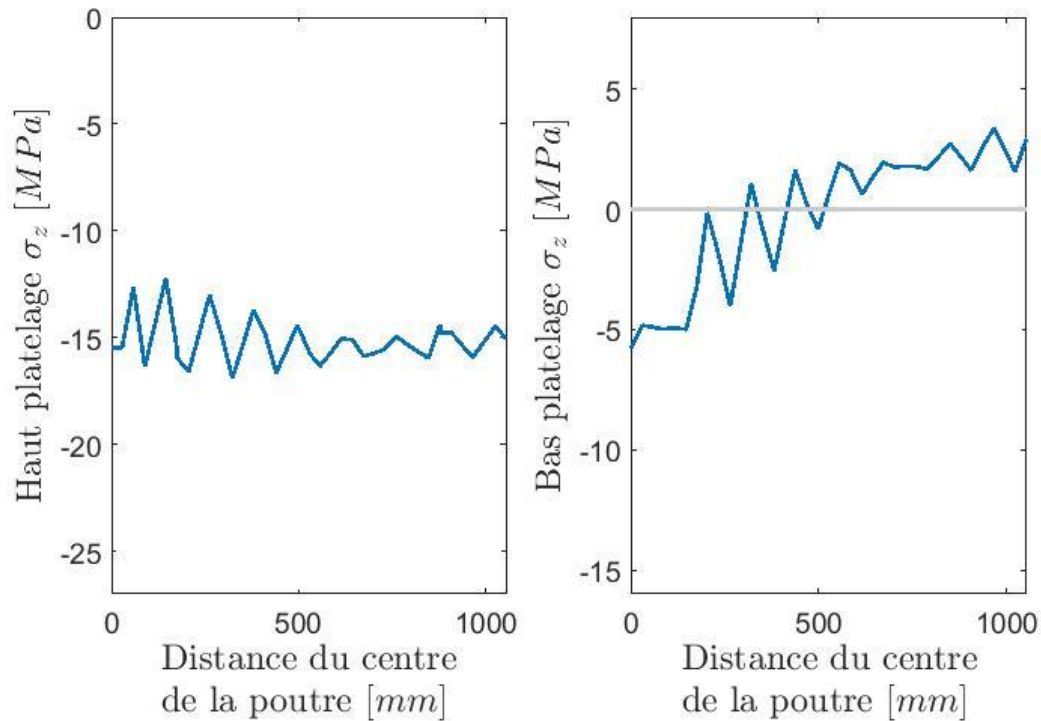


Figure E.4 : Répartition des contraintes pour le modèle 4 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement de camion

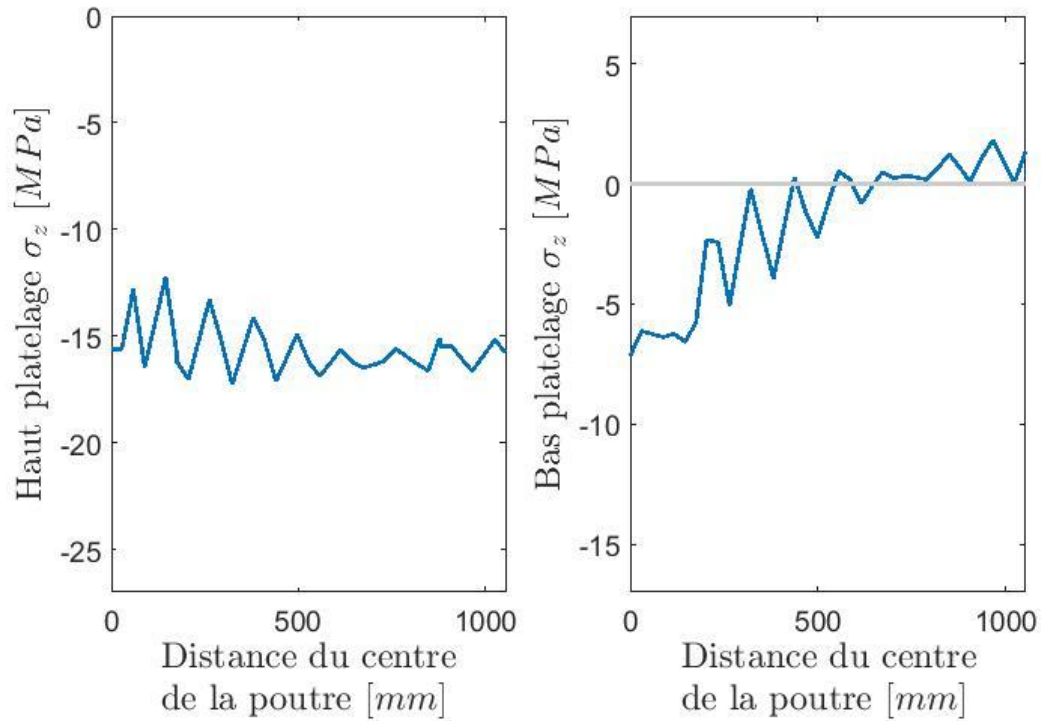


Figure E.5 : Répartition des contraintes pour le modèle 5 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement de camion

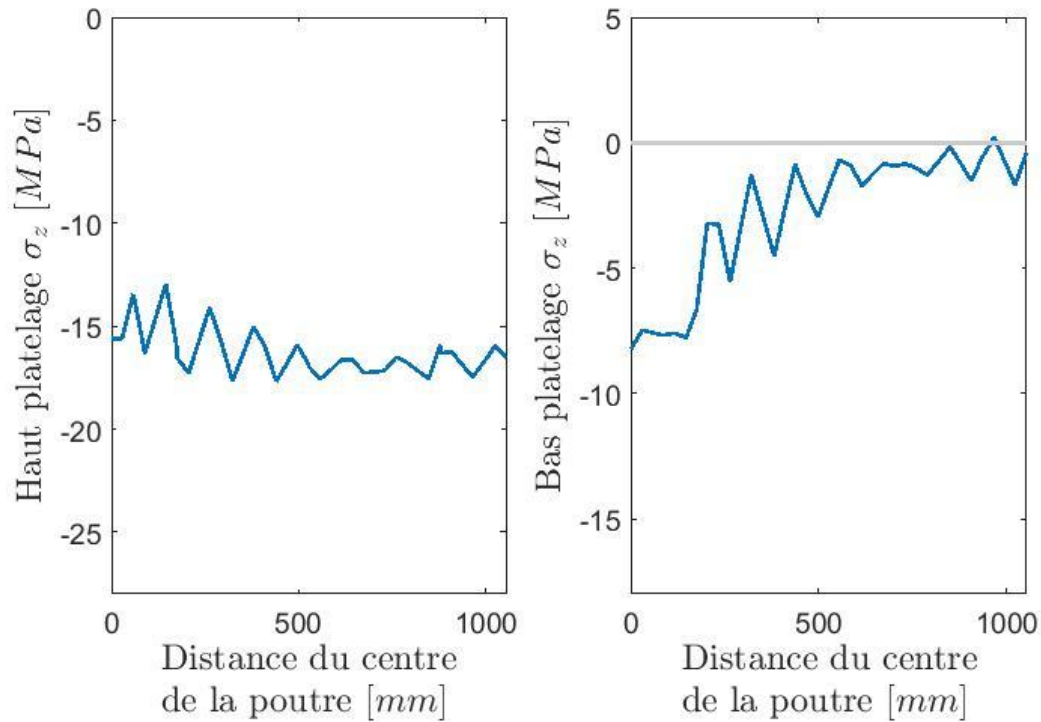


Figure E.6 : Répartition des contraintes pour le modèle 6 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement de camion

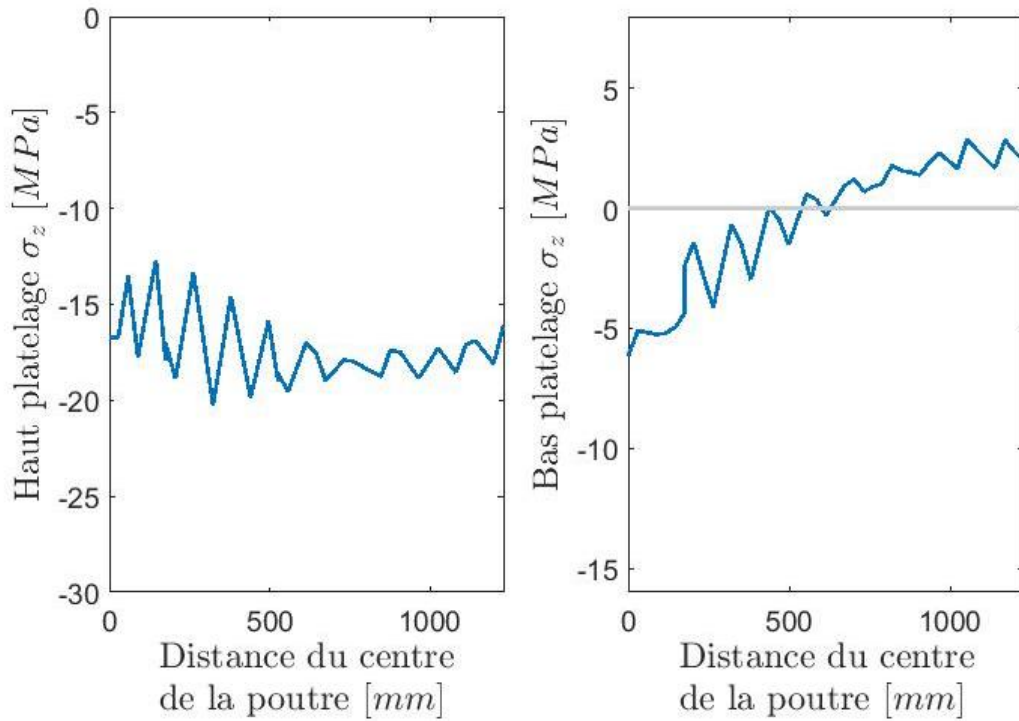


Figure E.7 : Répartition des contraintes pour le modèle 7 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement de camion

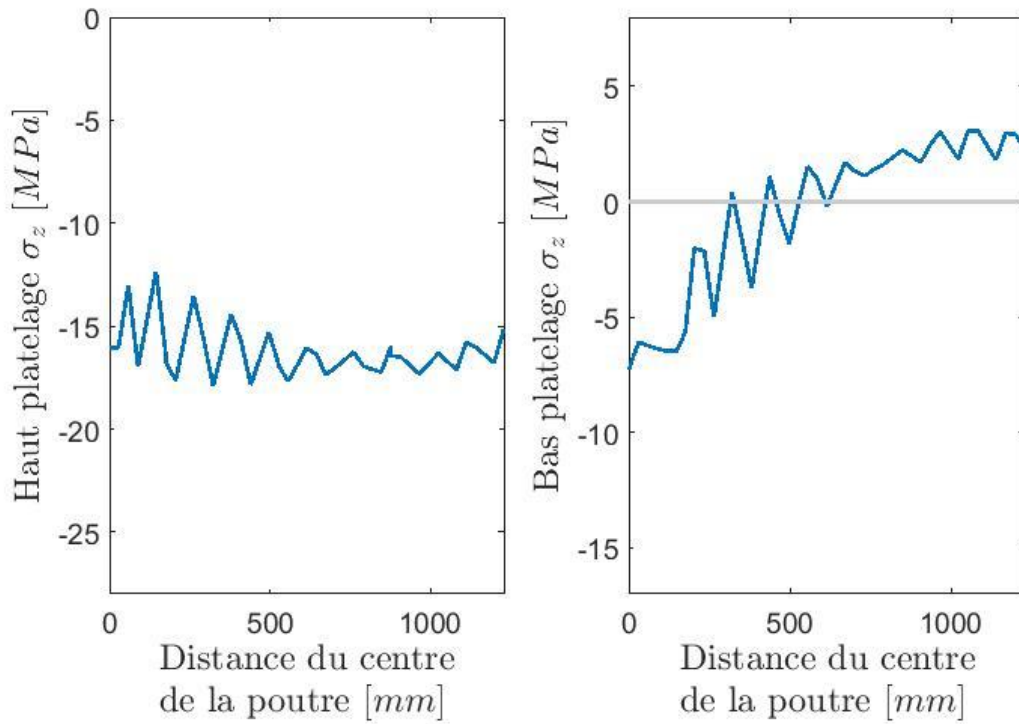


Figure E.8 : Répartition des contraintes pour le modèle 8 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement de camion



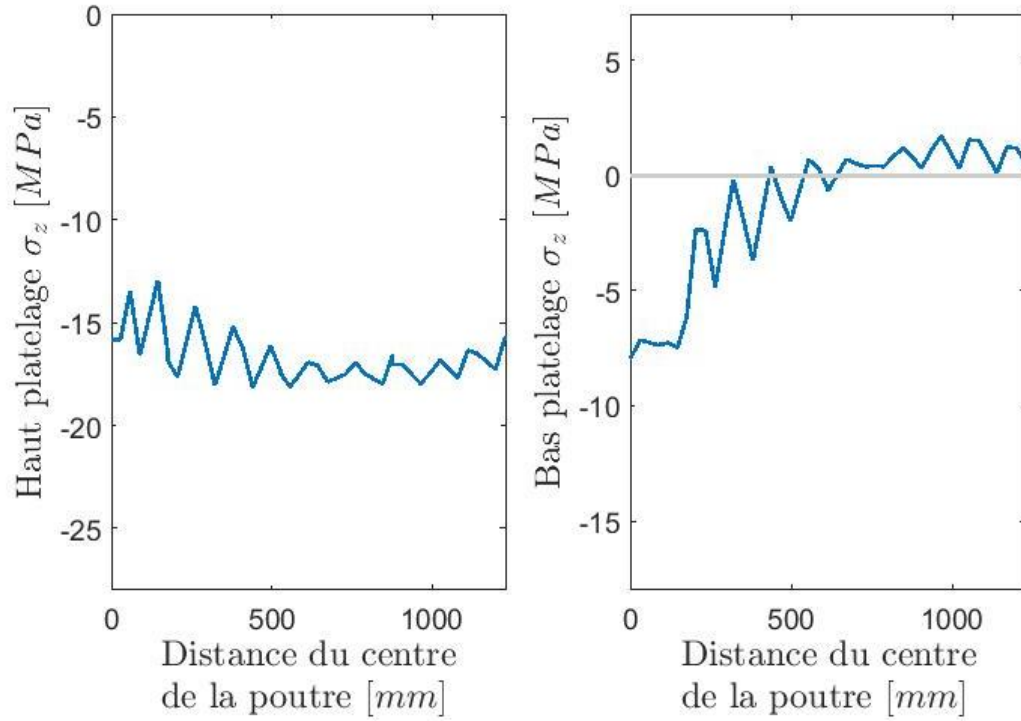


Figure E.9 : Répartition des contraintes pour le modèle 9 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement de camion

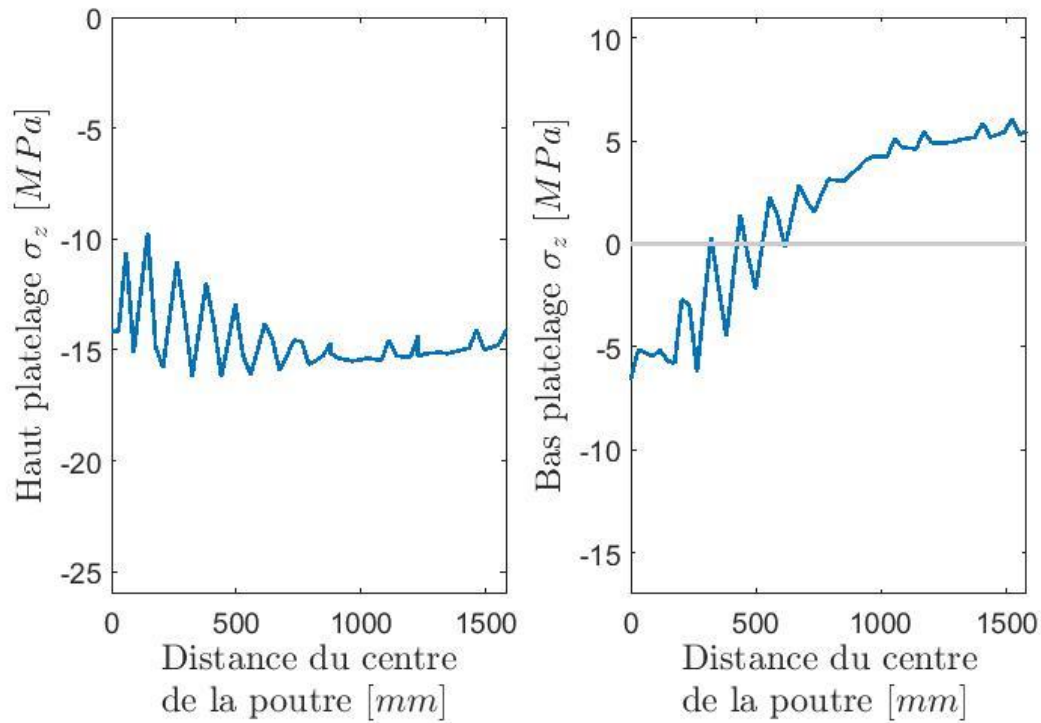


Figure E.10 : Répartition des contraintes pour le modèle 10 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement de camion

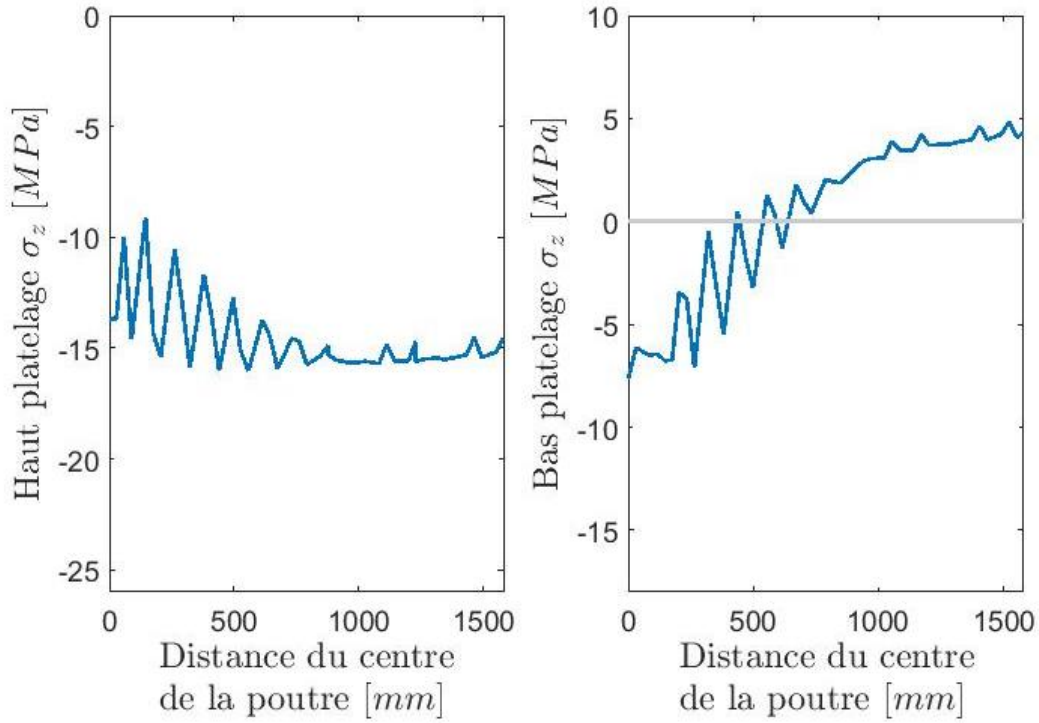


Figure E.11 : Répartition des contraintes pour le modèle 11 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement de camion

