

JEAN-CHRISTIAN MÉTHOT

# **DÉVELOPPEMENT STRUCTURAL D'UNE REMORQUE ULTRALÉGÈRE EN ALUMINIUM**

Mémoire présenté  
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval  
dans le cadre du programme de Maîtrise en génie mécanique  
pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc.)

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE  
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE  
UNIVERSITÉ LAVAL  
QUÉBEC

2008

## Résumé

La réduction de masse des structures de remorques est un sujet d'actualité dans le domaine du transport. Ce mémoire traite du travail accompli lors de la conception d'une structure de remorque en aluminium ultralégère. Une revue de la conception de la remorque existante a été réalisée. Il en est ressorti que le plancher est complètement dissocié des deux poutres en I formant la structure principale. Une nouvelle structure comprenant une plate-forme structurale solidaire à une coque a été conçue. Pour arriver à ces fins, un long processus itératif incluant des analyses par éléments finis a permis d'élaborer et d'optimiser les extrusions à parois minces constituant la plate-forme. Pour ce qui est de la coque, elle a été désignée en fonction de résultats d'analyses par éléments finis. En plus, un modèle basé sur la théorie des poutres programmé sur Maple a servi à l'optimisation de la géométrie de celle-ci. Tous ces éléments innovateurs ont permis d'alléger la structure de façon importante. Enfin, des analyses à l'aide de la méthode des éléments finis ont été faites afin de comparer les performances du nouveau design aux performances de celui déjà existant.

## **Abstract**

Weight reduction is one of the main concerns in transportation industry. This study was performed with the objective to design an ultra light aluminum structure for a 53 foot trailer. A design review of an existing trailer was performed. It has showed that the floor did not contribute to the overall rigidity of the two I-beams forming the main structure. A new structure comprising a structural platform integrated to a hull was designed. A long iterative process including finite elements analysis has helped to develop and optimize thin-walled extrusions that will constitute the platform. As for the hull, it was also designed with the help of finite elements analysis. In addition, a model based on the theory of beams was used to optimize its geometry. The structure was lighten significantly by all these innovations. Finally, analyses using the finite element method have been performed to compare the performance of the new design against the existing one.

## **Avant-Propos**

L'aboutissement de ce travail n'aurait été possible sans le soutien de nombreuses personnes.

J'aimerais d'abord remercier mon directeur de recherche, M. Michel Guillot, professeur titulaire au département de génie mécanique de l'université Laval, pour son encadrement et pour m'avoir fait confiance tout au long de ce projet.

Je tiens aussi à remercier vivement, M. Julien Nadeau, président et directeur général de la compagnie Alutrec, pour son soutien financier et sa collaboration exceptionnelle sans lesquels je n'aurais pu terminer ce travail.

Je voudrais également exprimer ma profonde reconnaissance à mes parents pour leurs précieux conseils et leur soutien de tous les instants. Ils m'ont permis de devenir ce que je suis aujourd'hui.

Enfin, je ne peux terminer sans remercier ma conjointe, Véronic, pour sa présence, sa patience et son support dans l'accomplissement de ce travail.



# Table des matières

|   |      |
|---|------|
| Résumé.....   | ii   |
| Abstract.....   | iii  |
| Avant-Propos .....  | iv   |
| Table des matières .....  | v    |
| Liste des tableaux.....   | viii |
| Liste des figures .....   | ix   |
| Chapitre 1 Introduction.....  | 1    |
| 1.1 Mise en situation.....  | 1    |
| 1.2 Problématique .....   | 1    |
| 1.3 Objectif et méthodologie .....  | 2    |
| Chapitre 2 Notion de résistance de structure .....  | 4    |
| 2.1 Mise en situation et problématique.....   | 4    |
| 2.2 Théorie des poutres .....   | 4    |
| 2.2.1 Poutre simplement supportée avec charge concentrée ([1]) .....                          | 4    |
| 2.2.2 Poutre simplement supportée avec charge répartie ([1]) .....                            | 7    |
| 2.2.3 Contrainte dans une poutre ([3]).....   | 9    |
| 2.3 Modélisation de structures par élément finis .....  | 13   |
| 2.3.1 Généralité ([2], [11]).....   | 14   |
| 2.3.2 Les étapes et particularités de la modélisation par éléments finis .....                | 14   |
| 2.5 Conclusion .....  | 20   |
| Chapitre 3 Revue de conception de la remorque Alutrec et évaluation de ses performances ..... | 21   |
| 3.1 Mise en situation et problématique.....   | 21   |
| 3.2 Objectifs et méthodologie .....   | 22   |
| 3.2.1 Objectif .....  | 22   |
| 3.2.2 Méthodologie .....  | 22   |
| 3.3 Simulation de la structure longitudinale .....  | 22   |
| 3.3.1 Renseignements sur les simulations .....  | 23   |
| 3.3.2 Premier cas de chargement .....   | 23   |

|   |    |
|---|----|
| 3.3.3 Résultats de la simulation du premier cas de chargement ..... | 25 |
| 3.3.4 Second cas de chargement .....                                | 26 |
| 3.3.5 Résultat de la simulation du second cas de chargement .....   | 27 |
| 3.4 Simulation de la structure transversale .....                   | 28 |
| 3.4.1 Renseignements sur les simulations .....                      | 29 |
| 3.4.2 Simulation avec une charge concentrée.....                    | 30 |
| 3.4.3 Résultat de la simulation du premier cas de chargement.....   | 30 |
| 3.4.4 Simulation avec une charge répartie .....                     | 32 |
| 3.4.5 Résultat de la simulation du second cas de chargement .....   | 32 |
| 3.5 Conclusion .....  | 34 |
| Chapitre 4 Conception de la plate-forme .....                       | 35 |
| 4.1 Mise en situation et problématique.....                         | 35 |
| 4.2 Objectifs et méthodologie .....                                 | 35 |
| 4.2.1 Objectifs.....  | 35 |
| 4.2.2 Méthodologie .....  | 35 |
| 4.3 Cahier des charges pour la plate-forme .....                    | 36 |
| 4.4 Les critères d'évaluation.....                                  | 37 |
| 4.5 Gamme de solutions.....   | 38 |
| 4.5.1 Plate-forme en mousse métallique [4] .....                    | 38 |
| 4.5.2 Plate-forme en nids d'abeilles. [7].....                      | 39 |
| 4.5.3 Plate-forme composée d'extrusions d'aluminium .....           | 40 |
| 4.6 Solution retenue .....  | 41 |
| 4.6.1 Raffinement de la solution.....                               | 42 |
| 4.6.2 Extrusions longitudinales.....                                | 43 |
| 4.6.3 Extrusions transversales.....                                 | 45 |
| 4.7 Conclusion .....  | 49 |
| Chapitre 5 Conception de la coque .....                             | 51 |
| 5.1 Mise en situation et problématique.....                         | 51 |
| 5.2 Objectifs et méthodologie.....                                  | 51 |
| 5.2.1 Objectifs.....  | 51 |

|   |    |
|---|----|
| 5.2.2 Méthodologie .....  | 52 |
| 5.3 Cahier des charges pour la plate-forme .....  | 52 |
| 5.4 Les critères d'évaluation .....   | 53 |
| 5.5 Gamme de solutions.....   | 53 |
| 5.5.1 Coque monopiece formée .....  | 54 |
| 5.5.2 Coque composée d'extrusions assemblées .....  | 54 |
| 5.6 Solution retenue .....  | 55 |
| 5.6.1 Raffinement de la solution retenue .....  | 55 |
| 5.7 Évaluation des performances de la structure .....   | 63 |
| 5.7.1 Charge concentrée.....  | 63 |
| 5.7.2 Charge répartie.....  | 65 |
| 5.7.3 Comparaison de la structure de la remorque existante à celle de la nouvelle remorque .....                                      | 66 |
| 5.8 Conclusion .....  | 68 |
| Chapitre 6 Conclusion .....   | 69 |
| Bibliographie .....   | 71 |
| Annexe A Exemple de calcul de cisaillement dans une poutre .....  | 72 |
| Annexe B Répartition de la masse.....   | 75 |
| Annexe C Programme de traçage de l'effort tranchant et du moment fléchissant pour le problème de la poutre simplement supportée ..... | 76 |
| Annexe D Calcul du poids de la plate-forme faite de mousse d'aluminium. ....  | 78 |
| Annexe E Charte d'extrudabilité .....   | 79 |
| Annexe F Programme de calcul de contraintes dans la structure .....   | 80 |