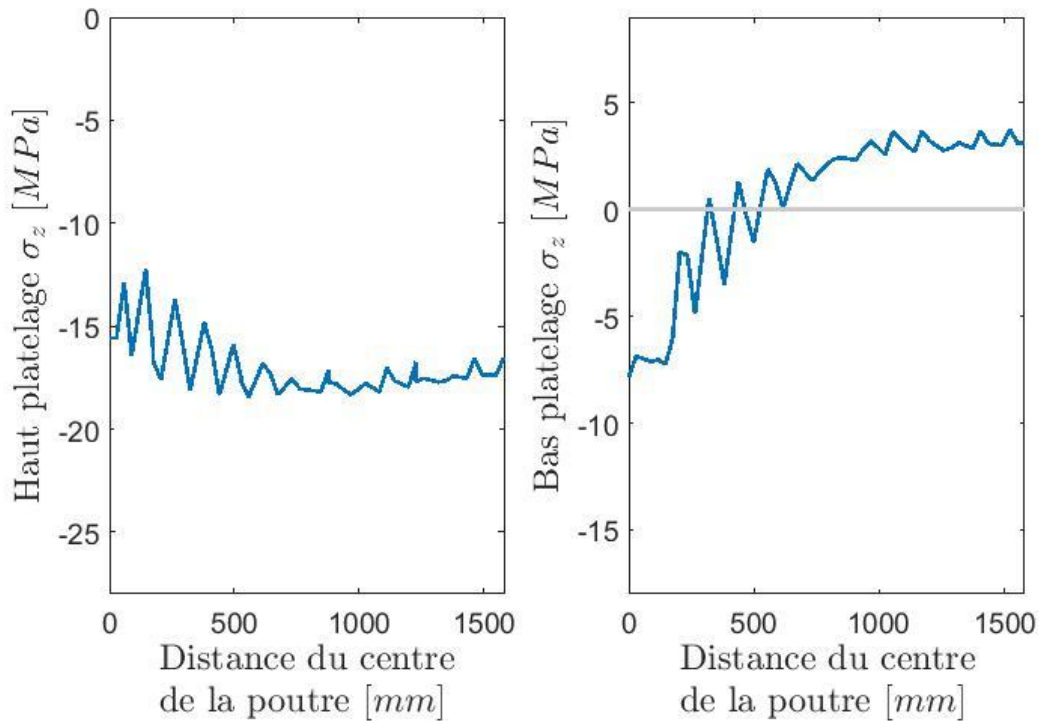


Figure E.12 : Répartition des contraintes pour le modèle 12 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement de camion

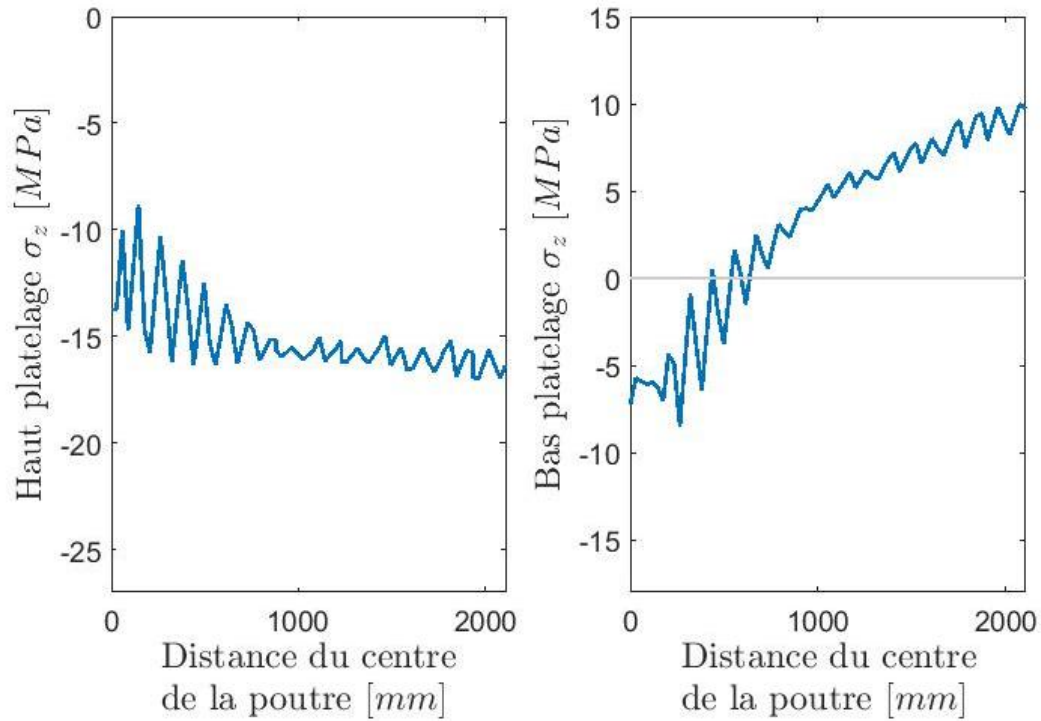


Figure E.13 : Répartition des contraintes pour le modèle 13 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement de camion

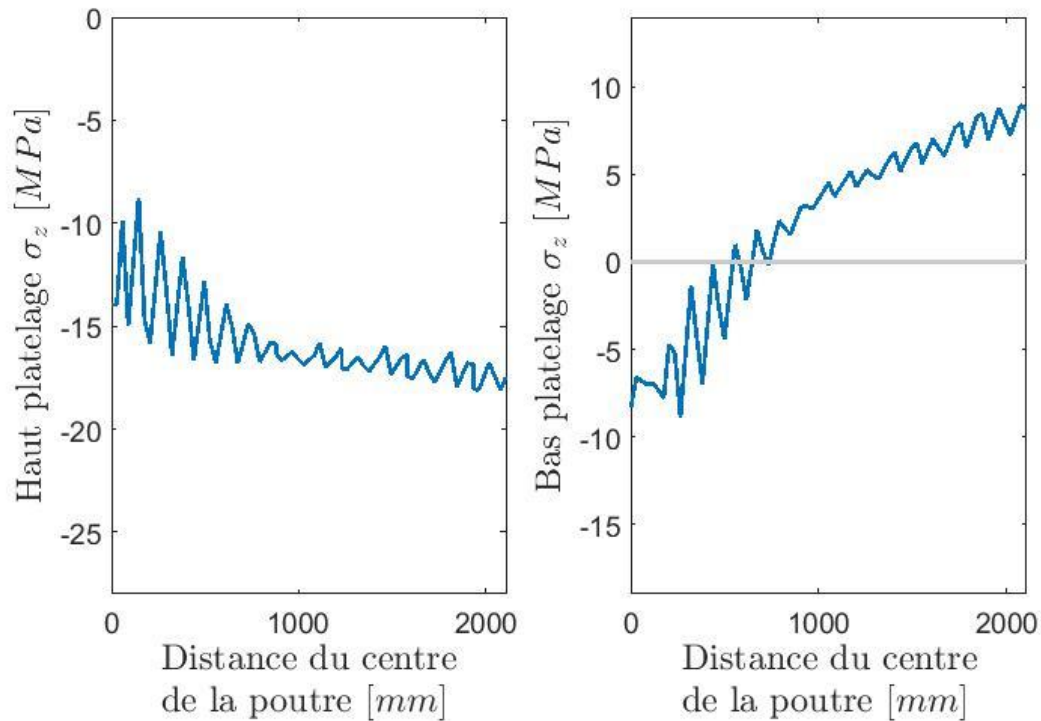


Figure E.14 : Répartition des contraintes pour le modèle 14 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement de camion

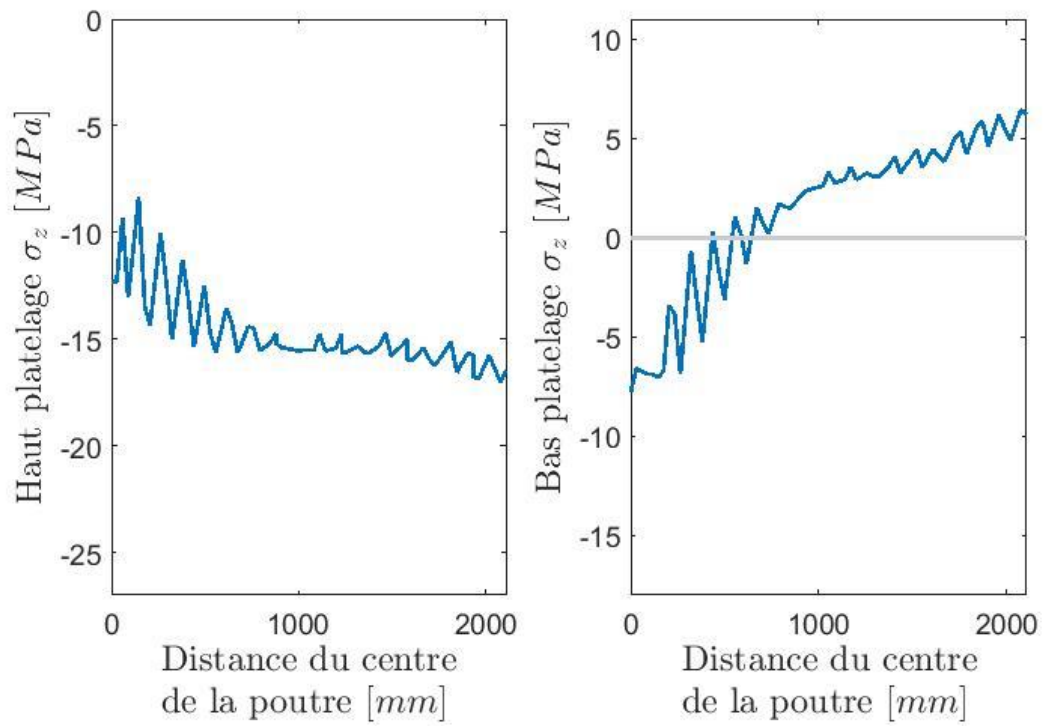


Figure E.15 : Répartition des contraintes pour le modèle 15 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement de camion

**Disposition des extrusions : Longitudinale**  
**Chargement : Chargement uniforme**

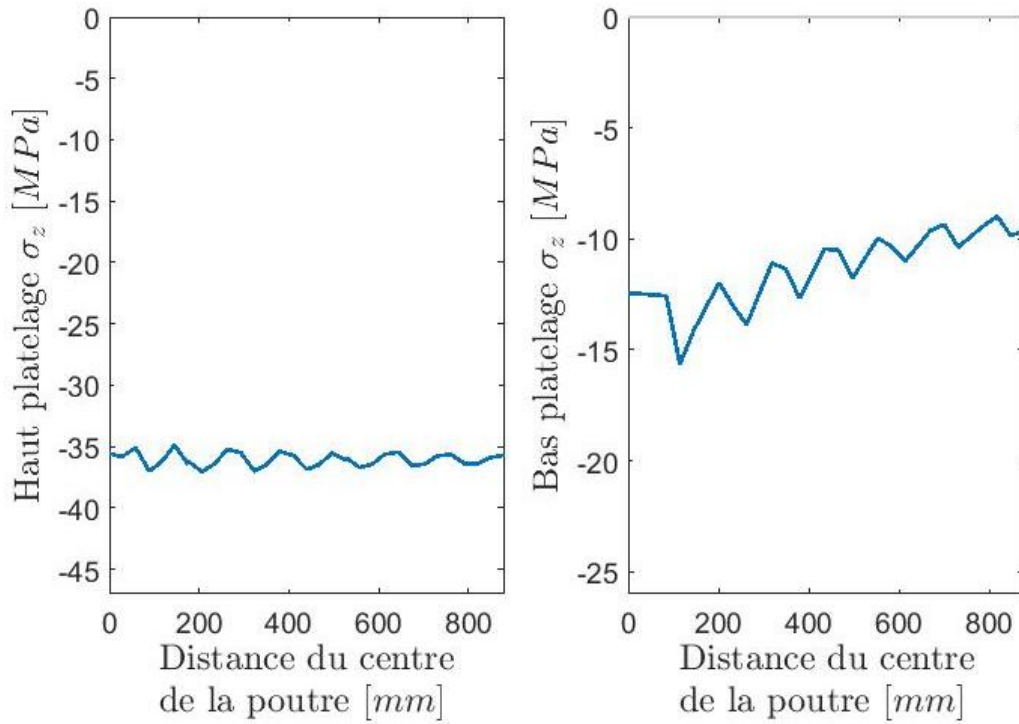


Figure E.16 : Répartition des contraintes pour le modèle 1 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement uniforme

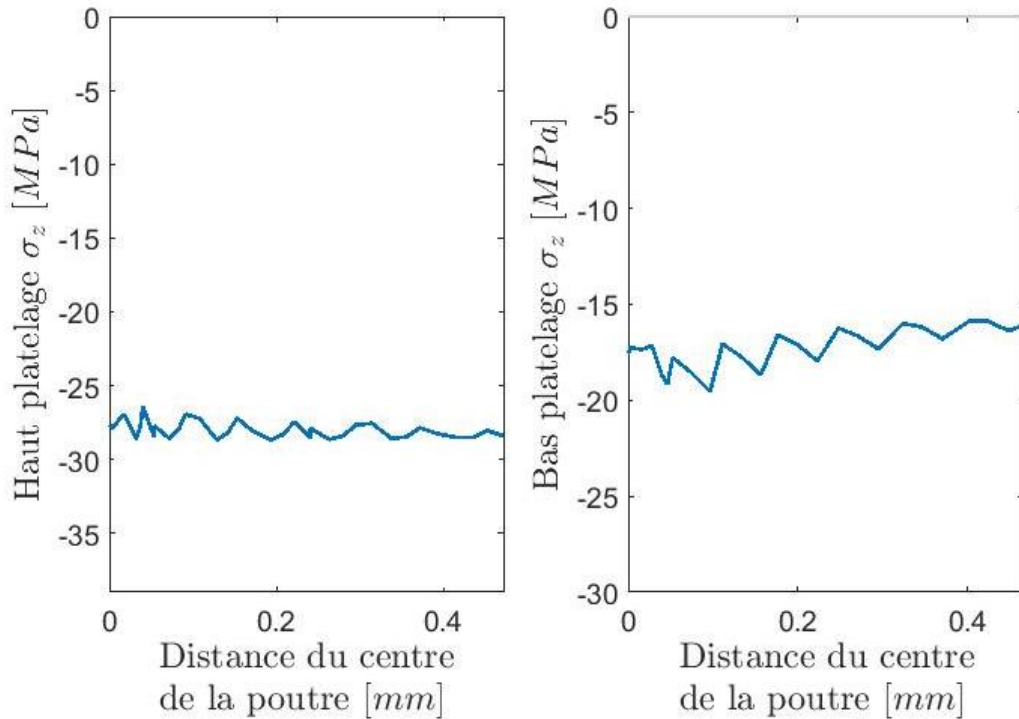


Figure E.17 : Répartition des contraintes pour le modèle 2 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement uniforme

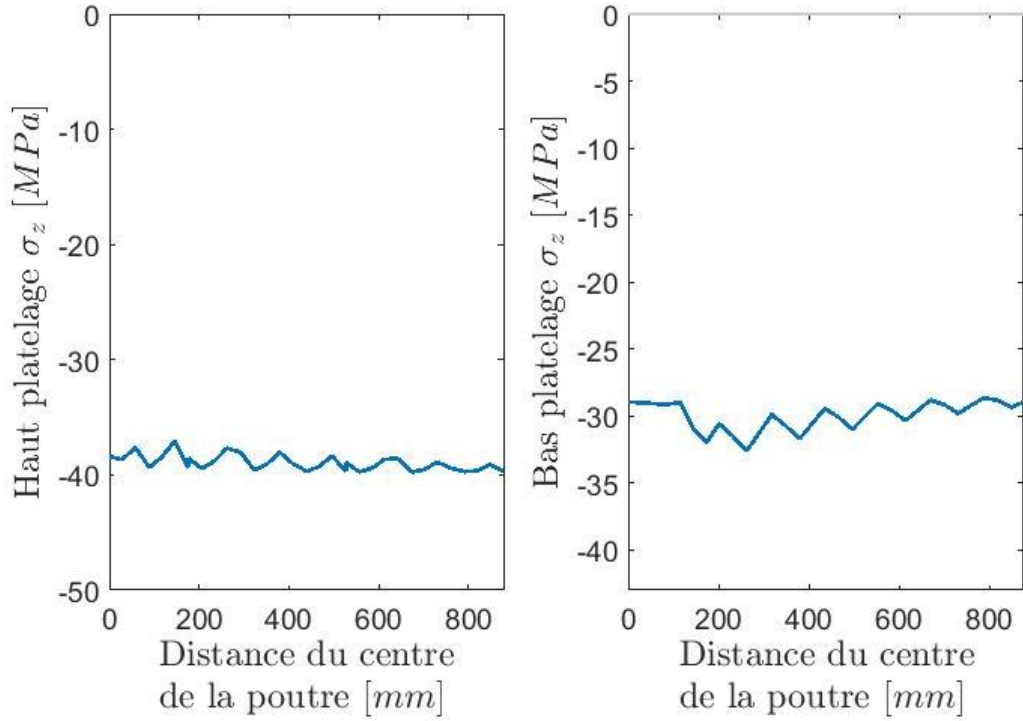


Figure E.18 : Répartition des contraintes pour le modèle 3 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement uniforme

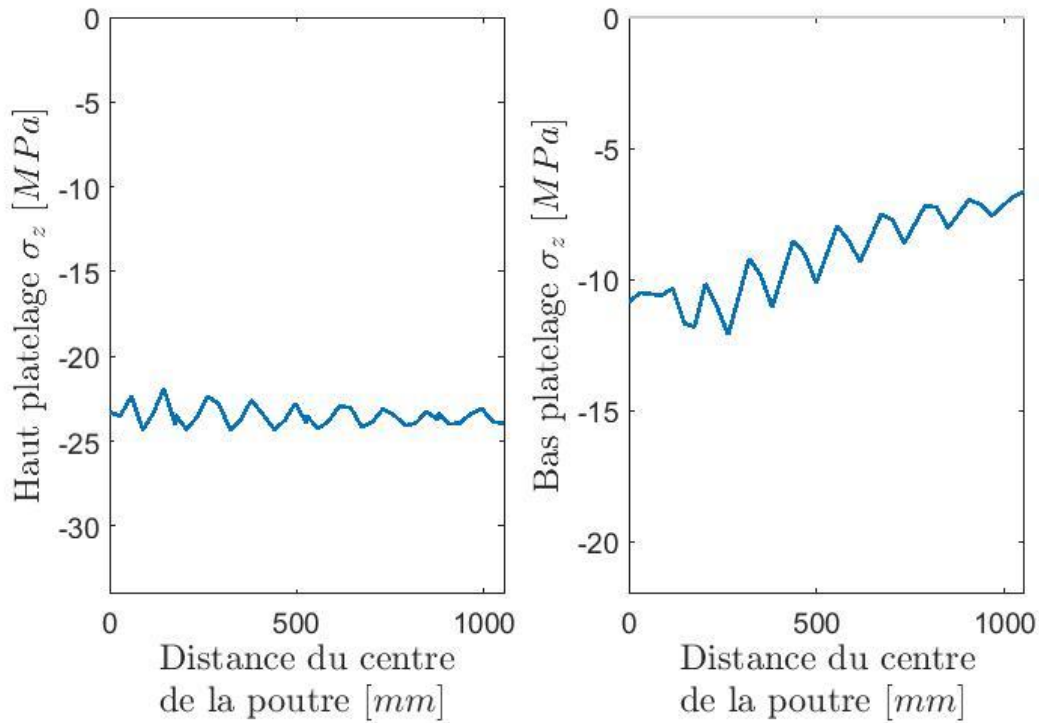


Figure E.19 : Répartition des contraintes pour le modèle 4 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement uniforme