## Liste des tableaux

|  |    |
|--|----|
| Tableau 3.1 : Résultats d'analyse de la structure avec charge concentrée .....           | 26 |
| Tableau 3.2 : Résultats d'analyse de la structure avec la charge répartie.....           | 28 |
| Tableau 3.3: Résultats de l'analyse du plancher avec la charge concentrée.....           | 31 |
| Tableau 3.4 : Résultats de l'analyse du plancher avec la charge répartie.....            | 33 |
| Tableau 4.1 : Cahier des charges de la plate-forme .....                                 | 37 |
| Tableau 4.2 : Critère d'évaluation de la plate-forme .....                               | 38 |
| Tableau 4.3 : Résultat de l'évaluation de la plate-forme de mousse .....                 | 39 |
| Tableau 4.4 : Résultat de l'évaluation de la plate-forme en nids d'abeilles .....        | 40 |
| Tableau 4.5 : Résultat de l'évaluation de la plate-forme en extrusions d'aluminium ..... | 41 |
| Tableau 4.6 : Résultats de l'analyse de la plate-forme avec la charge concentrée .....   | 46 |
| Tableau 4.7 : Résultats de l'analyse comparative avec la charge concentrée.....          | 47 |
| Tableau 4.8 : Résultats de l'analyse de la plate-forme avec la charge répartie .....     | 48 |
| Tableau 4.9 : Résultats de l'analyse comparative avec la charge répartie.....            | 49 |
| Tableau 5.1 : Cahier des charges de la coque .....                                       | 52 |
| Tableau 5.2 : Critère d'évaluation des concepts de coque.....                            | 53 |
| Tableau 5.3 : Résultat de l'évaluation de la coque monopiece.....                        | 54 |
| Tableau 5.4 : Tableau de l'évaluation du concept de la coque assemblée.....              | 55 |
| Tableau 5.5 : Évolution du renforcement de la coque .....                                | 63 |
| Tableau 5.6 : Résultats d'analyse de la structure sous la charge concentrée.....         | 64 |
| Tableau 5.7 : Résultats d'analyse de la structure sous la charge répartie .....          | 66 |
| Tableau 5.9 : Résultats de l'analyse comparative avec la charge répartie.....            | 67 |

## Liste des figures

|   |    |
|---|----|
| Figure 1.1 : Nouvelle structure .....   | 2  |
| Figure 2.1 : Poutre simplement supportée .....  | 5  |
| Figure 2.2 : DCL portion gauche de la poutre .....  | 5  |
| Figure 2.3 : a) Effort tranchant b) moment fléchissant.....   | 6  |
| Figure 2.4 : Poutre simplement supportée avec charge répartie .....   | 7  |
| Figure 2.5 a) Effort tranchant b) Moment fléchissant .....  | 8  |
| Figure 2.6 : Centroïde de section .....   | 9  |
| Figure 2.7 : Inertie d'une section .....  | 10 |
| Figure 2.8 : Distribution de la contrainte normale dans la section de poutre .....  | 11 |
| Figure 2.9 : a) Poutre simplement supportée et ses diagrammes d'effort b) Analyse du cisaillement transversal sur un élément de la poutre ..... | 12 |
| Figure 2.9 a) Géométrie solide 3D b) Géométrie surfacique 2D.....   | 15 |
| Figure 2.10 : Degrés de liberté d'un corps libre .....  | 16 |
| Figure 2.11 a) Poutre encastree b) Poutre simplement supportée.....   | 17 |
| Figure 2.12 : Poutre encastree avec condition limite de symétrie .....  | 17 |
| Figure 3.1 : Remorque Alutrec existante .....   | 21 |
| Figure 3.2: a) Charge de 50 500 livres concentrée b) Diagramme de l'effort tranchant c) Diagramme du moment fléchissant .....                   | 24 |
| Figure 3.3 : Condition d'appui et maillage de la poutre en I.....   | 25 |
| Figure 3.4 : Distribution des contraintes dans la structure sous charge concentrée .....  | 26 |
| Figure 3.5 : a) Charge de 50 500 livres répartie sur la structure b) Diagramme de l'effort tranchant c) Diagramme du moment fléchissant .....   | 27 |
| Figure 3.6: Distribution des contraintes dans la structure sous charge répartie .....   | 28 |
| Figure 3.7 : Condition d'appui et maillage de la plate-forme existante .....  | 29 |
| Figure 3.8 : Plate-forme de la remorque existante avec la charge concentrée.....  | 30 |
| Figure 3.9 : Zones critiques de la plate-forme .....  | 31 |
| Figure 3.10 : Distribution des contraintes dans la plate-forme.....   | 31 |
| Figure 3.11 : Plate-forme de la remorque existante avec la charge répartie.....   | 32 |

|   |    |
|---|----|
| Figure 3.12 : Distribution de la contrainte dans la plate-forme .....                   | 33 |
| Figure 4.1 : Épaisseur de la tête de la remorque.....                                   | 37 |
| Figure 4.2 : Panneau de mousse métallique [6].....                                      | 38 |
| Figure 4.3 : Panneau fait de nids d'abeilles [7] .....                                  | 40 |
| Figure 4.4 : Profilés d'extrusion d'aluminium [8].....                                  | 41 |
| Figure 4.5 : Disposition des extrusions de la plate-forme .....                         | 43 |
| Figure 4.6 : Profil de l'extrusion longitudinale.....                                   | 43 |
| Figure 4.7 a) Déplacement de la plate-forme en I : max= 0,223'' .....                   | 44 |
| b) Déplacement de la plate-forme en X : max= 0,127'' .....                              | 44 |
| Figure 4.8 : Profil de l'extrusion transversale.....                                    | 45 |
| Figure 4.9 : Condition d'appui et maillage de la nouvelle plate-forme .....             | 46 |
| Figure 4.10 : Nouvelle plate-forme avec la charge concentrée .....                      | 46 |
| Figure 4.11 : Distribution des contraintes dans la nouvelle plate-forme .....           | 47 |
| Figure 4.12 : Nouvelle plate-forme avec la charge répartie.....                         | 48 |
| Figure 4.13 : Distribution des contraintes dans la plate-forme .....                    | 48 |
| Figure 5.1 : Épaisseur de l'arrière de la remorque.....                                 | 53 |
| Figure 5.2 : Enveloppe dimensionnelle .....   | 55 |
| Figure 5.3 a) Contrainte dans la coque .....  | 57 |
| b) Contrainte dans la coque avec des courbures maximisées .....                         | 57 |
| Figure 5.4 : Inertie de section en fonction de la position pour les profils a et b..... | 57 |
| Figure 5.5 : Particularité du maillage de la structure .....                            | 58 |
| Figure 5.6 : Condition d'appui et maillage de la structure .....                        | 59 |
| Figure 5.7 : Géométrie surfacique (2D) de la remorque.....                              | 59 |
| Figure 5.8 : Conditions pour développer le renforcement.....                            | 60 |
| Figure 5.9 : Résultat d'analyse de la coque sans renfort .....                          | 60 |
| Figure 5.10 : Résultats d'analyse de la coque renforcée des supports verticaux.....     | 61 |
| Figure 5.11 : Résultats d'analyse de la coque renforcée des supports verticaux.....     | 62 |
| en plus des traverses .....   | 62 |
| Figure 5.12 : Charge concentrée sur la structure .....                                  | 63 |
| Figure 5.13 : Distribution de la contrainte sous la charge concentrée .....             | 64 |



|   |    |
|---|----|
| Figure 5.14 : Charge répartie sur la structure .....                      | 65 |
| Figure 5.15 : Distribution de la contrainte sous la charge répartie ..... | 66 |

# Chapitre 1

## Introduction

### ***1.1 Mise en situation***

Ce projet de maîtrise a été réalisé dans un cadre de partenariat entre l'université Laval et la compagnie Alutrec. La compagnie Alutrec est un manufacturier de remorques entièrement faites d'aluminium. On y fabrique plusieurs types de remorques, en particulier les remorques planes qui font l'objet du sujet de cette maîtrise. De façon à demeurer compétitive, la compagnie s'efforce d'offrir à ses clients des produits de qualité supérieure. Dans un processus d'amélioration continue, Alutrec cherche des méthodes pour alléger ses remorques. La légèreté d'une remorque offre un avantage concurrentiel considérable dans cette industrie.

### ***1.2 Problématique***

Les remorques planes disponibles sur le marché ont toutes le même type de design. Elles comportent une structure principale constituée de deux poutres en I. Des traverses y sont superposées de façon à accueillir le plancher de la remorque. Les gains de masse provenant d'optimisation d'une telle structure sont négligeables. Pour vraiment alléger ces remorques, une innovation majeure était nécessaire. La clé de cette innovation repose sur l'utilisation d'une plate-forme intégrée à une coque afin de former la structure principale (figure 1.1). C'est pour concevoir cette structure qu'Alutrec a fait appel aux ressources universitaires.