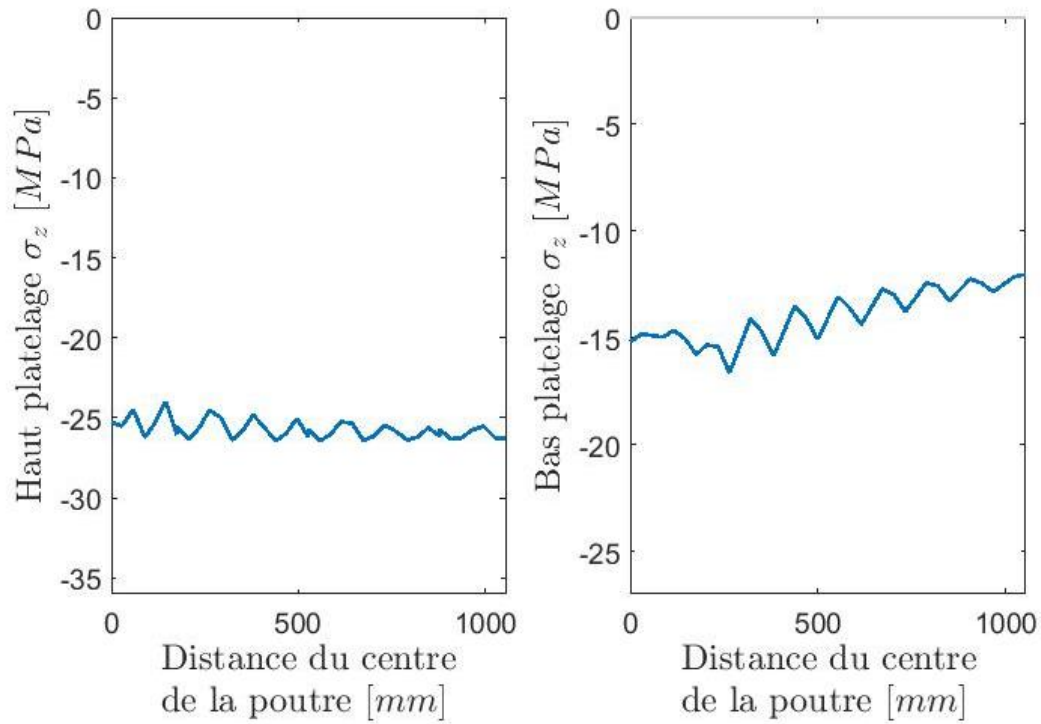


Figure E.20 : Répartition des contraintes pour le modèle 5 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement uniforme

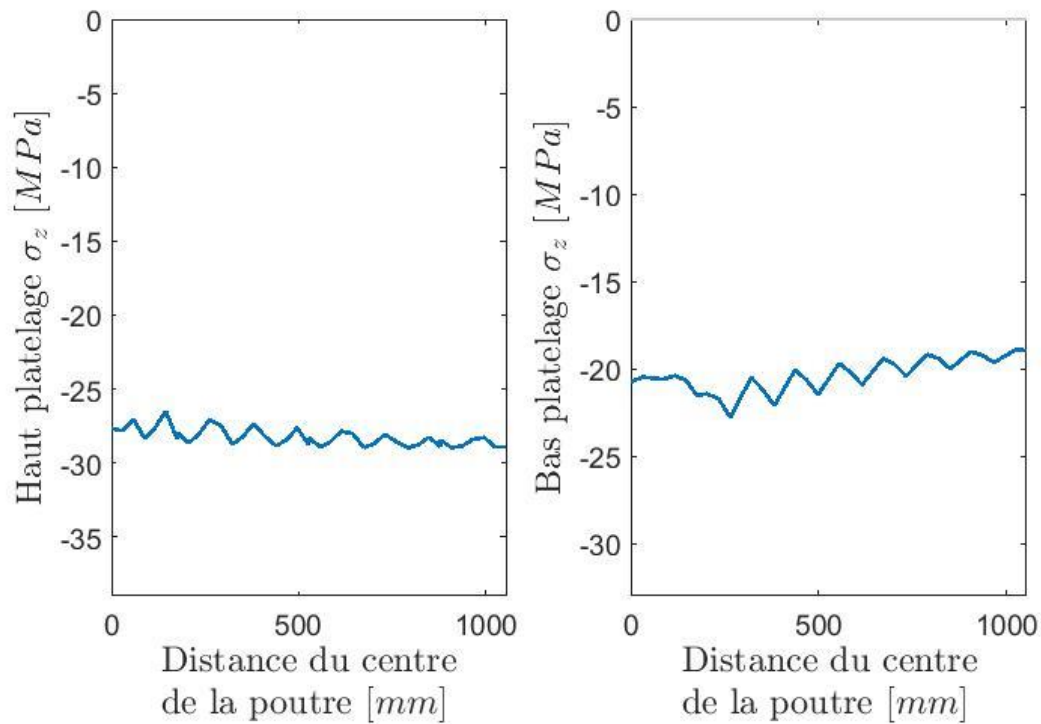


Figure E.21 : Répartition des contraintes pour le modèle 6 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement uniforme

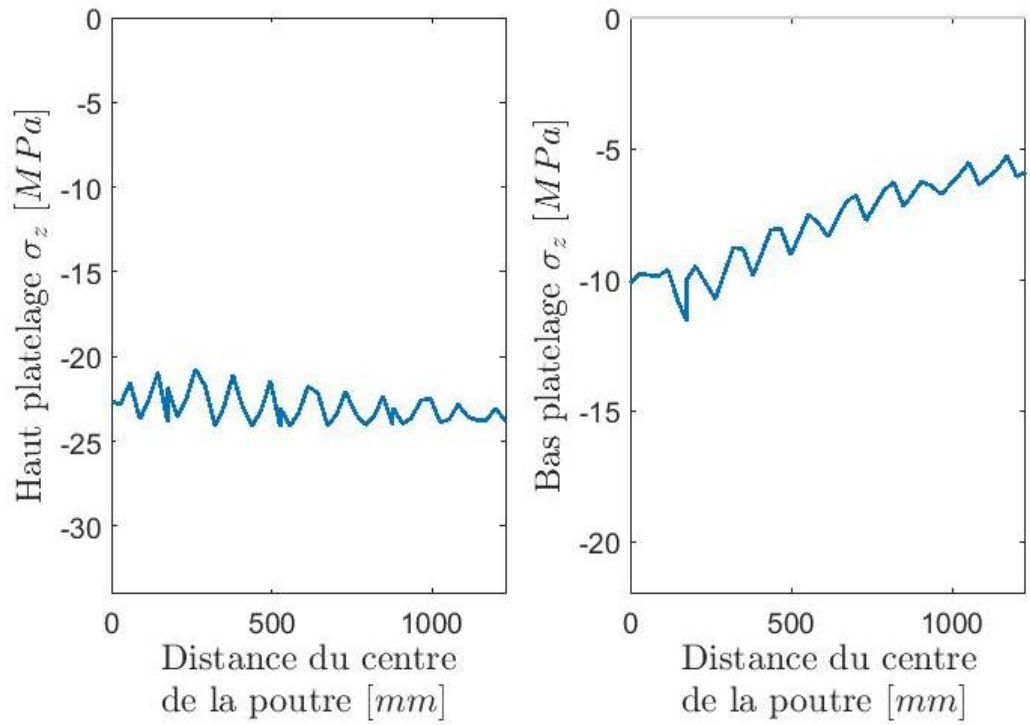


Figure E.22 : Répartition des contraintes pour le modèle 7 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement uniforme

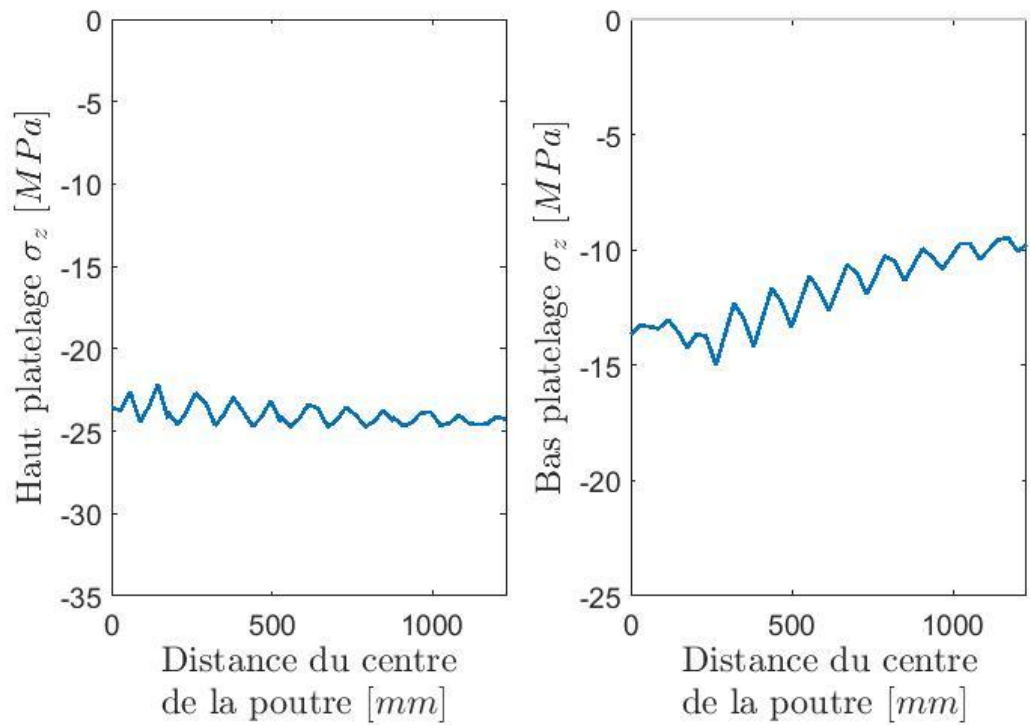


Figure E.23 : Répartition des contraintes pour le modèle 8 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement uniforme



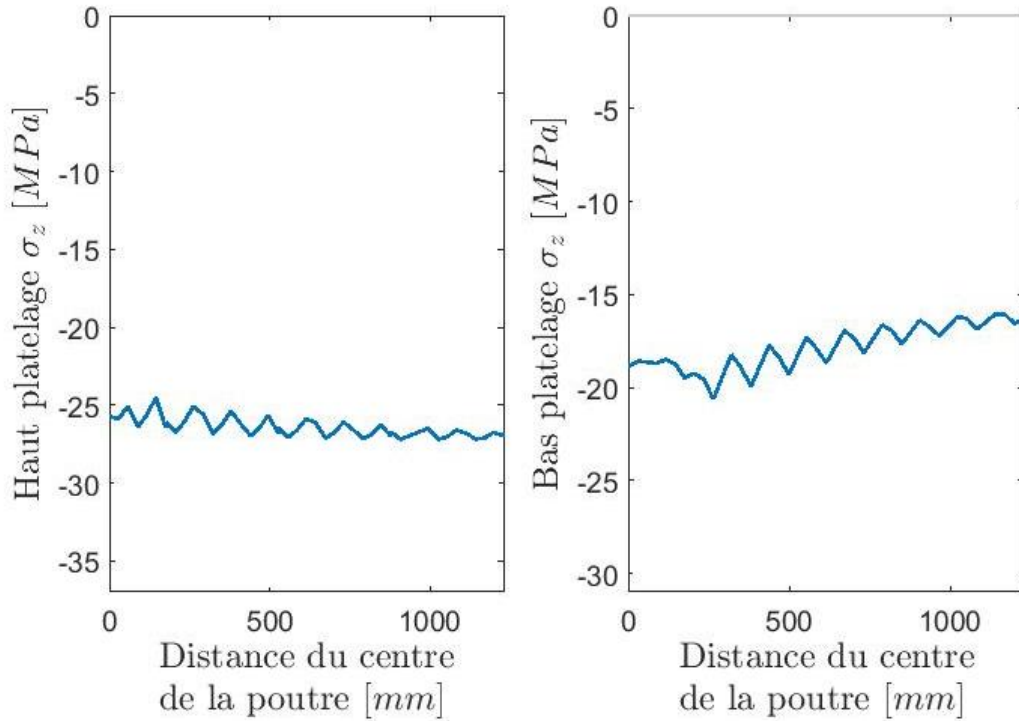


Figure E.24 : Répartition des contraintes pour le modèle 9 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement uniforme

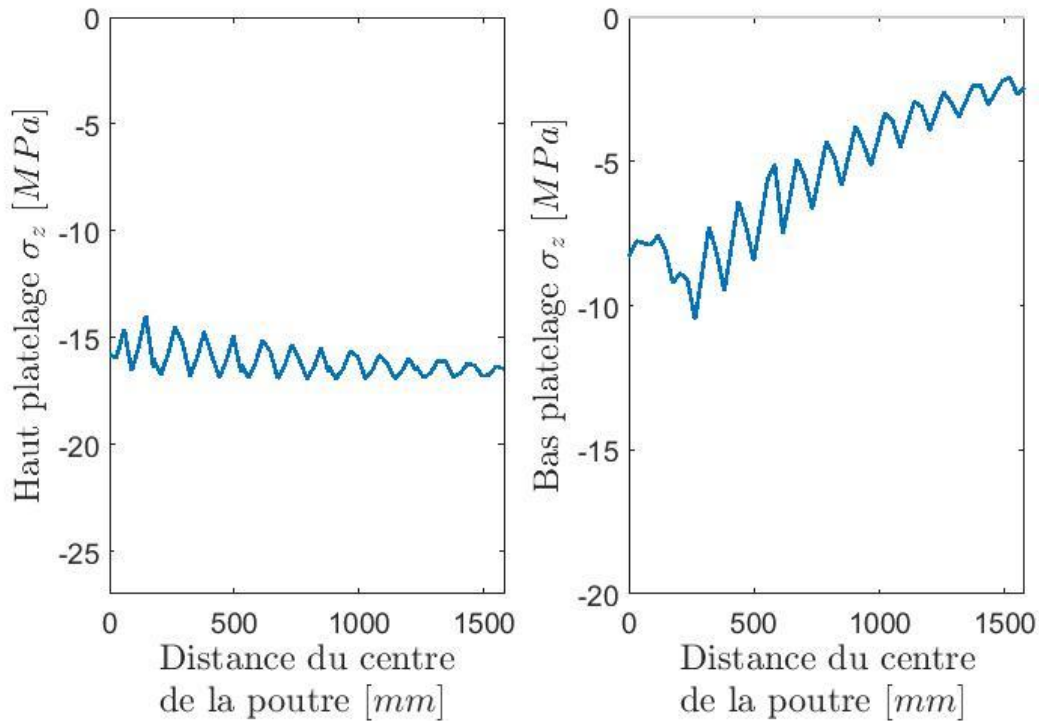


Figure E.25 : Répartition des contraintes pour le modèle 10 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement uniforme

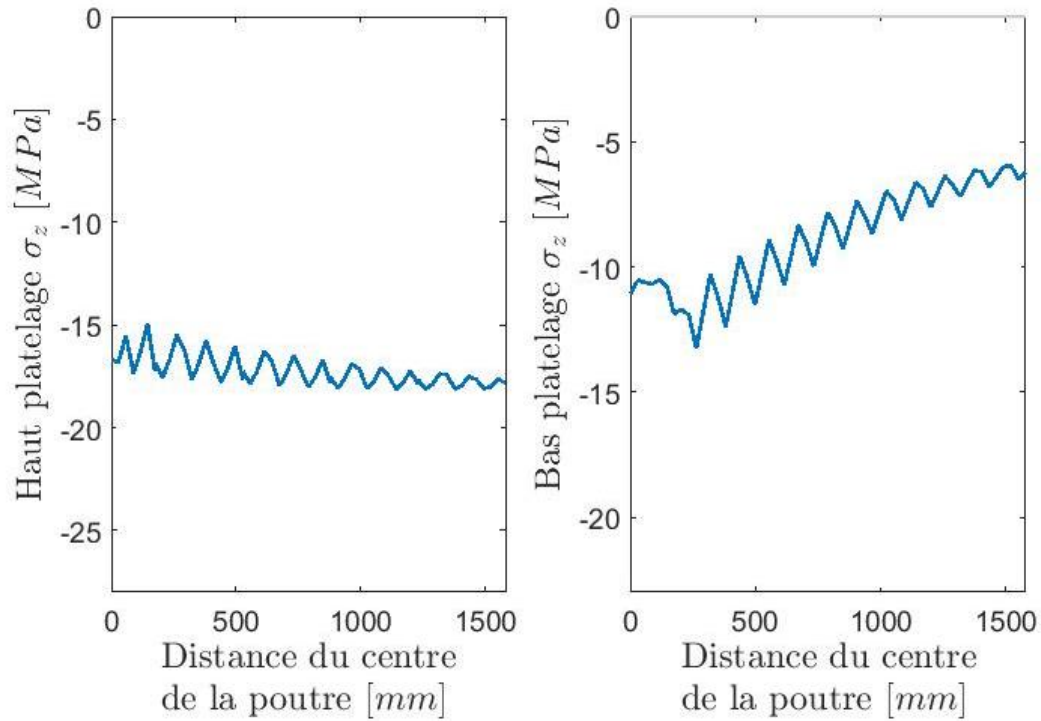


Figure E.26 : Répartition des contraintes pour le modèle 11 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement uniforme

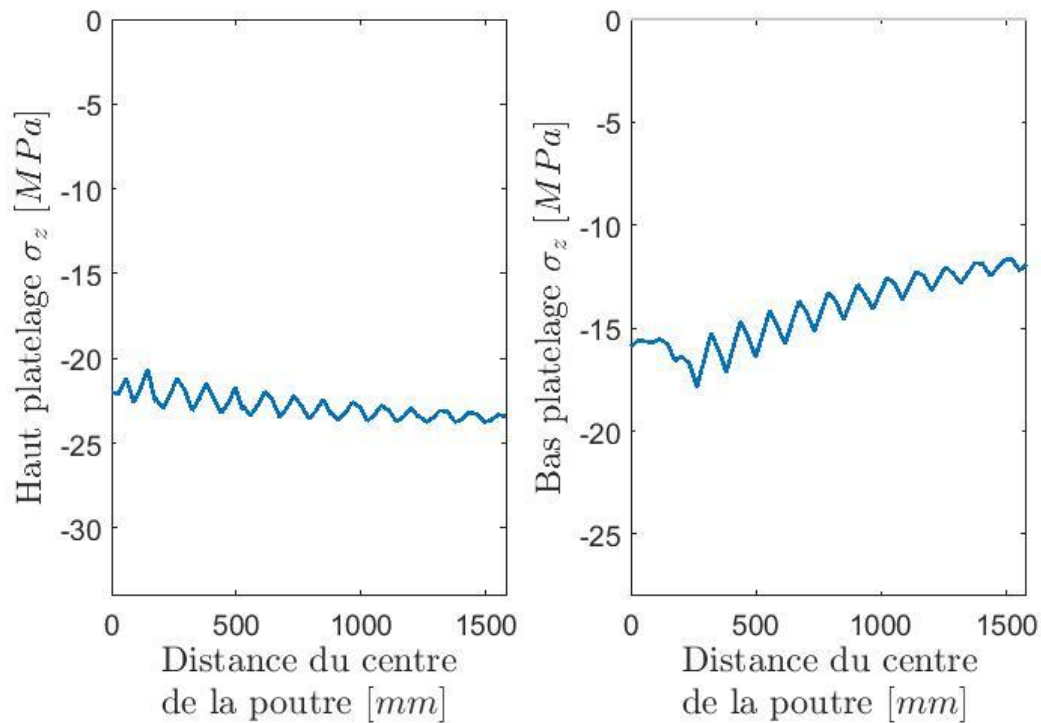


Figure E.27 : Répartition des contraintes pour le modèle 12 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement uniforme

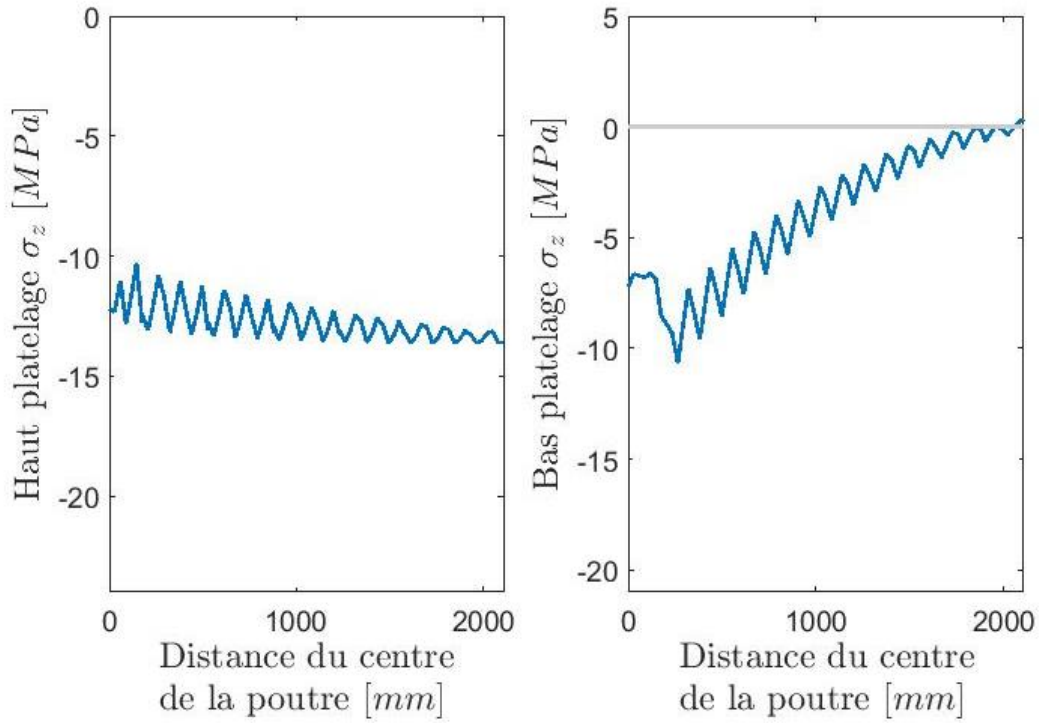


Figure E.28 : Répartition des contraintes pour le modèle 13 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement uniforme

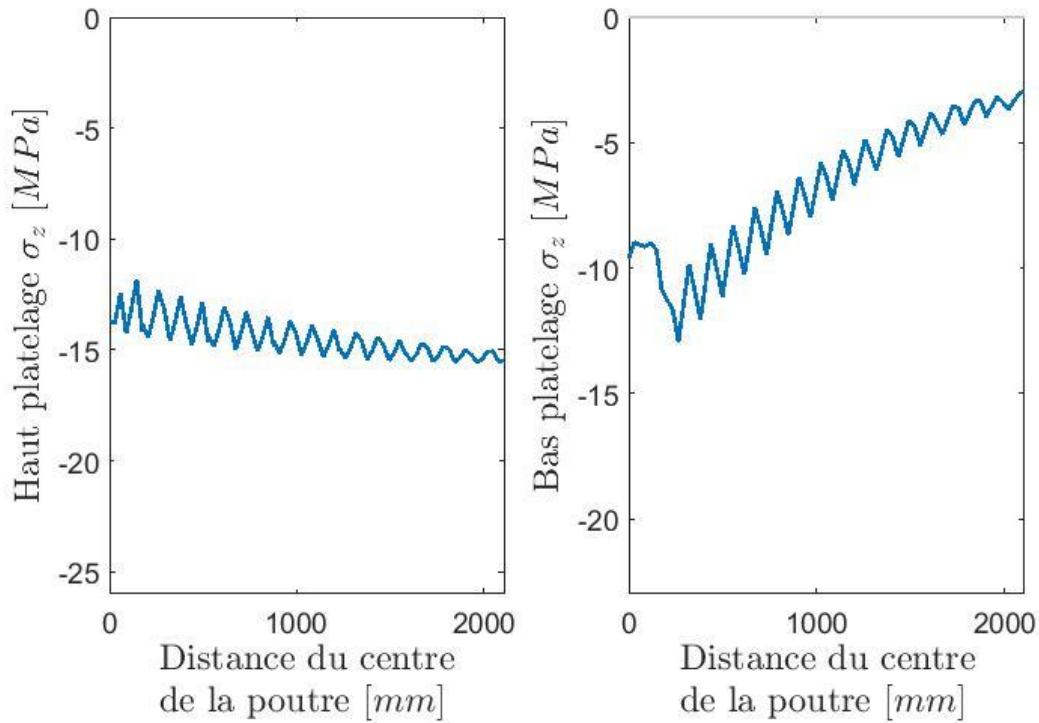


Figure E.29 : Répartition des contraintes pour le modèle 14 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement uniforme

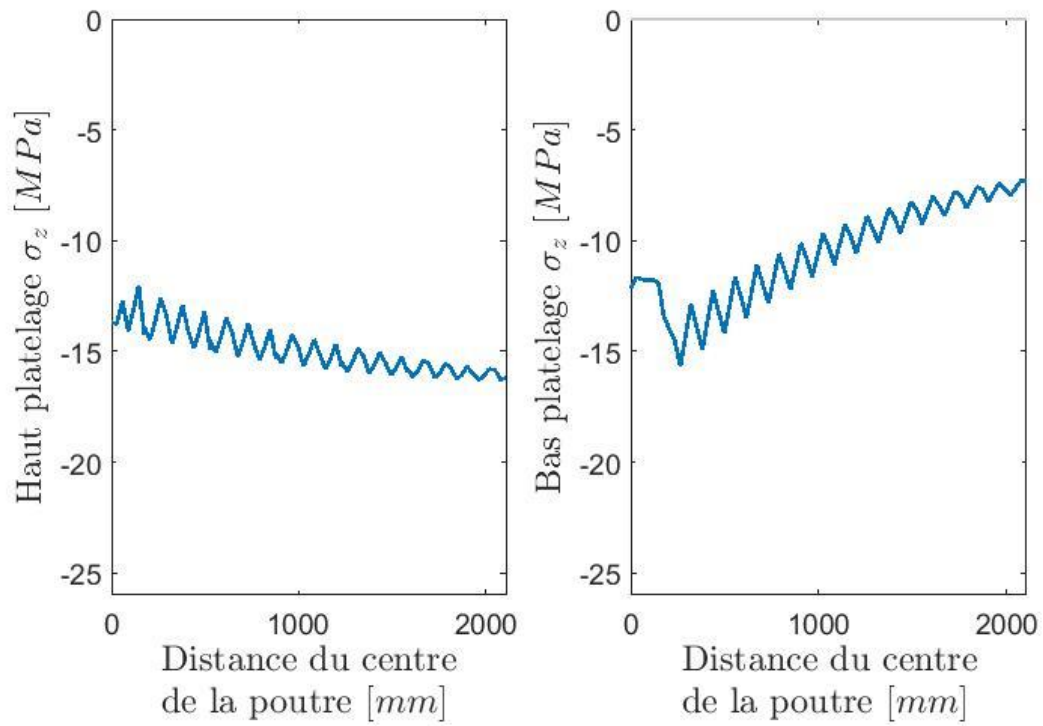


Figure E.30 : Répartition des contraintes pour le modèle 15 avec la disposition longitudinale des extrusions sous le chargement uniforme

### Disposition des extrusions : Transversale

Chargement : Camion

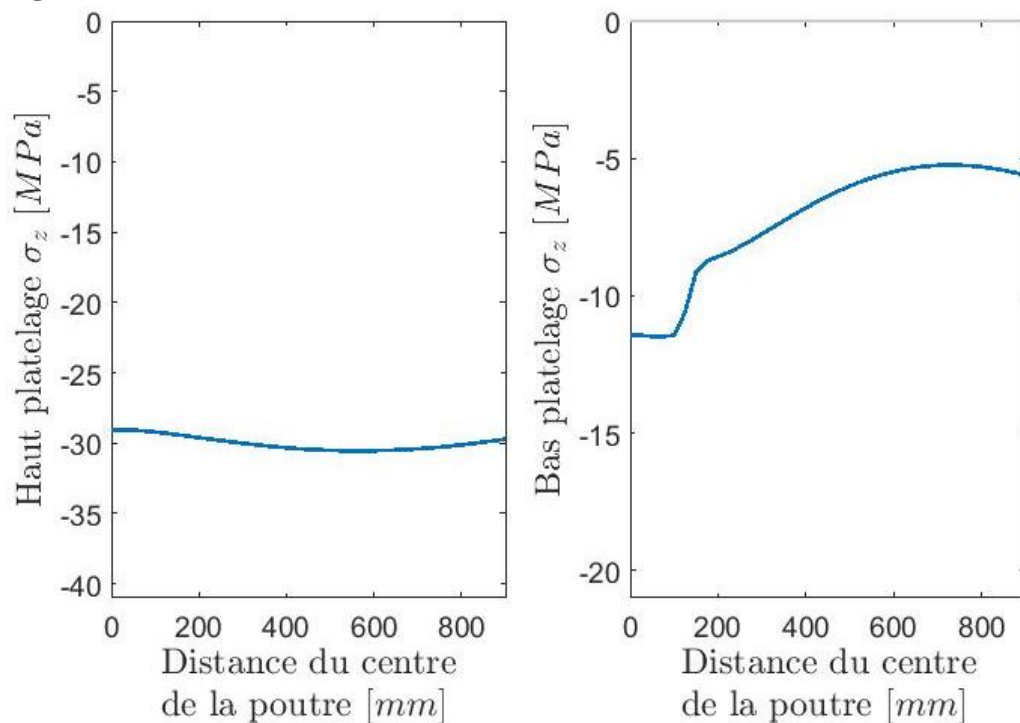


Figure E.31 : Répartition des contraintes pour le modèle 1 avec la disposition transversale des extrusions sous le chargement de camion

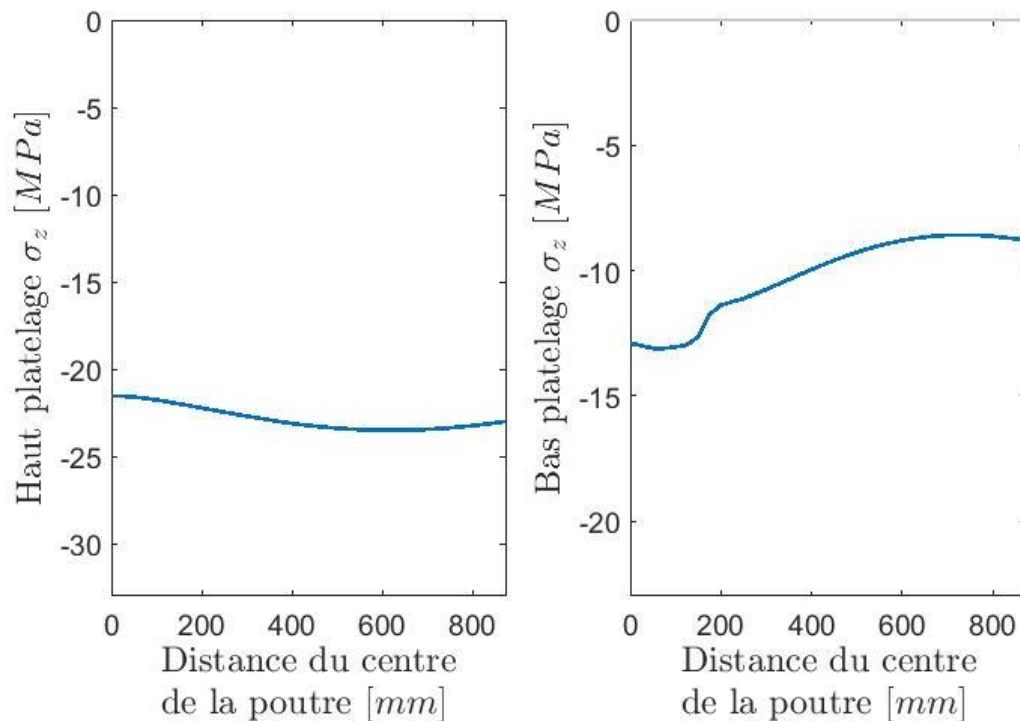


Figure E.32 : Répartition des contraintes pour le modèle 2 avec la disposition transversale des extrusions sous le chargement de camion

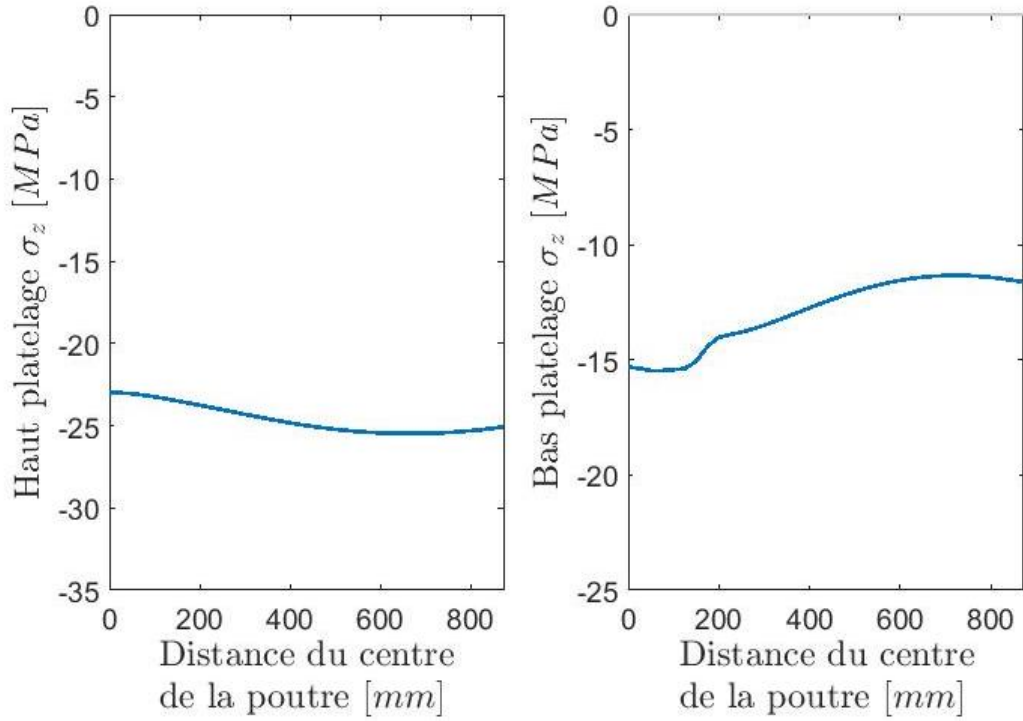


Figure E.33 : Répartition des contraintes pour le modèle 3 avec la disposition transversale des extrusions sous le chargement de camion

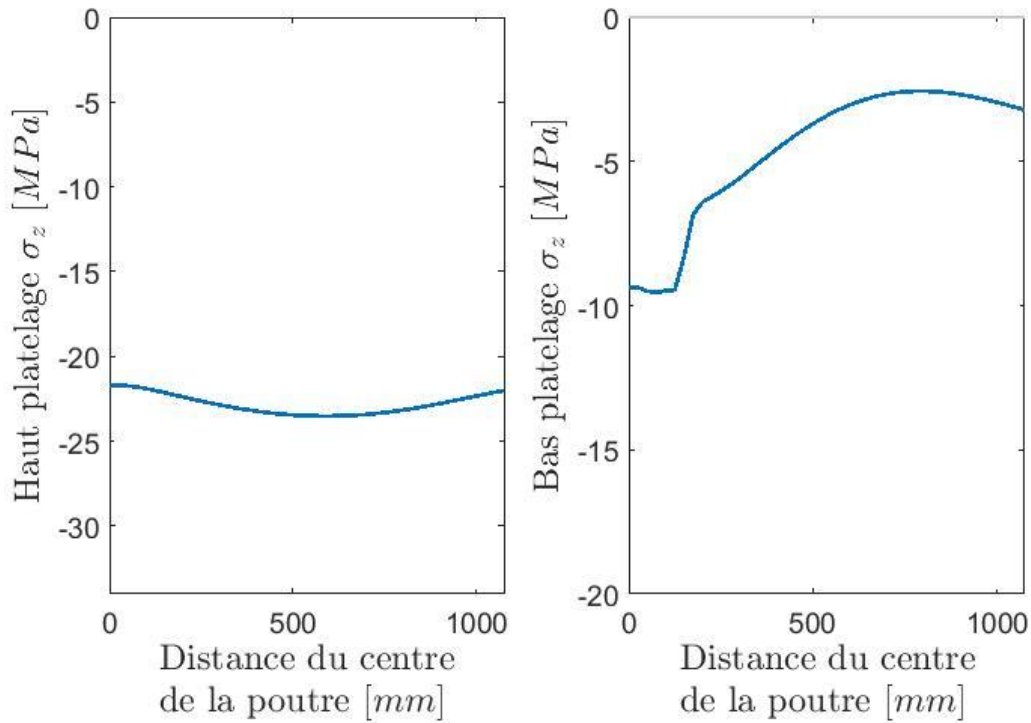


Figure E.34 : Répartition des contraintes pour le modèle 4 avec la disposition transversale des extrusions sous le chargement de camion

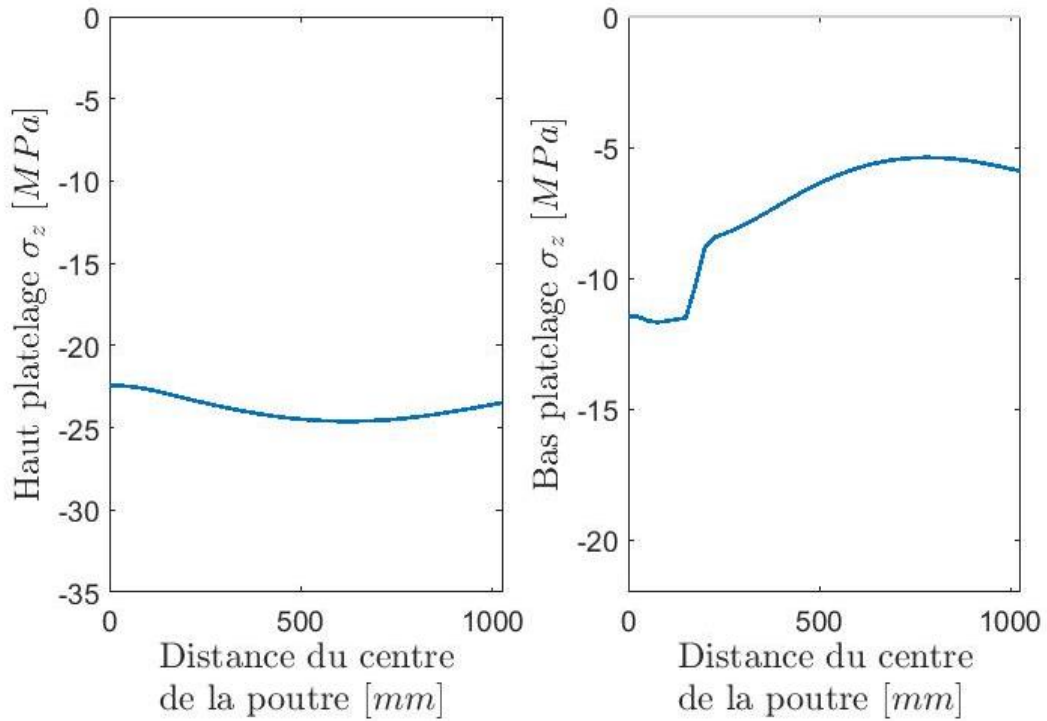


Figure E.35 : Répartition des contraintes pour le modèle 5 avec la disposition transversale des extrusions sous le chargement de camion