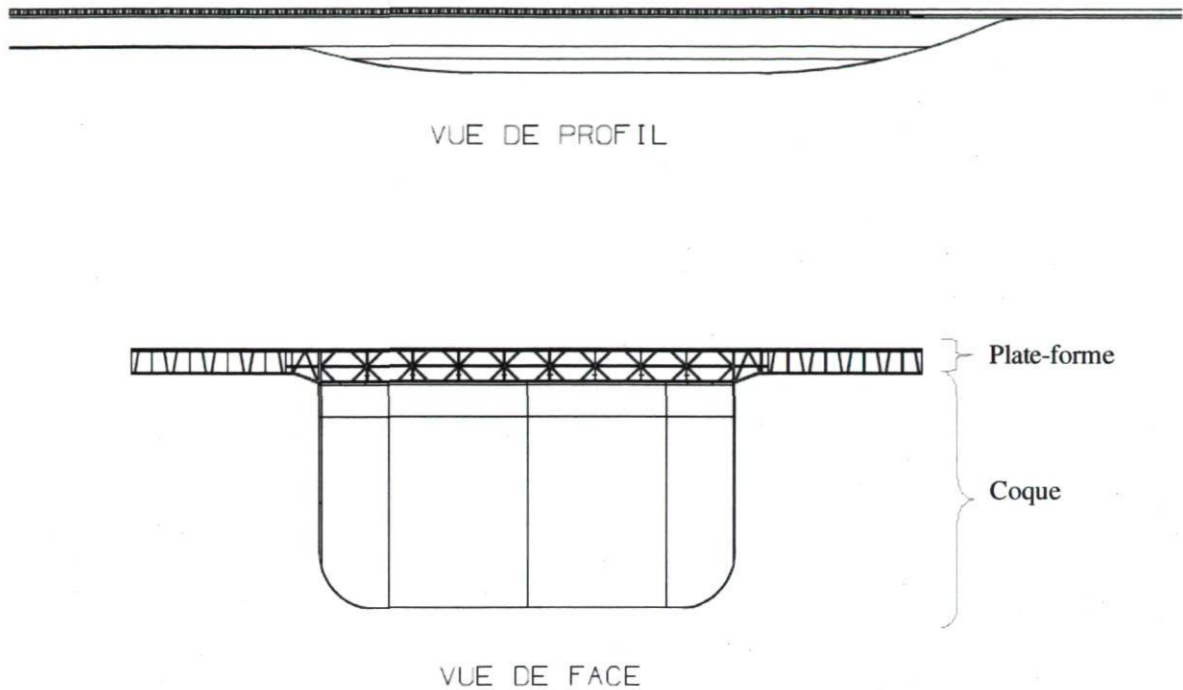


Figure 1.1 : Nouvelle structure

### **1.3 Objectif et méthodologie**

Le principal objectif de ce projet de maîtrise est de concevoir une structure de remorque constituée d'une coque et d'un plancher structural tout en réduisant la masse de 1500 livres. Pour atteindre cet objectif, le premier chapitre introduit le projet.

Par la suite, le chapitre deux survole les notions de résistance de structure. Les notions de la théorie des poutres ainsi qu'une entrée en matière sur la méthode des éléments finis sont présentés.

Le chapitre trois fait la revue de la conception d'une remorque construite par Alutrec et l'évaluation de ses performances. La structure de cette remorque est analysée en deux étapes. Dans un premier temps, on évalue la résistance et la rigidité de la plate-forme, ensuite, celles de la structure principale.

Le chapitre quatre introduit le design de la plate-forme structurale. Des critères d'évaluation comme la masse, la rigidité et la faisabilité ont permis de choisir la solution la plus appropriée. Le nouveau design est aussi comparé à celui de la remorque déjà existante.

Le chapitre cinq traite de la conception de la coque. Le processus d'élaboration de la coque est présenté en entier. On explique, entre autres, comment le profil de la coque a été optimisé à l'aide d'un programme confectionné à cette fin. Il est aussi question des résultats de l'analyse comparative entre l'ancienne et la nouvelle structure.

Enfin, le dernier chapitre est la rétrospective des travaux réalisés ainsi qu'un bref aperçu des travaux nécessaires à l'accomplissement du projet.

# **Chapitre 2**

## **Notion de résistance de structure**

### ***2.1 Mise en situation et problématique***

Il est important de comprendre quelques notions de base en résistance des matériaux avant d'entrer dans le vif du projet. Ce chapitre a pour but de rafraîchir la mémoire du lecteur au sujet de notions qui ont été utiles pour l'accomplissement de ce travail. Les notions vues peuvent sembler banales mais la bonne compréhension de celles-ci a permis de résoudre des problèmes survenus au cours du projet. En premier lieu, il sera question de la théorie des poutres. Suivra un survol des notions de base dans la modélisation de structures par éléments finis.

### ***2.2 Théorie des poutres***

Les notions de la théorie des poutres ont été utiles pour l'analyse de la remorque. En effet, on peut considérer une remorque plane comme une poutre entre appuis simples. L'utilisation des équations de ce chapitre a, entre autres, été nécessaire dans l'élaboration du modèle analytique afin d'optimiser la géométrie de la coque.

#### **2.2.1 Poutre simplement supportée avec charge concentrée ([1])**

Commençons par le problème illustré à la figure 2.1, soit une poutre à section constante maintenue aux extrémités par deux appuis.

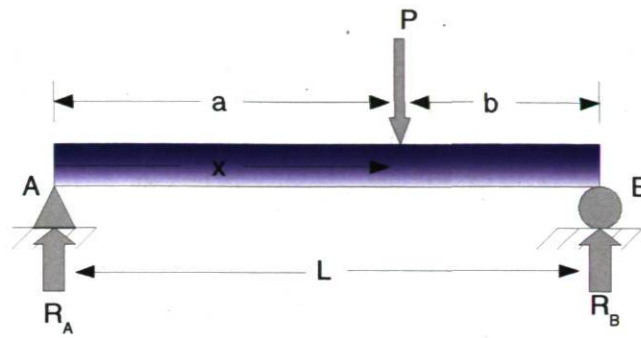


Figure 2.1 : Poutre simplement supportée

Il faut noter les caractéristiques aux appuis : à gauche, en plus d'être supportée, la poutre est bloquée dans la direction  $x$ , tandis que l'appui de droite ne fait que supporter la poutre, le mouvement dans la direction  $x$  reste libre. Pour calculer les réactions  $R_A$  et  $R_B$  aux appuis, il suffit de faire la somme des moments à partir d'une extrémité de la poutre et l'on obtient,

$$R_A = \frac{Pb}{L}, R_B = \frac{Pa}{L} \quad (2.1, 2.2)$$

Par la suite nous coupons la poutre à un endroit «  $x$  » à gauche de la force  $P$ . Avec le DCL à la figure 2.2 nous voyons qu'il y a un effort tranchant  $V$  ainsi qu'un moment fléchissant  $M$ .

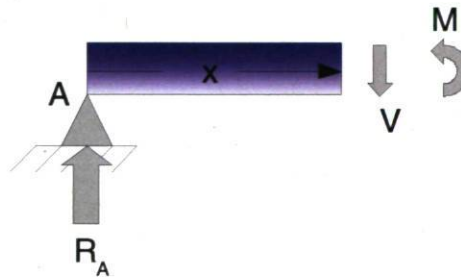


Figure 2.2 : DCL portion gauche de la poutre

Les équations d'équilibre découlant de ce DCL sont :

$$V = R_A = \frac{Pb}{L}, (0 < x < a) \quad (2.3)$$

$$M = R_A x = \frac{Pb}{L} x, (0 < x < a) \quad (2.4)$$



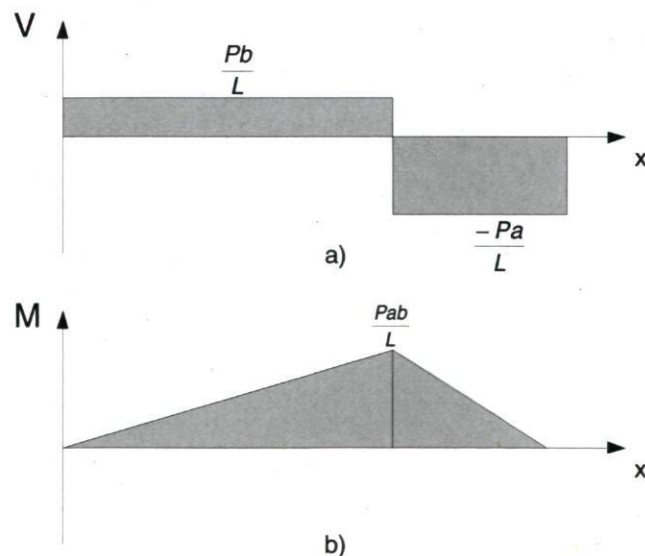
Ces expressions ne sont valides que pour la portion de la poutre située du côté gauche de la force P. Pour ce qui est de la portion de droite, il suffit de répéter les mêmes opérations mais cette fois, nous coupons la poutre à droite de la force P et les équations d'équilibre sont :

$$V = R_A - P = \frac{Pb}{L} - P = -\frac{Pa}{L}, (a < x < L) \quad (2.5)$$

$$M = R_A x - P(x - a) = \frac{Pb}{L} x - P(x - a) = \frac{Pa}{L}(L - x), (a < x < L) \quad (2.6)$$

Le traçage sur un diagramme (figure 2.3) facilite la compréhension et la visualisation de ces équations d'équilibre. Donc sur la portion de gauche l'effort tranchant est constant et est égal à la réaction à l'appui  $R_A$ . Tandis que sur la droite, l'effort tranchant est toujours constant et est égal à la réaction à l'appui  $R_B$  mais il est négatif. De son côté, le moment fléchissant varie linéairement selon la position comme le démontre les équations 2.4 et 2.6. Ces deux équations nous amènent à l'équation 2.7 pour trouver la valeur maximale du moment fléchissant.

$$M_{\max} = \frac{Pab}{L}, (x = a) \quad (2.7)$$



Il est important également de mentionner que le moment fléchissant est nul aux extrémités de la poutre. Toutes ces notions seront des éléments essentiels lors de la conception de la remorque.

### 2.2.2 Poutre simplement supportée avec charge répartie ([1])

Voyons maintenant un autre cas important de la théorie des poutres. La figure 2.4 illustre une poutre à section constante simplement supportée à ses extrémités et subissant une charge répartie «  $q$  ».

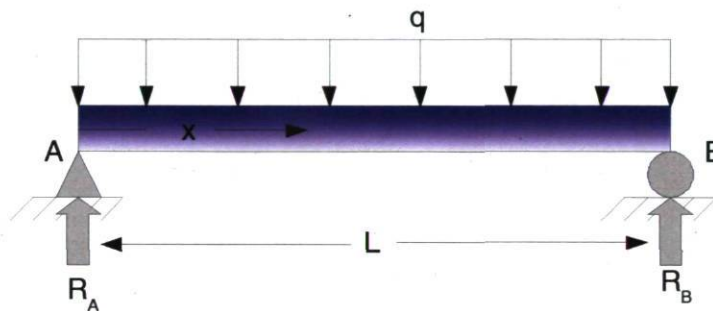


Figure 2.4 : Poutre simplement supportée avec charge répartie

Les conditions d'appui sont les mêmes que celles du problème précédent. Parce que le problème est symétrique, il est évident que les réactions de ces appuis  $R_A$  et  $R_B$  sont identiques et égales à

$$R_A = R_B = \frac{qL}{2} \quad (2.8)$$

L'effort tranchant et le moment fléchissant à une distance «  $x$  » devient

$$V = R_A - qx = \frac{qL}{2} - qx \quad (2.9)$$

De son côté, le moment fléchissant est

$$M = R_A x - qx \left( \frac{x}{2} \right) = \frac{qLx}{2} - \frac{qx^2}{2} \quad (2.10)$$