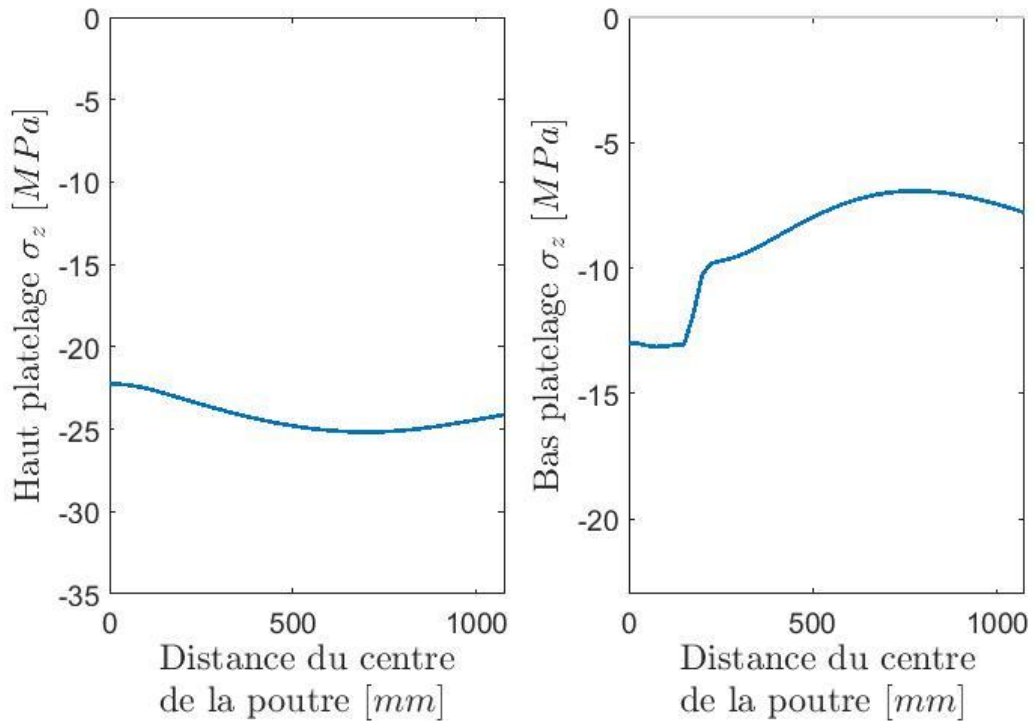


Figure E.36 : Répartition des contraintes pour le modèle 6 avec la disposition transversale des extrusions sous le chargement de camion

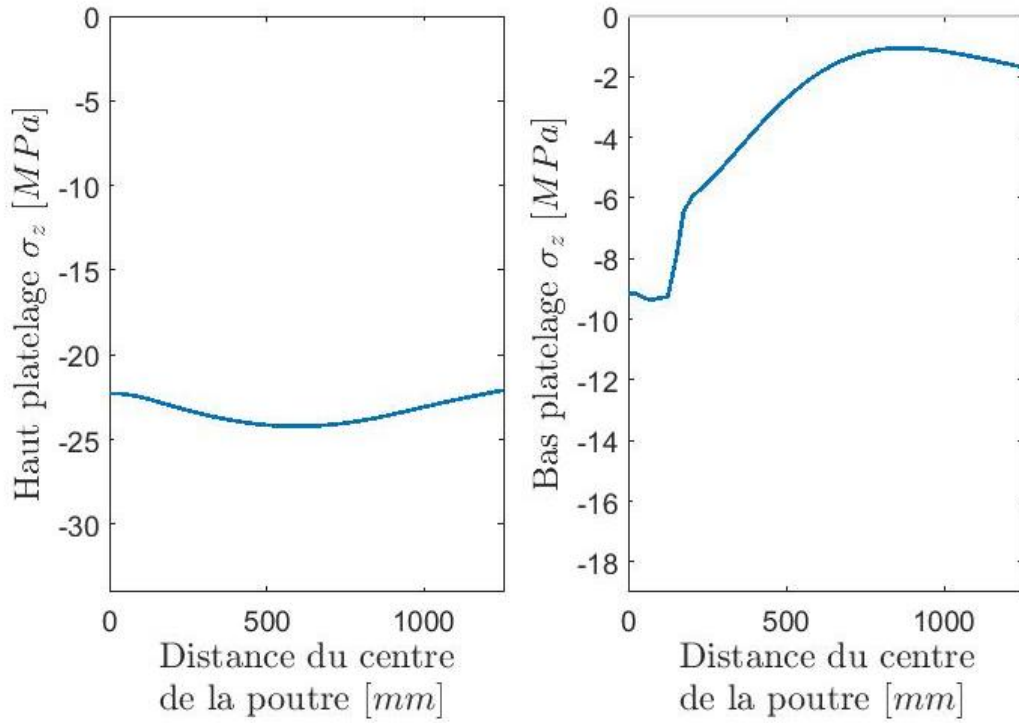


Figure E.37 : Répartition des contraintes pour le modèle 7 avec la disposition transversale des extrusions sous le chargement de camion

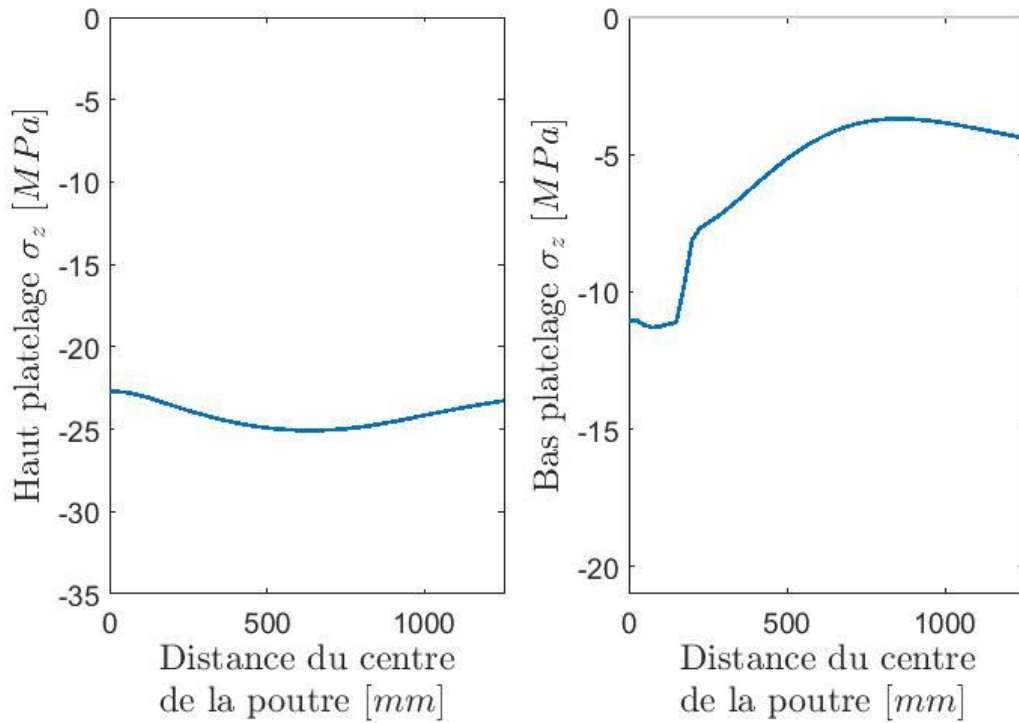


Figure E.38 : Répartition des contraintes pour le modèle 8 avec la disposition transversale des extrusions sous le chargement de camion



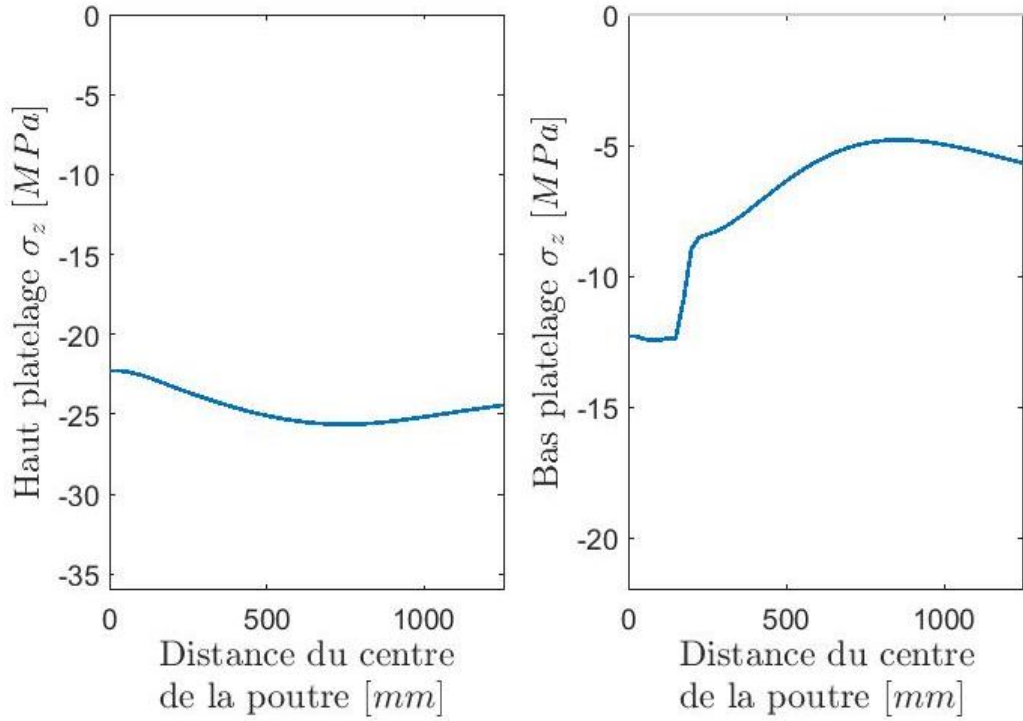


Figure E.39 : Répartition des contraintes pour le modèle 9 avec la disposition transversale des extrusions sous le chargement de camion

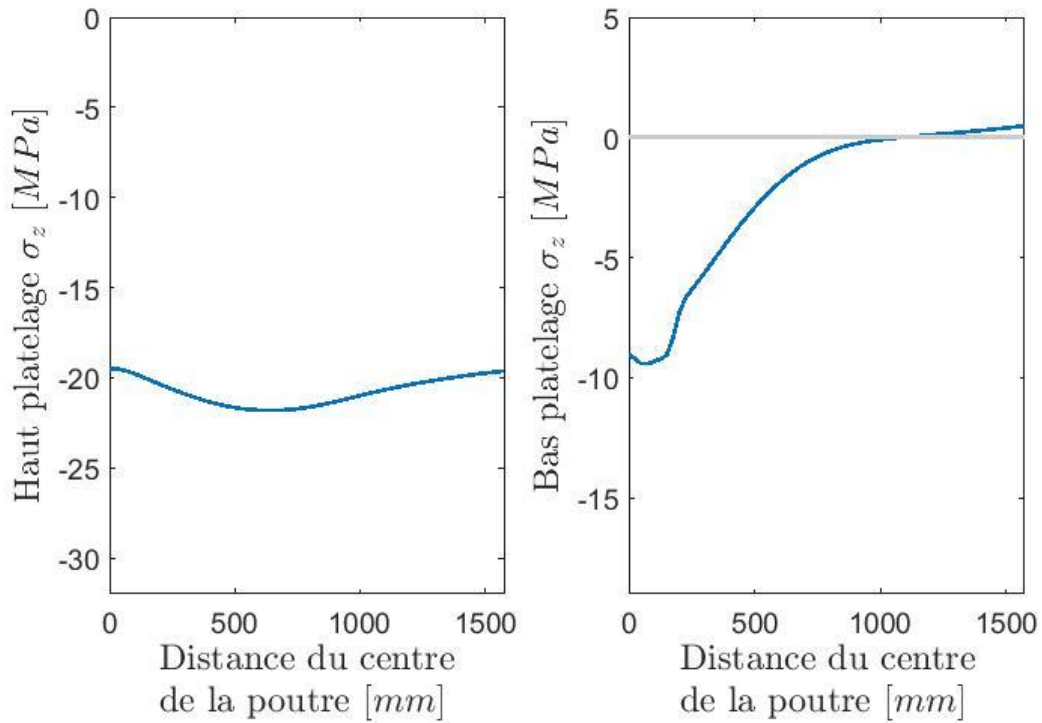


Figure E.40 : Répartition des contraintes pour le modèle 10 avec la disposition transversale des extrusions sous le chargement de camion

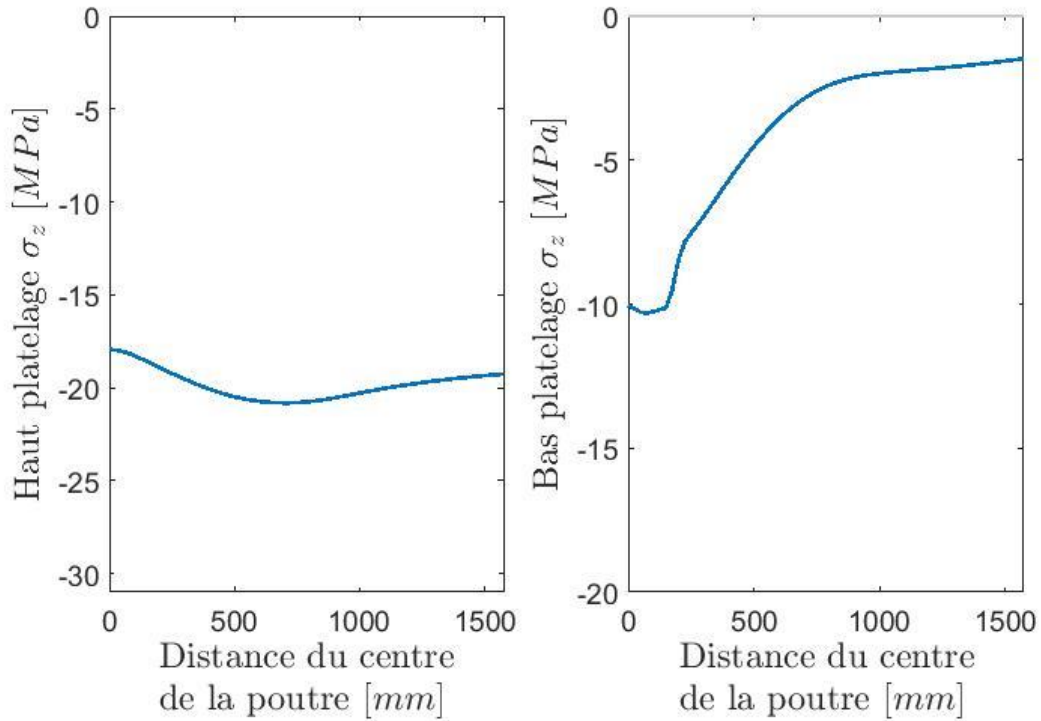


Figure E.41 : Répartition des contraintes pour le modèle 11 avec la disposition transversale des extrusions sous le chargement de camion

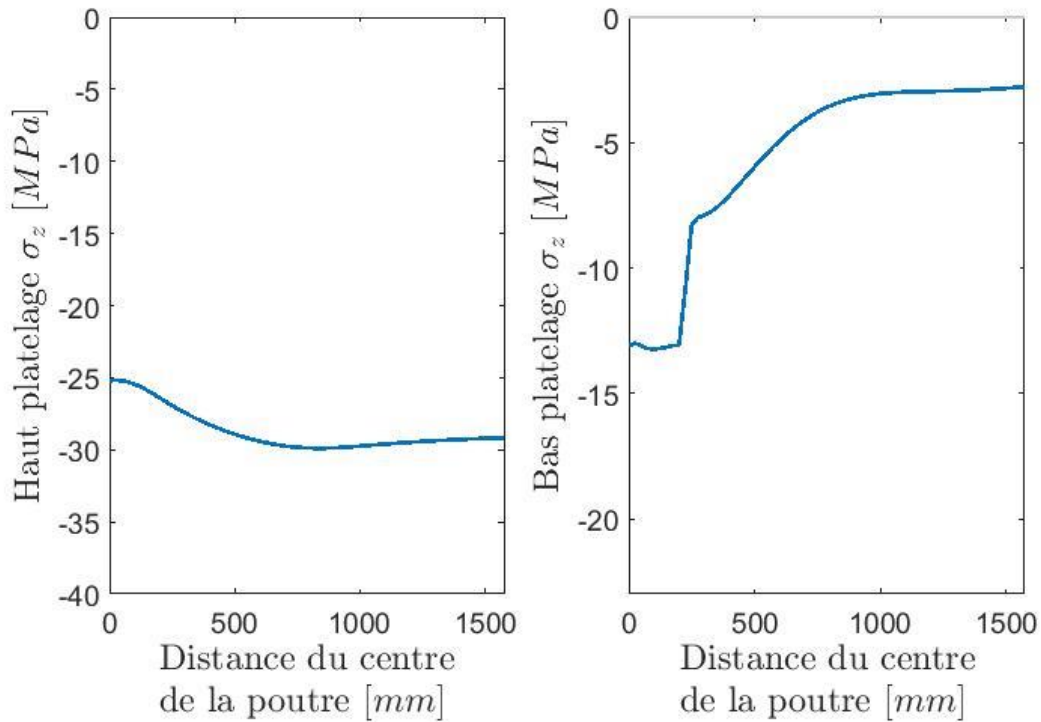


Figure E.42 : Répartition des contraintes pour le modèle 12 avec la disposition transversale des extrusions sous le chargement de camion

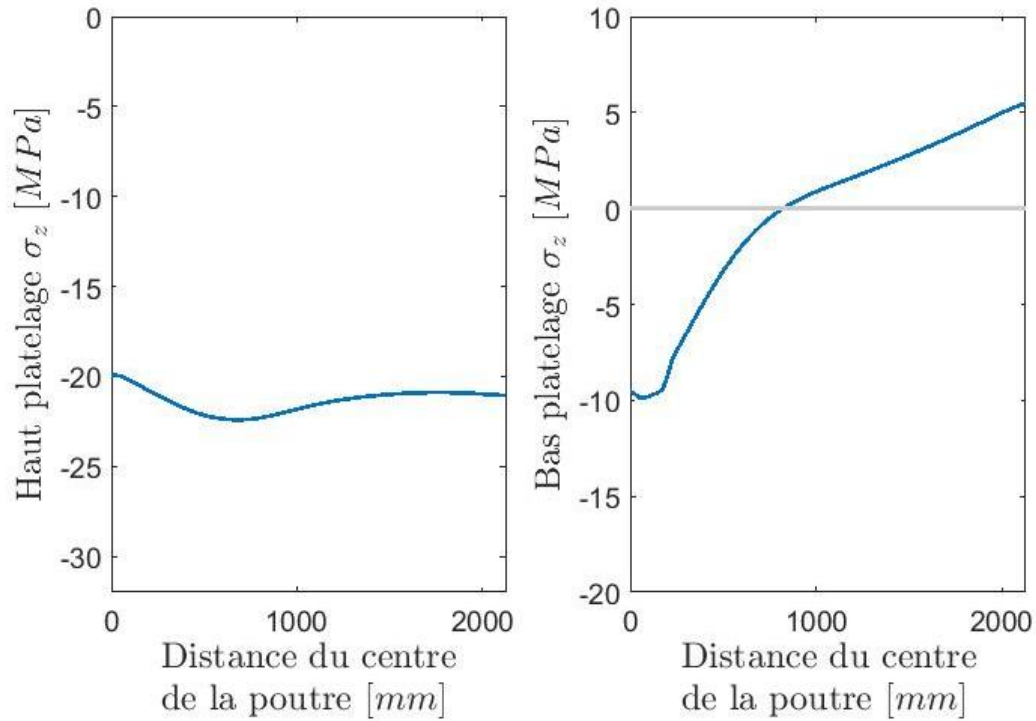


Figure E.43 : Répartition des contraintes pour le modèle 13 avec la disposition transversale des extrusions sous le chargement de camion

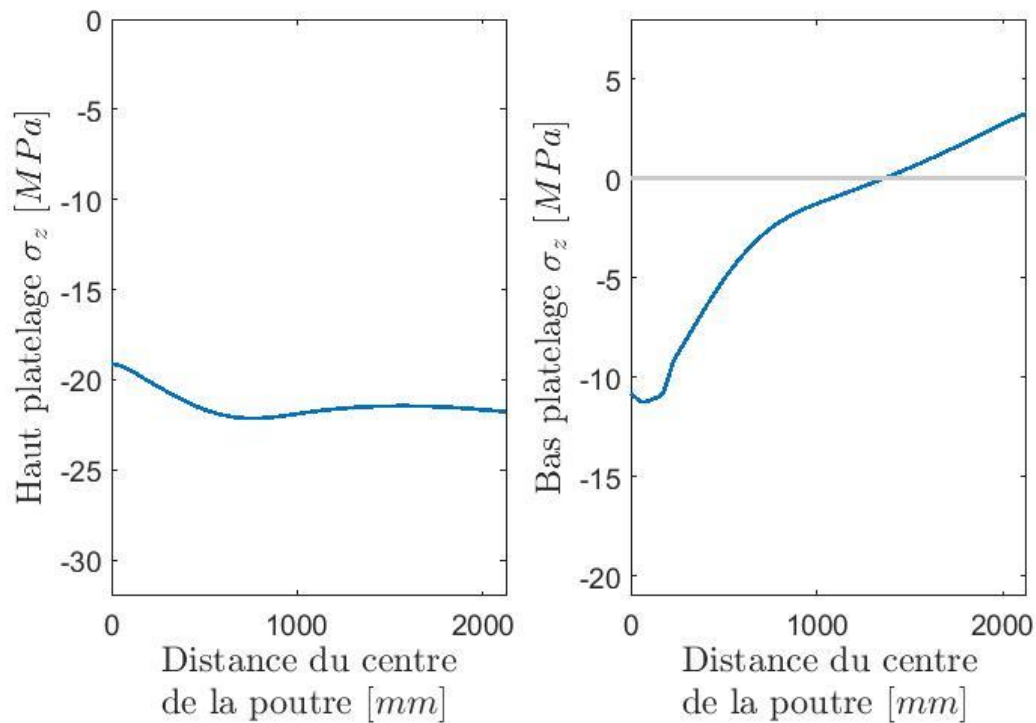


Figure E.44 : Répartition des contraintes pour le modèle 14 avec la disposition transversale des extrusions sous le chargement de camion

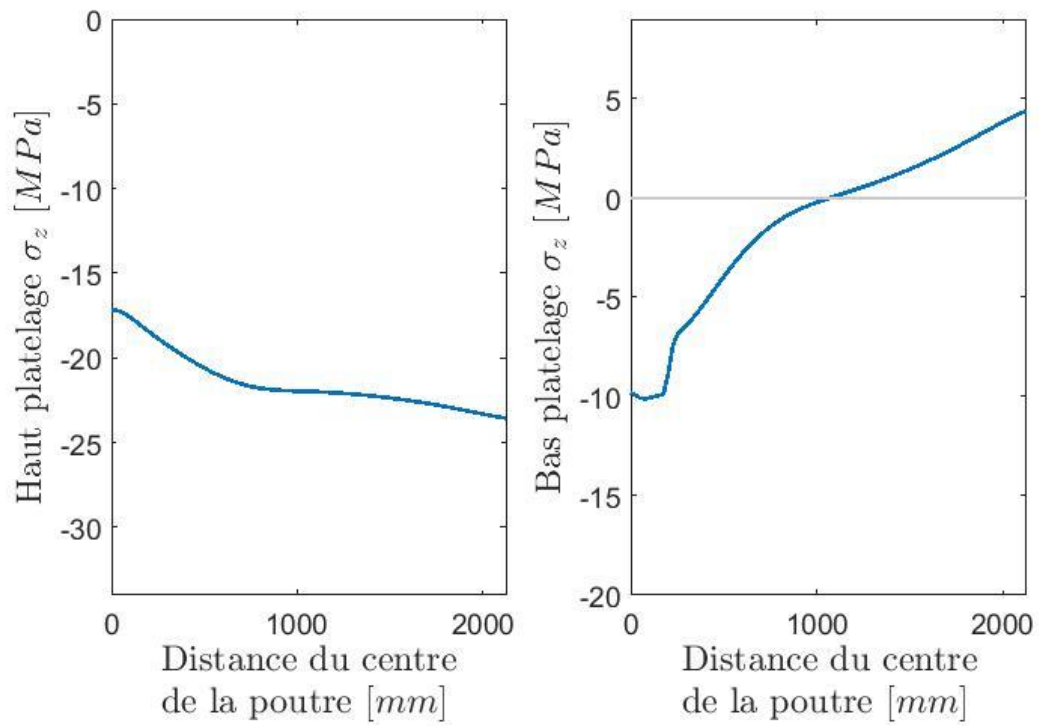


Figure E.45 : Répartition des contraintes pour le modèle 15 avec la disposition transversale des extrusions sous le chargement de camion



## Annexe F Essais pour déterminer la rigidité flexionnelle du platelage



Des modèles simples ont été réalisés afin de pouvoir déterminer la différence de rigidité flexionnelle lorsque le platelage travaille dans le sens de l'extrusion et lorsqu'il travaille perpendiculairement à l'extrusion.

La méthodologie est simple. Les modèles sont constitués d'un platelage en appui simple sur lequel un chargement uniforme est appliqué. Le ratio de la portée sur l'espacement des poutres varie. Pour chacune des ratios choisis, il y a un modèle fait avec les extrusions posées dans le sens longitudinal de la portée, et un autre avec les extrusions posées transversalement au sens de la portée. La valeur du chargement répartie est la même.

Le tableau ci-dessous donne les dimensions des platelages retenus ainsi que le chargement appliqué.

*Tableau F.1: Valeurs des dimensions et du chargement utilisées pour le calcul de la rigidité flexionnelle du platelage*

	<b>Chargement uniformément répartie</b>	<b>Largeur</b>	<b>Portée</b>
	<b>MPa</b>	<b>m</b>	<b>m</b>
Essais 1	0,0001	8,775	10
Essais 2			15
Essais 3			20
Essais 4			30
Essais 5			40
Essai 6		1,755	20

Afin de déterminer la rigidité flexionnelle du platelage modélisé, l'équation reliant le chargement répartie et la flèche, tirée de la théorie des poutres, est utilisée. Une hypothèse est donc faite selon laquelle le platelage va se comporter comme une poutre. Cette hypothèse est un peu simplificatrice, mais pour les ratios élevés de longueur sur la largeur, elle est plausible. Ainsi, la rigidité flexionnelle est déterminée comme suit :

$$EI = \frac{5 * w * L^4}{384 * \Delta}$$



Où

$EI$  = Rigidité flexionnelle du platelage ( $N * mm^2$ )

$w$  = Chargement linéaire équivalent au chargement uniformément répartie ( $N/mm$ )

$L$  = Portée ( $mm$ )

$\Delta$  = Flèche verticale ( $mm$ )

Les résultats obtenus à l'aide des modèles sont présentés à la figure F.1. La différence de rigidité flexionnelle obtenue est exprimée en un ratio de la rigidité des extrusions posées longitudinalement au sens de la portée sur la rigidité des extrusions posées transversalement au sens de la portée.

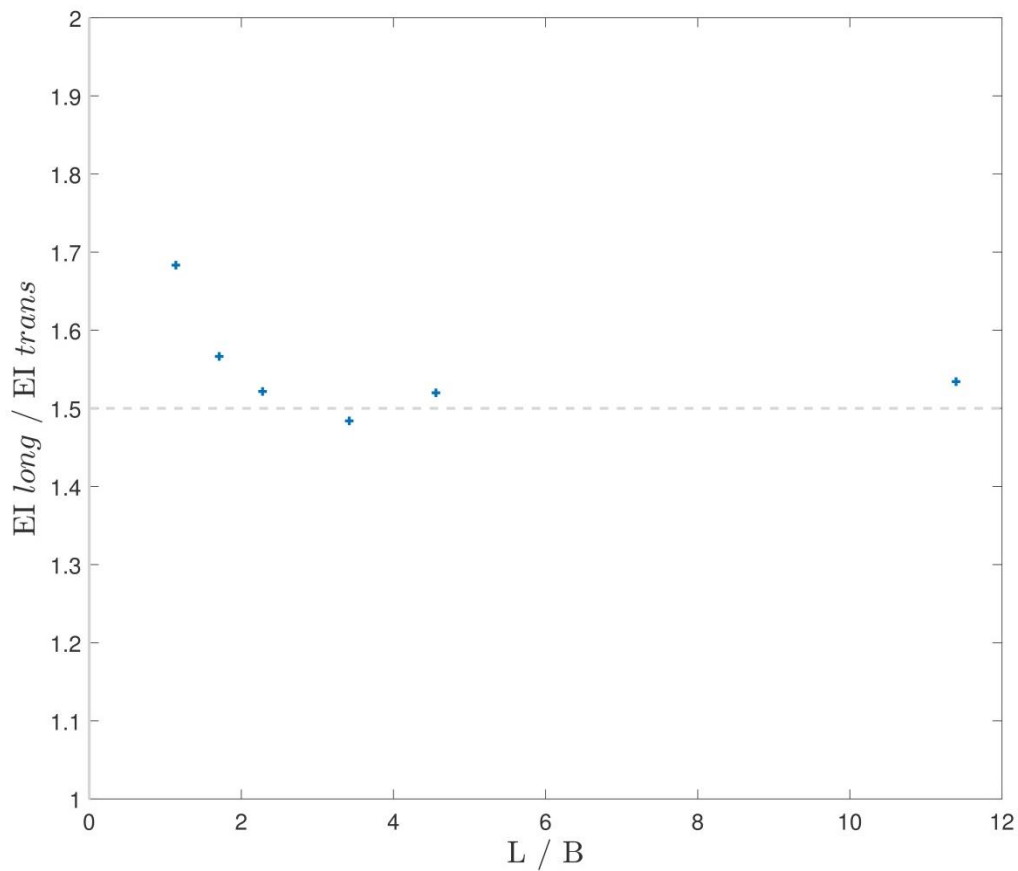


Figure F.1: Ratio des rigidités flexionnelles des extrusions posées longitudinalement et transversalement selon le sens de la portée en fonction de la portée

À l'aide du graphique, il est possible de voir que le rapport de rigidité tend à se stabiliser autour de 1,5 plus la portée augmente. C'est cette valeur qui sera utilisée pour comparer les rigidités flexionnelles des extrusions posées longitudinalement et transversalement au sens de la portée. Cette décision est basée sur le fait que les valeurs pour les plus petites portées sont moins fiables, puisque le platelage est plutôt de forme carré, et l'utilisation de la formule tirée de la théorie des poutres est moins valide. De plus, pour cette étude, les ratios de longueur sur largeur pour le platelage sont toujours plus élevés que 5. Ainsi, le ratio des rigidités flexionnelles obtenu de 1,5 pour des ratios de la longueur sur la largeur du platelage supérieure à 5 est valide. Le pourcentage de différence entre les deux rigidités flexionnelle pour des ratios supérieurs à 5 de la longueur sur la largeur du platelage a également été calculé et donne environ 35% d'écart.