Pour bien visualiser ces chargements, l'effort tranchant, soit l'équation 2.9, est représenté à la figure 2.5 a, tandis que le moment fléchissant est représenté à la figure 2.5 b. Avec la charge « q » répartie de façon constante, la progression du moment fléchissant est parabolique avec un maximum situé au centre et de valeur

$$M_{\max} = \frac{qL^2}{8} \quad (2.11)$$

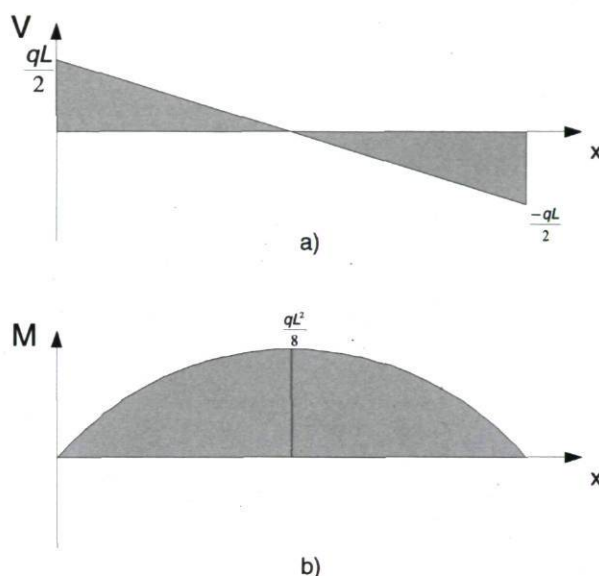


Figure 2.5 a) Effort tranchant b) Moment fléchissant

Contrairement au problème précédent, ces équations sont valides sur toute la longueur de la poutre. Dans le cas précédent, la charge étant concentrée, l'effort tranchant ainsi que le moment fléchissant ne sont pas continus. La discontinuité se retrouve à l'endroit où la charge est appliquée. Deux équations sont nécessaires pour représenter chacun des efforts. Soit une équation pour la portion de droite et une autre pour la portion de gauche.

### 2.2.3 Contrainte dans une poutre ([3])

Après avoir étudié les cas de chargements, il faut maintenant savoir calculer les contraintes induites par ces charges. Encore une fois, cette section ne présente pas une étude en profondeur mais plutôt un léger survol qui devrait faciliter la compréhension du travail exécuté plus tard.

Pour commencer, définissons quelques termes mécaniques relatifs à une poutre. On appelle la « fibre neutre » la matière d'une poutre qui ne subit pas d'effort normal lorsque soumise à un moment de flexion pur. Pour une poutre constituée d'un matériau homogène, la fibre neutre se situe au centroïde « C » de la section. À l'opposé, on appelle « fibre extrême » la matière la plus éloignée de la « fibre neutre ». Quant à l'inertie d'une section elle constitue la valeur de la propriété qui offre la résistance de la poutre à la flexion. Prenons comme exemple une poutre ayant la section présentée à la Figure 2.6.

Il faudrait commencer par calculer la position du centroïde de la section. Le centroïde est le centre géométrique de la section et est utile pour calculer l'inertie de la section. Donc pour calculer cette dite position, il s'agit d'utiliser les équations (2.12) et (2.13).

$$\bar{x} = \frac{\int_A x dA}{\int_A dA}, \quad \bar{y} = \frac{\int_A y dA}{\int_A dA} \quad (2.12) \quad (2.13)$$

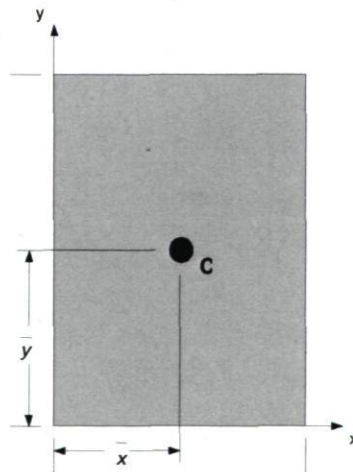


Figure 2.6 : Centroïde de section

L'inertie d'une section se calcule à l'aide de l'équation 2.14.