## Annexe G Graphiques des axe neutres

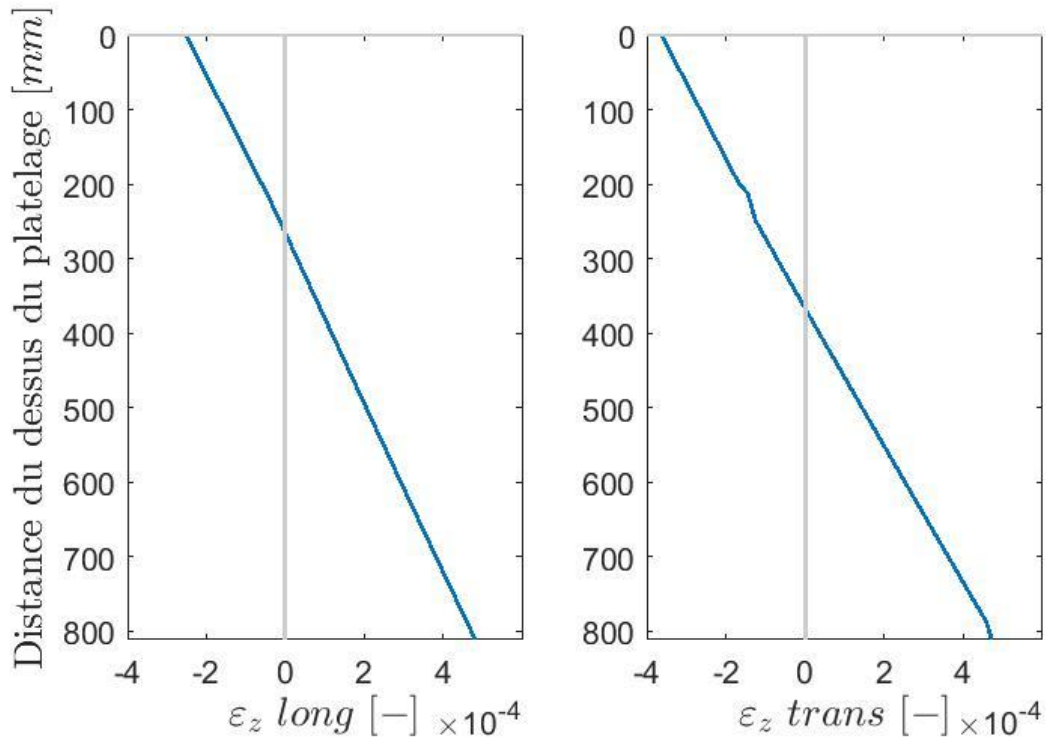


Figure G.1: Axes neutres pour les modèles 1

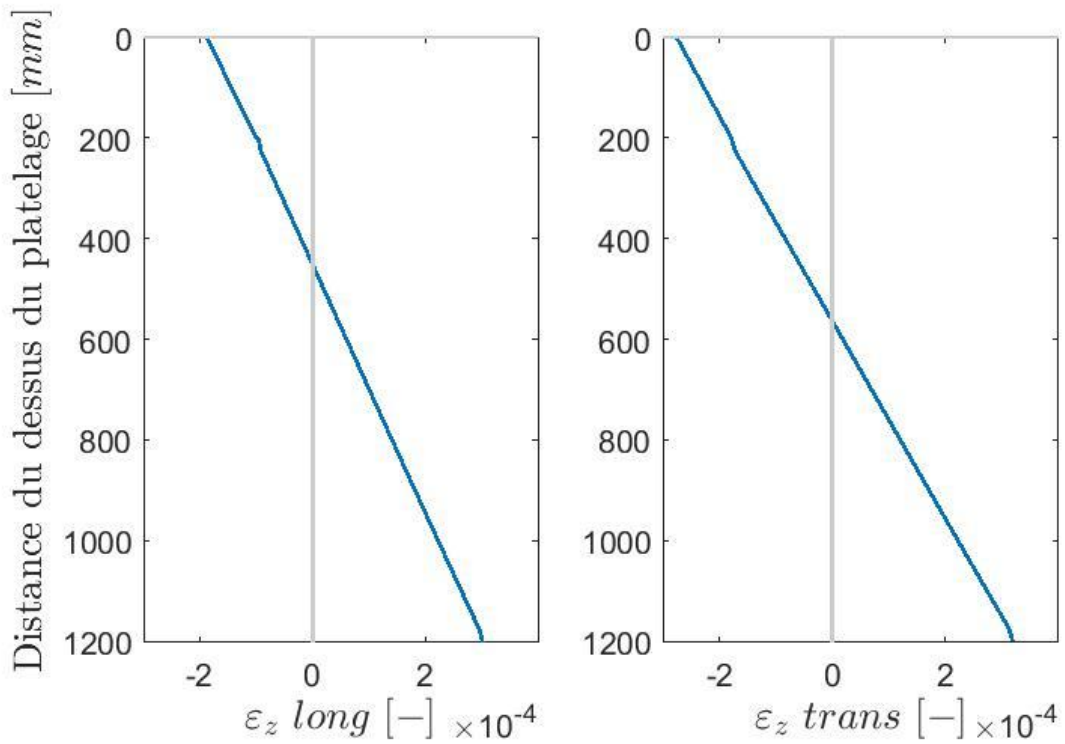


Figure G.2: Axes neutres pour les modèles 2

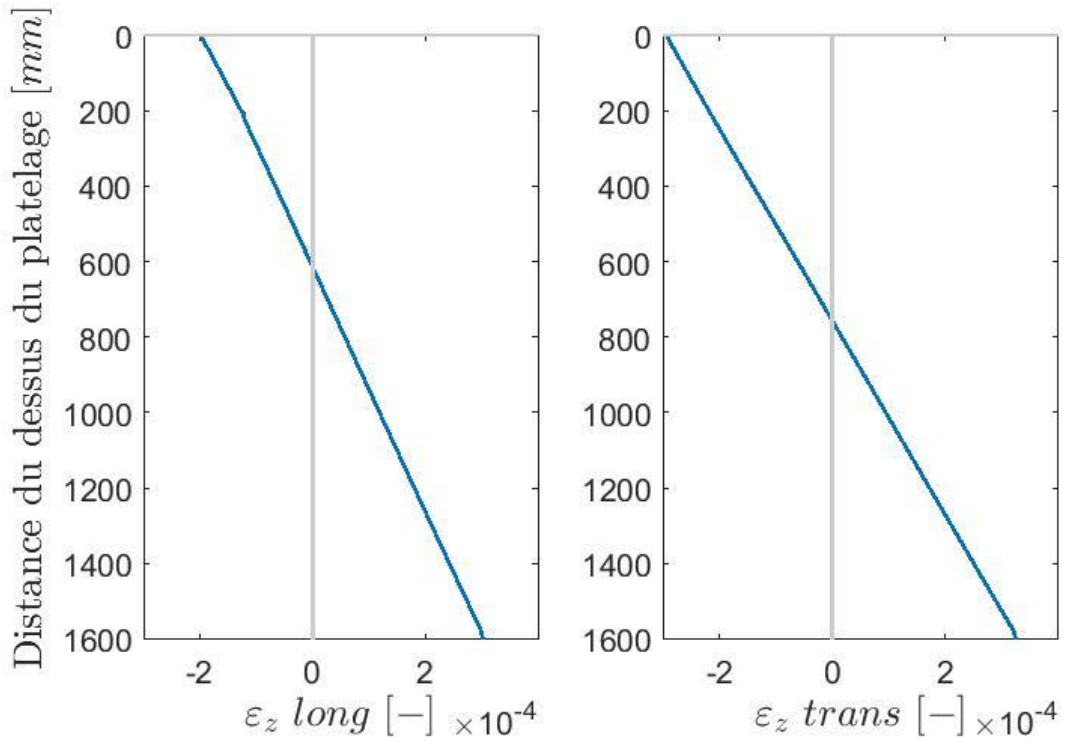


Figure G.3: Axes neutres pour les modèles 3

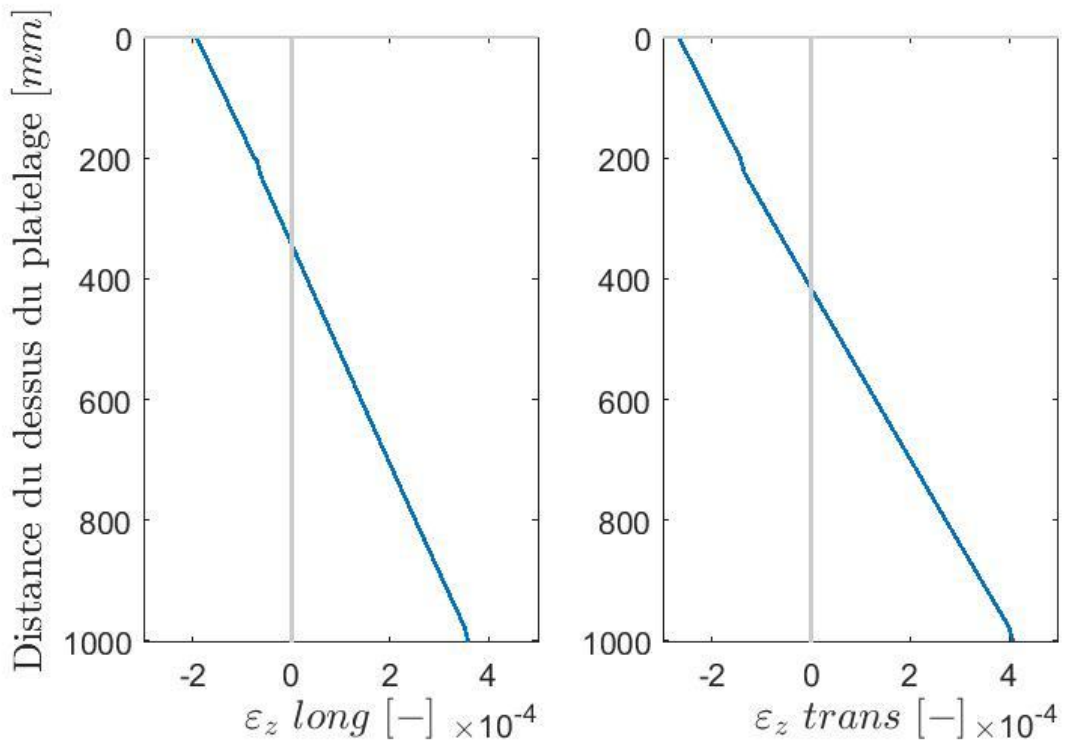


Figure G.4: Axes neutres pour les modèles 4

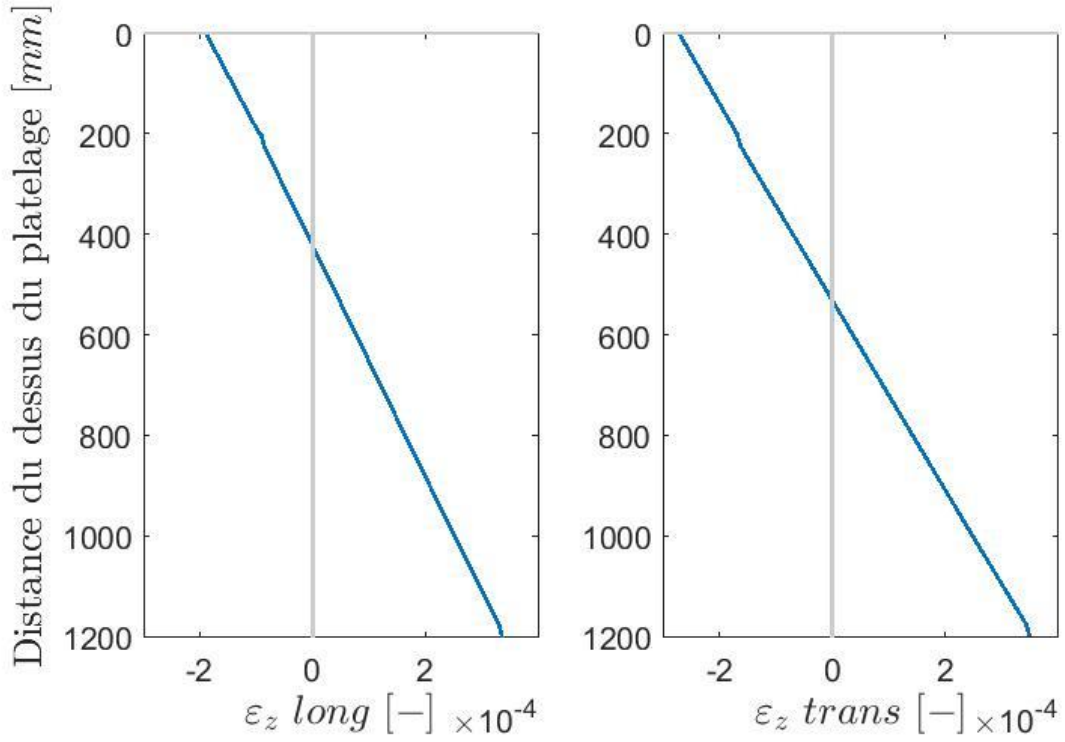


Figure G.5: Axes neutres pour les modèles 5

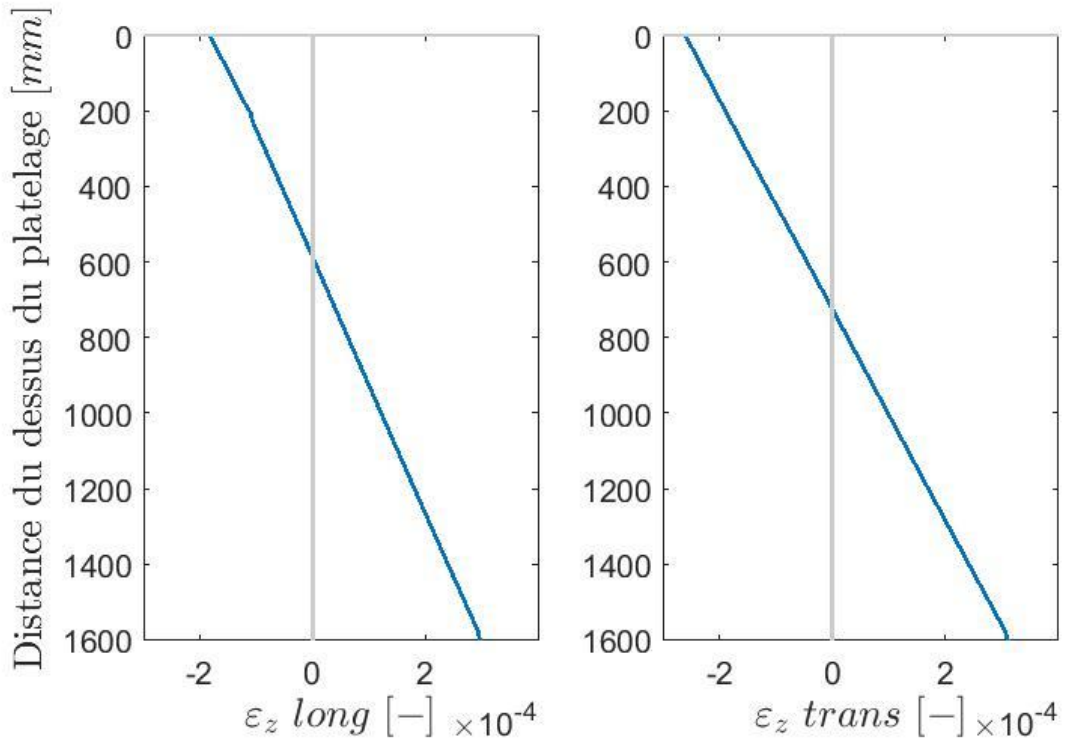


Figure G.6: Axes neutres pour les modèles 6

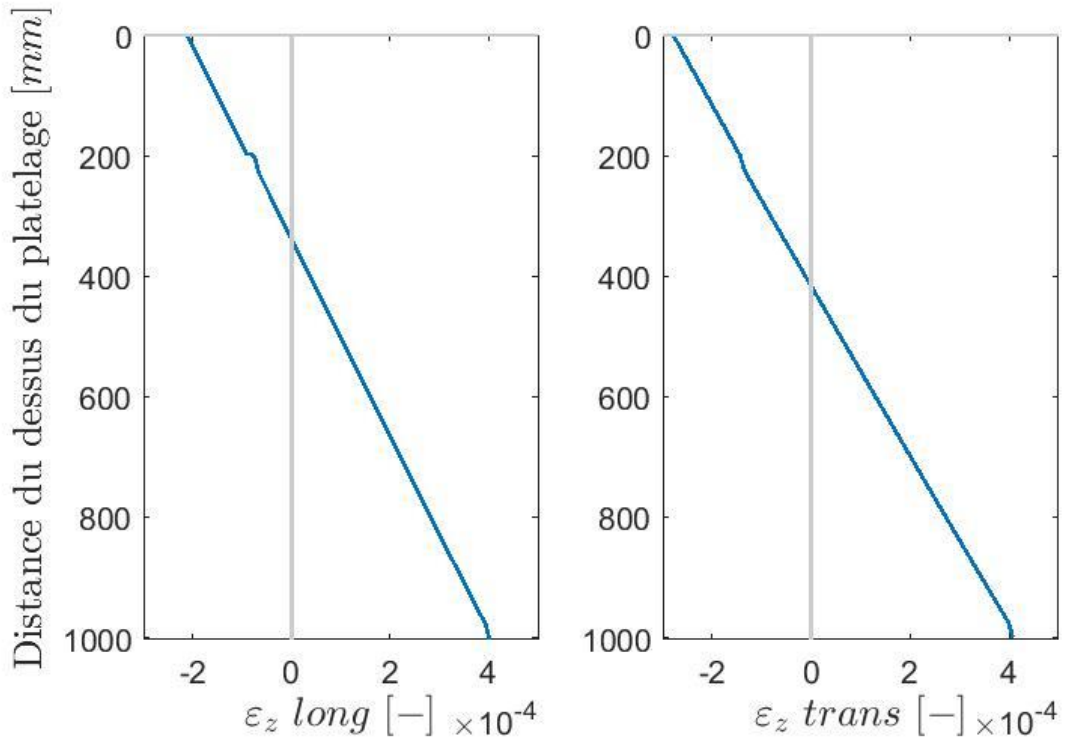


Figure G.7: Axes neutres pour le modèle 7

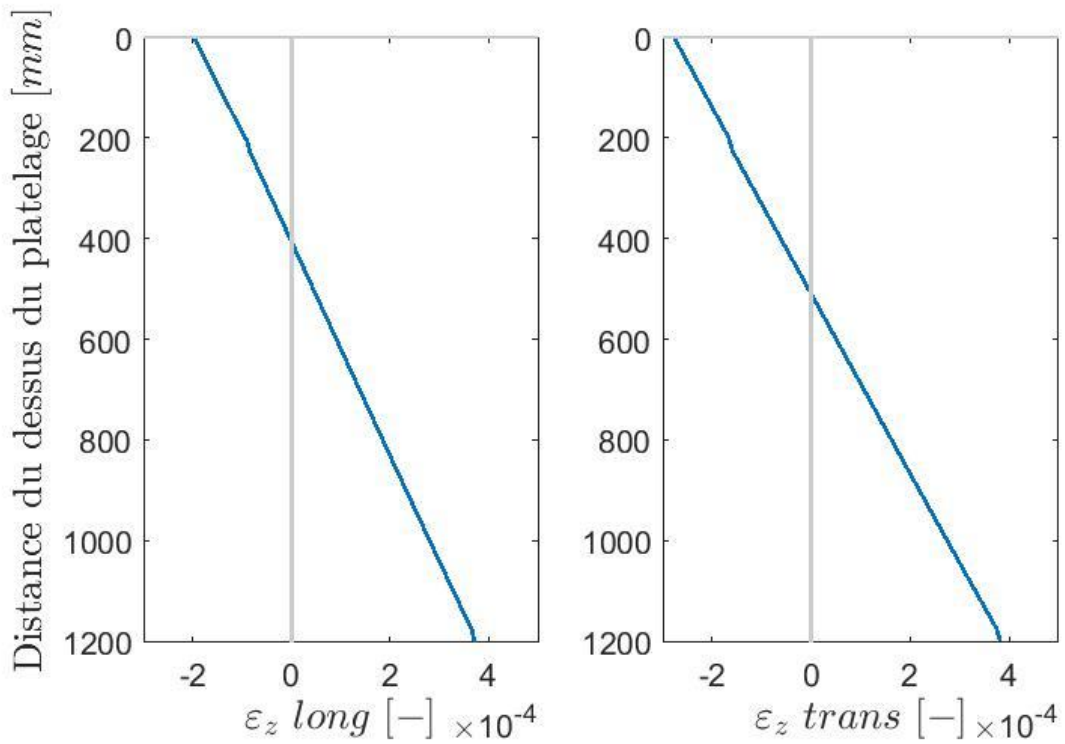


Figure G.8: Axes neutres pour les modèles 8

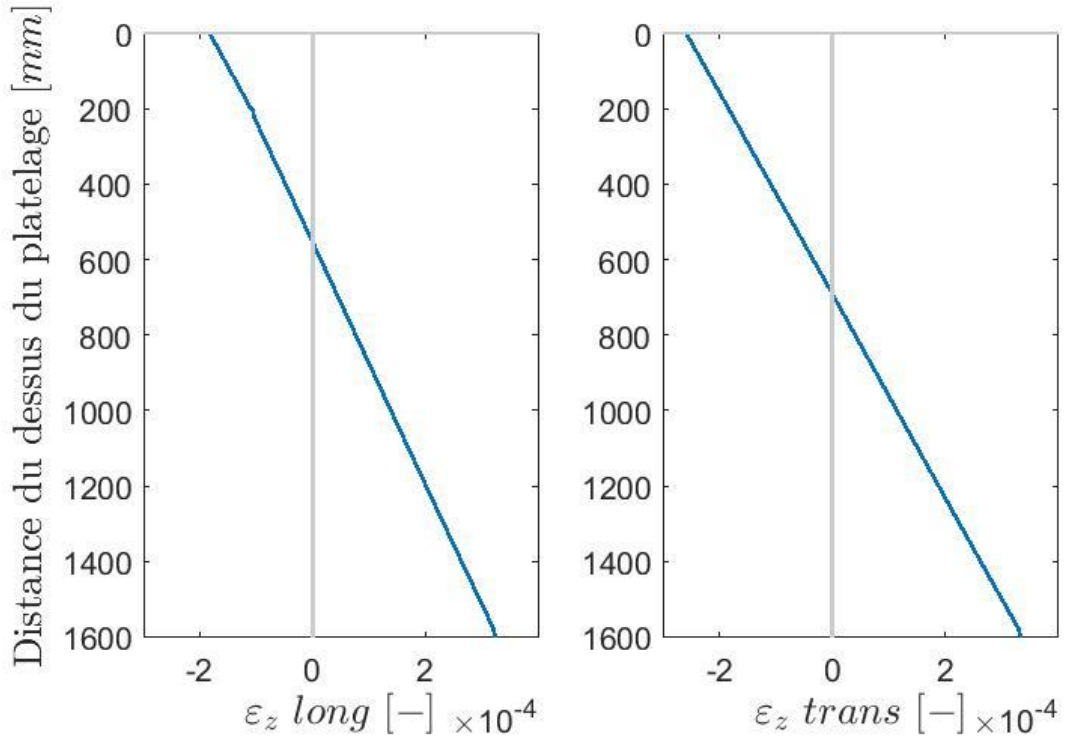


Figure G.9: Axes neutres pour les modèles 9

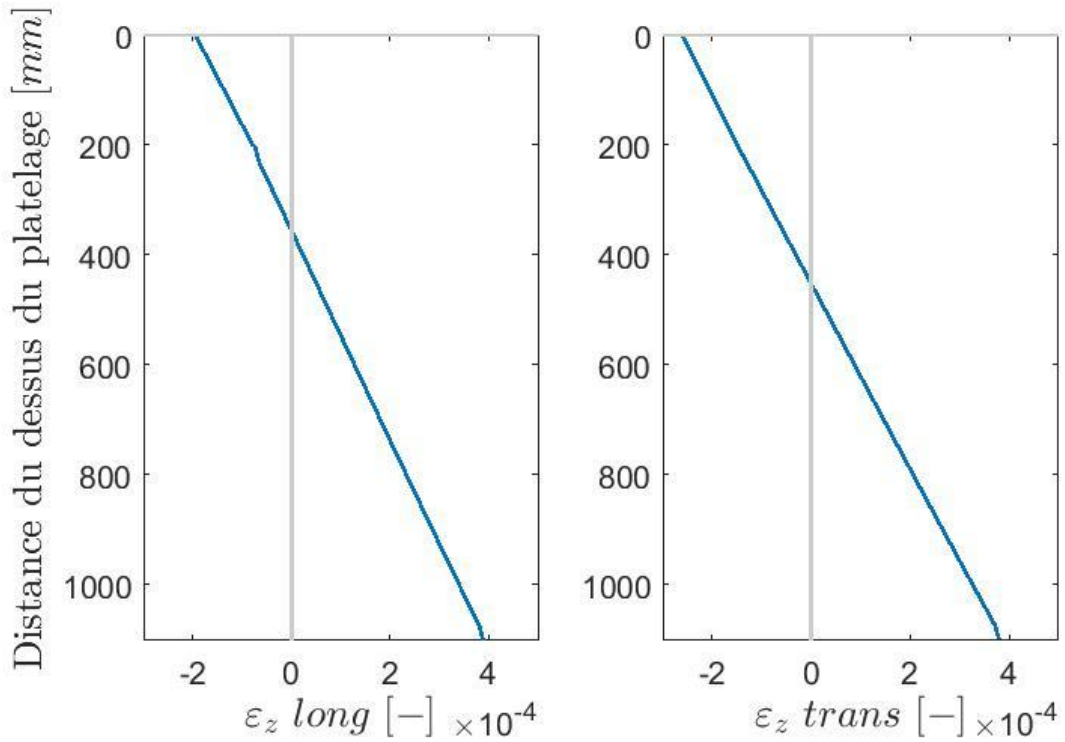


Figure G.10: Axes neutres pour les modèles 10



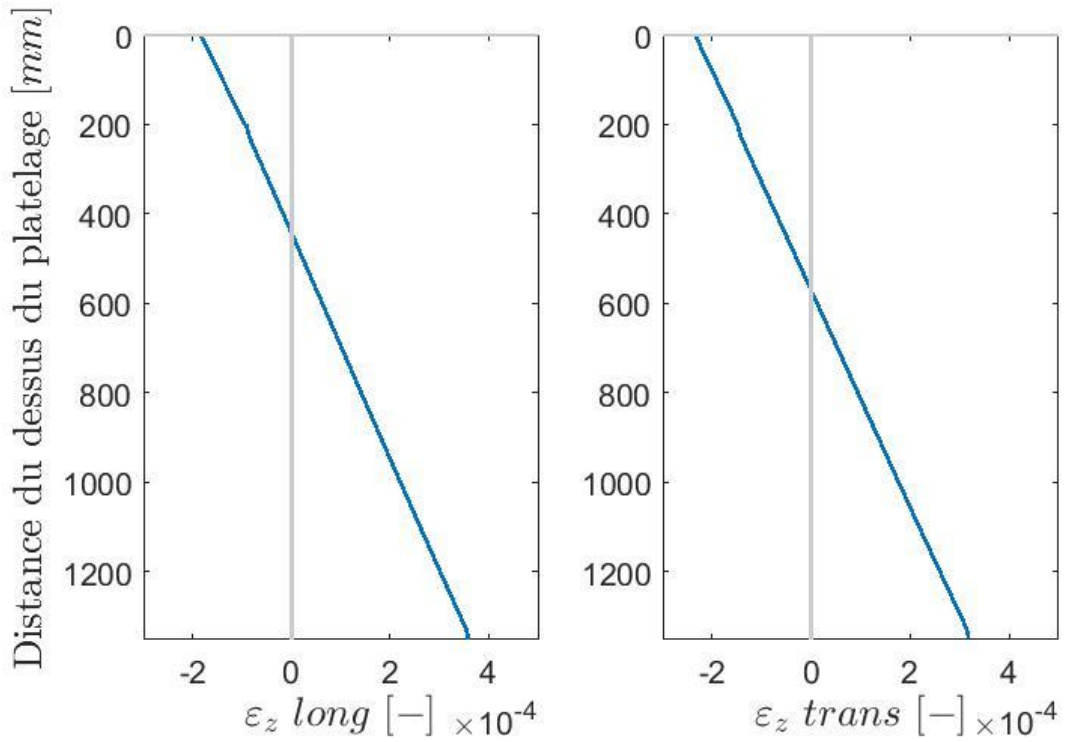


Figure G.11: Axes neutres pour les modèles 11

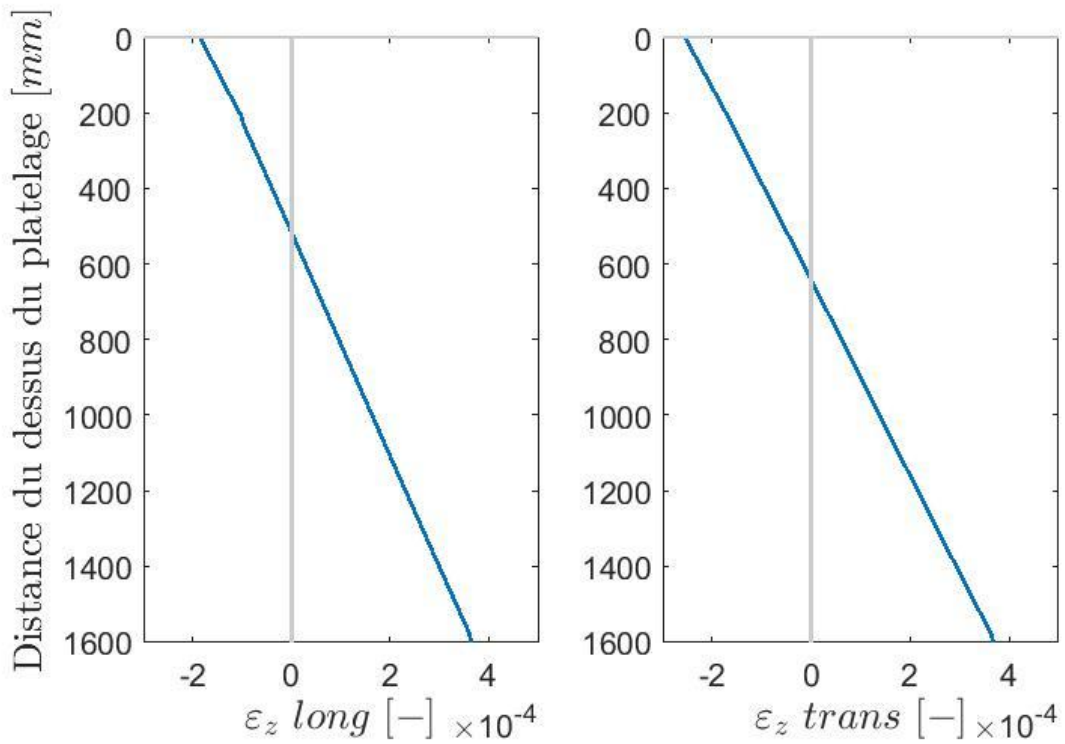


Figure G.12: Axes neutres pour les modèles 12

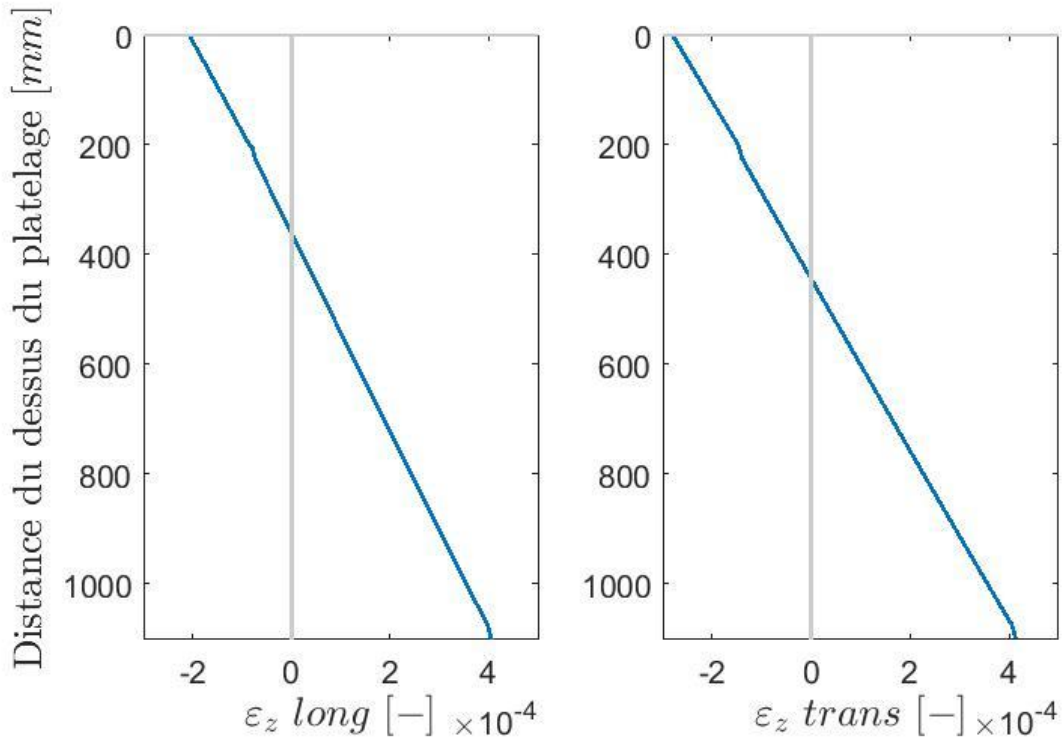


Figure G.13: Axes neutres pour les modèles 13

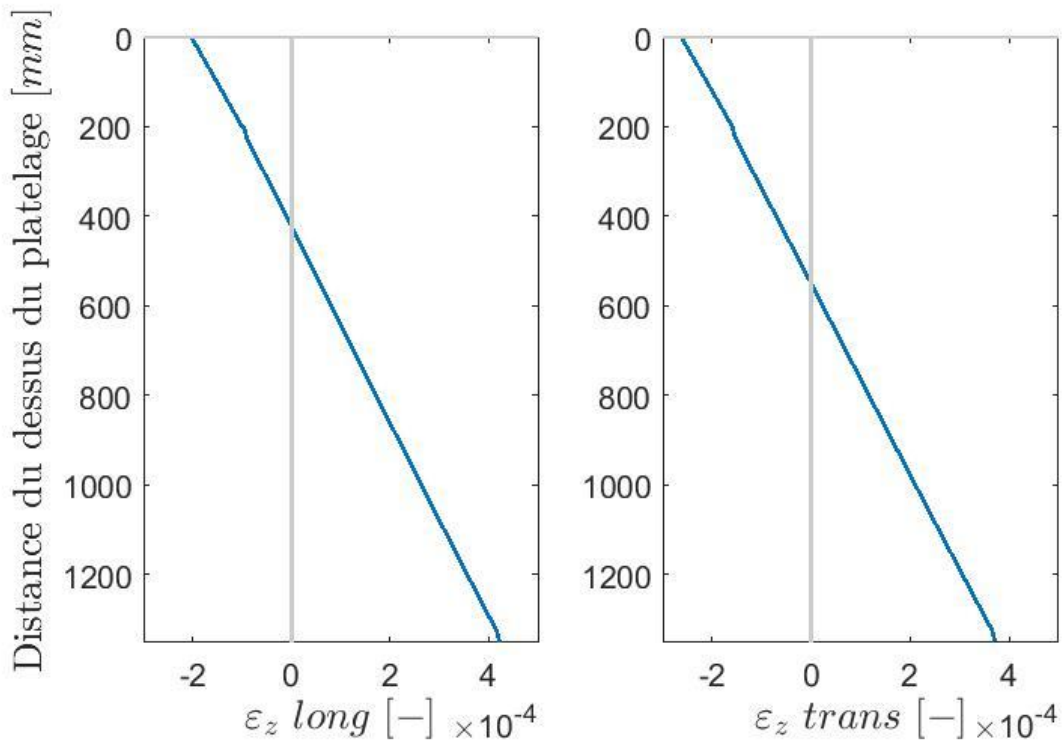


Figure G.14: Axes neutres pour les modèles 14

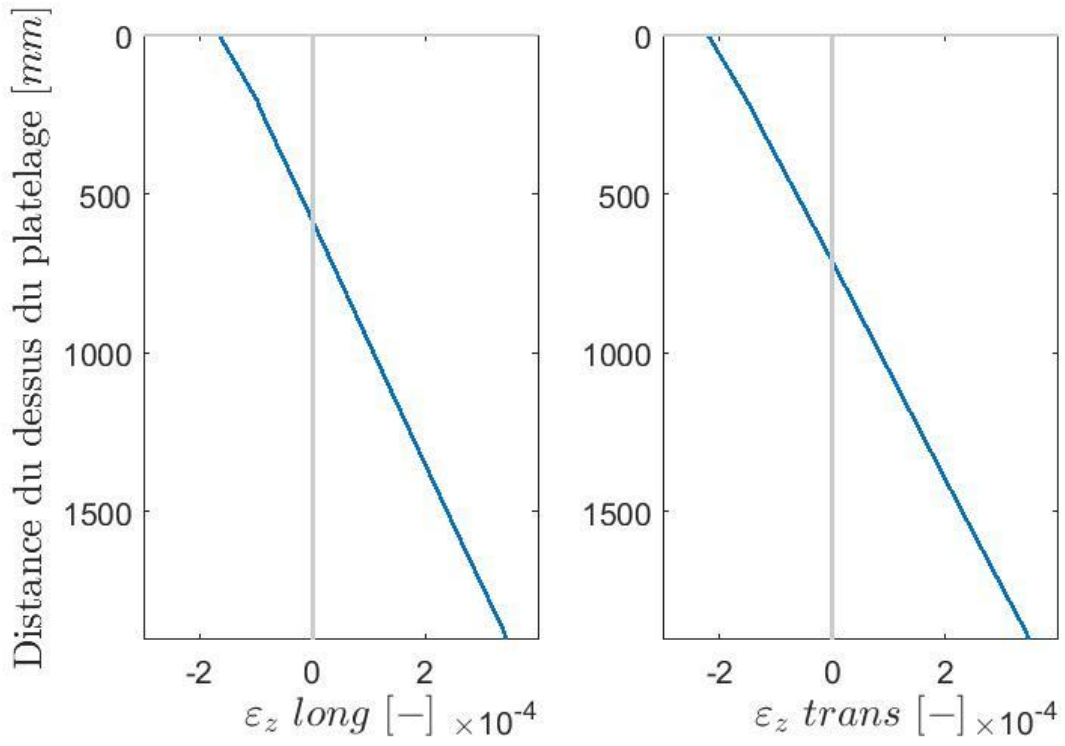


Figure G.15: Axes neutres pour les modèles 15

## Annexe H Distribution des contraintes sur l'épaisseur du platelage



Afin de vérifier la distribution sur l'épaisseur du platelage, les contraintes selon l'axe longitudinal  $z$  ont été extraites le long de l'axe vertical du platelage. L'emplacement longitudinal où les contraintes ont été extraites correspond à celui où les contraintes pour le calcul de l'aire effective ont été prises. L'essai a été effectué sur le modèle 1 avec les extrusions installées longitudinalement aux poutres. La capture d'écran en dessous du graphique montre les nœuds pour lesquels les contraintes sont extraites. Les variations de couleur représentent la répartition des contraintes selon l'axe  $z$  global.

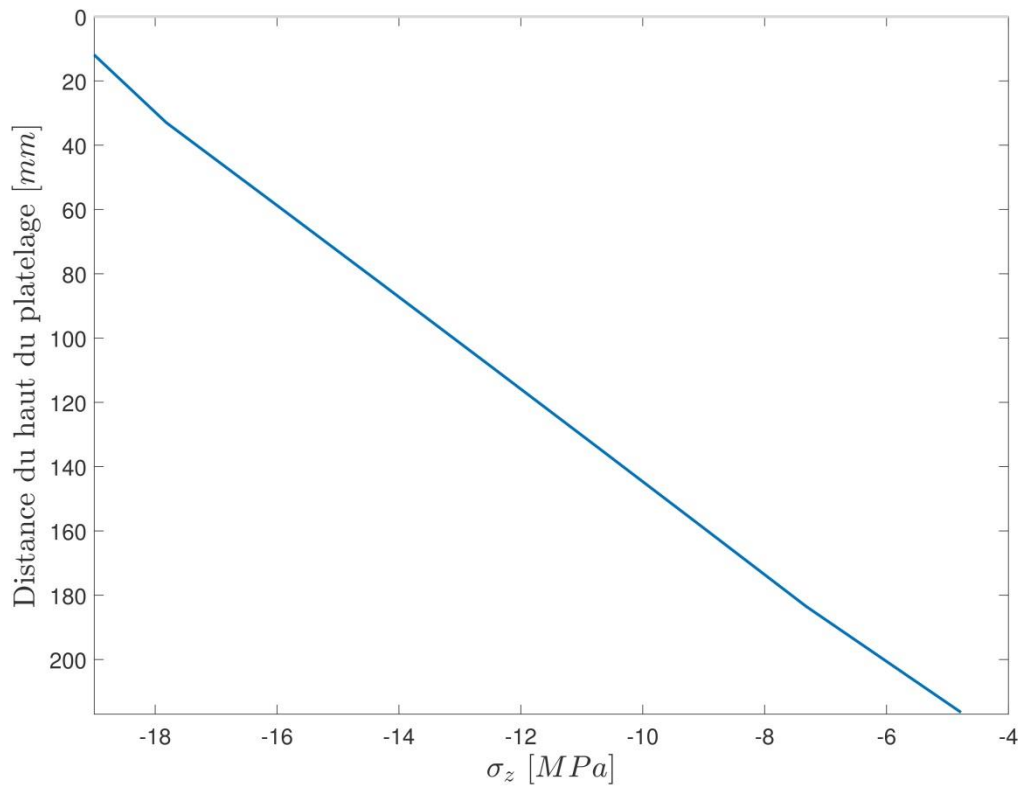
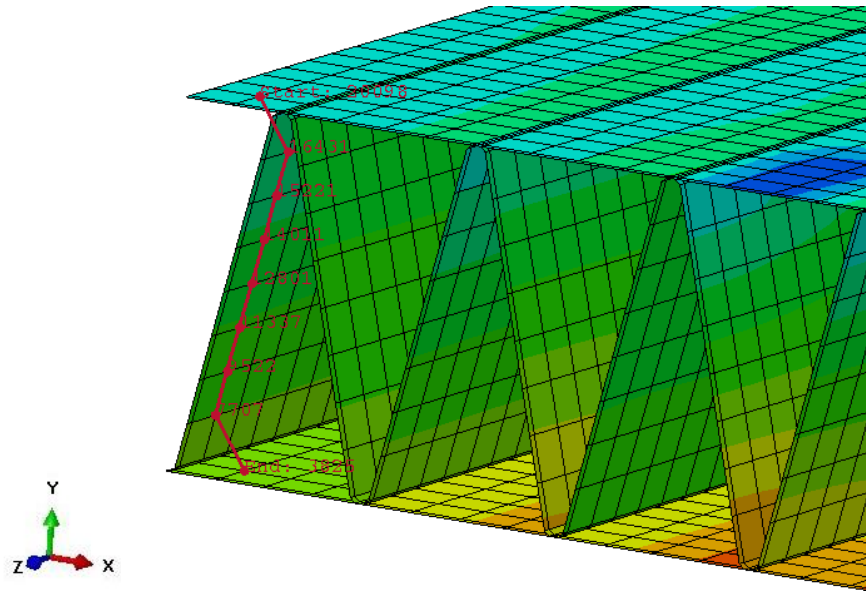


Figure H.1 : Répartition des contraintes longitudinales (axe  $z$ ) sur la hauteur totale du platelage avec le premier chemin de nœuds



*Figure H.2 : Illustration du premier chemin de nœuds utilisé*

Il est possible de constater que la distribution le long de l'axe vertical est linéaire, ce qui respecte l'hypothèse de calcul de distribution linéaire pour utiliser l'équation permettant de calculer l'aire effective du platelage (voir Équation 24 à la section 3.4). Toutefois, il est également possible de remarquer à l'aide de la capture d'écran que la variation des contraintes le long de l'axe vertical n'est pas semblable pour toutes les diagonales. Un nouveau chemin de nœuds a donc été fait dans une seconde diagonale.

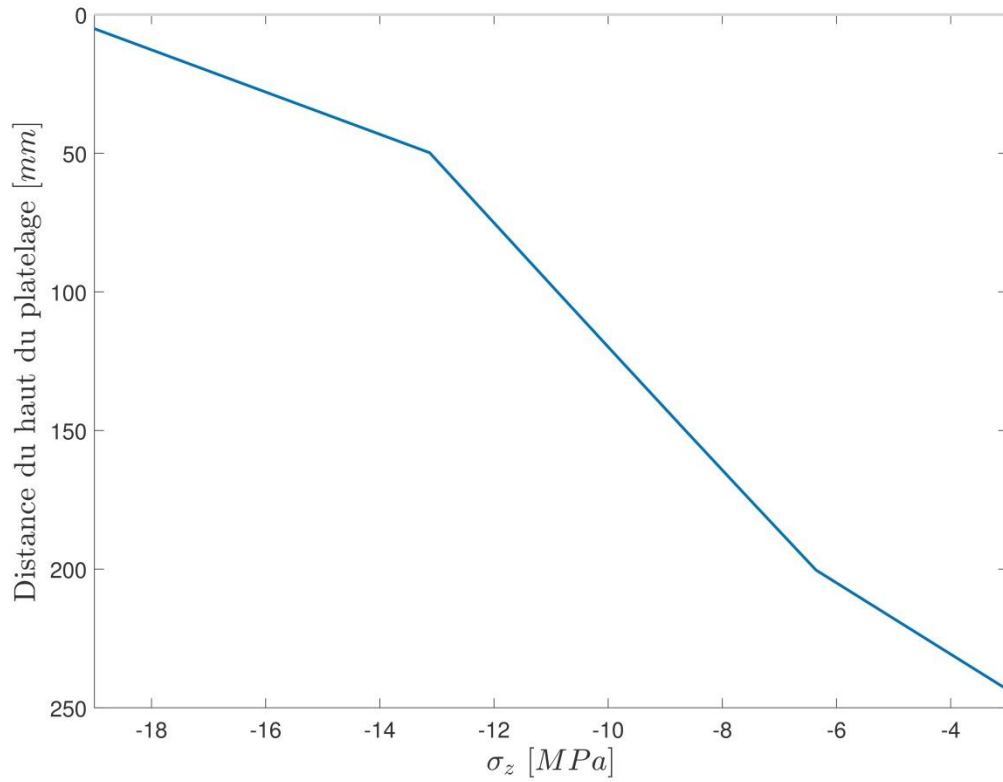


Figure H.3 : Répartition des contraintes longitudinales (axe z) sur la hauteur totale du platelage avec le second chemin de nœuds

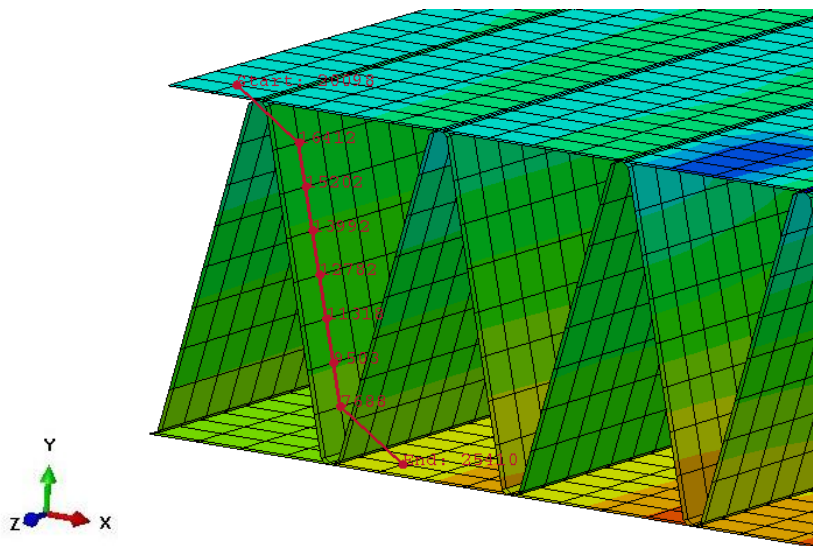


Figure H.4 : Illustration du second chemin de nœuds utilisé

La distribution linéaire ne semble donc pas être constante le long de la section transversale du platelage. L'utilisation de l'Équation 24 n'est donc pas tout à fait juste.