$$I_x = \int_A y^2 dA \quad (2.14)$$

En intégrant de  $-h/2$  à  $h/2$  pour la section de la figure 2.7, l'inertie devient (voir l'équation 2.15).

$$I_x = \int_A y^2 dA = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} y^2 b dy = \frac{bh^3}{12} \quad (2.15)$$

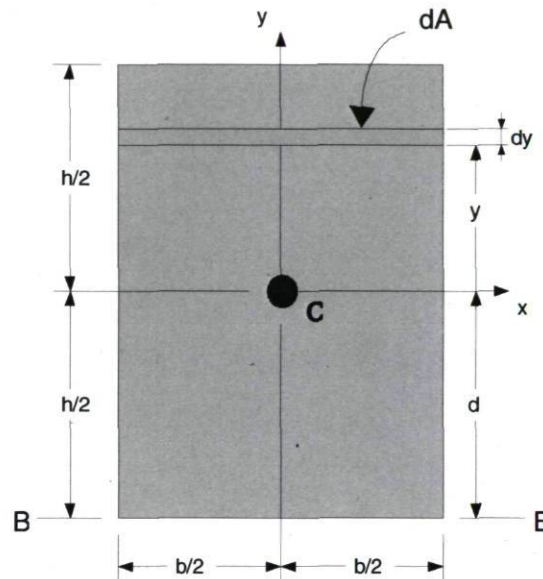


Figure 2.7 : Inertie d'une section

Il est à noter que cette inertie  $I_x = \frac{bh^3}{12}$  est calculée à partir du centroïde. Si nous voulions calculer l'inertie à partir d'un autre référentiel, par exemple l'axe B-B (voir Figure 2.7), il faudrait tenir compte du théorème des axes parallèles. Il faudrait ajouter le terme  $Ad^2$  à l'expression initiale et l'inertie deviendrait celle de l'équation 2.16.

$$I_x = \frac{bh^3}{12} + Ad^2 = \frac{bh^3}{12} + bh \left( \frac{h}{2} \right)^2 = \frac{bh^3}{3} \quad (2.16)$$



Il faut maintenant calculer la contrainte normale dans la poutre. On sait que la contrainte à la fibre neutre est nulle dans le cas de flexion pure. À l'opposé, la contrainte à la fibre extrême est maximale (voir Figure 2.8). D'un côté de la fibre neutre, la contrainte est en compression et négative. Tandis que de l'autre côté, elle est en tension et positive. La valeur maximale de ces contraintes normales se calcule à l'aide des équations 2.17 et 2.18 respectivement.

$$\sigma_1 = -\frac{Mc_1}{I} \quad (2.17)$$

$$\sigma_2 = \frac{Mc_2}{I} \quad (2.18)$$

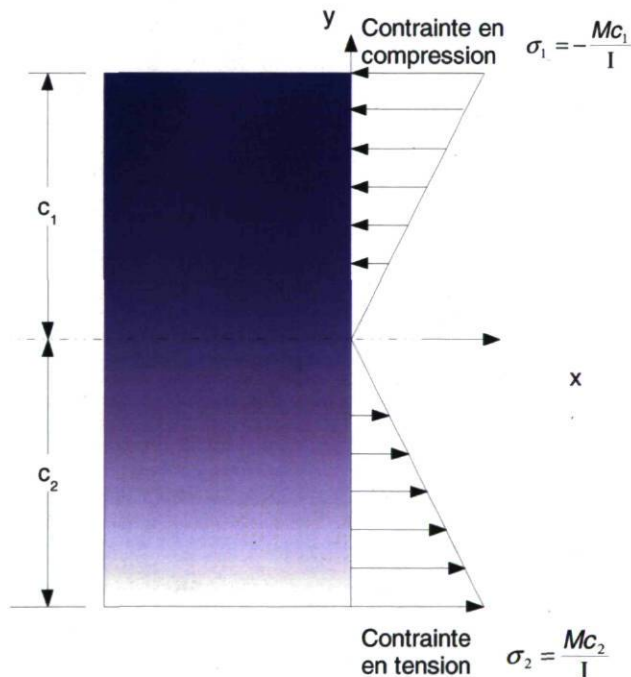


Figure 2.8 : Distribution de la contrainte normale dans la section de poutre

Il ne reste qu'à calculer le cisaillement transversal dans la poutre. Reprenons l'exemple de la poutre simplement supportée de la figure 2.9a. En étudiant le diagramme de corps libre(DCL) d'un élément infinitésimal pris à la gauche de la charge (voir Figure 2.9 b), on observe que le cisaillement  $\tau$  est nécessaire à l'équilibre de l'élément. Le débalancement initial est dû au fait que le moment agissant sur le côté gauche est légèrement inférieur à



celui agissant sur le côté droit de l'élément. Comme l'équilibre statique doit être présent, il est nécessaire qu'une autre force agisse, par conséquent le cisaillement transversal apparaît.

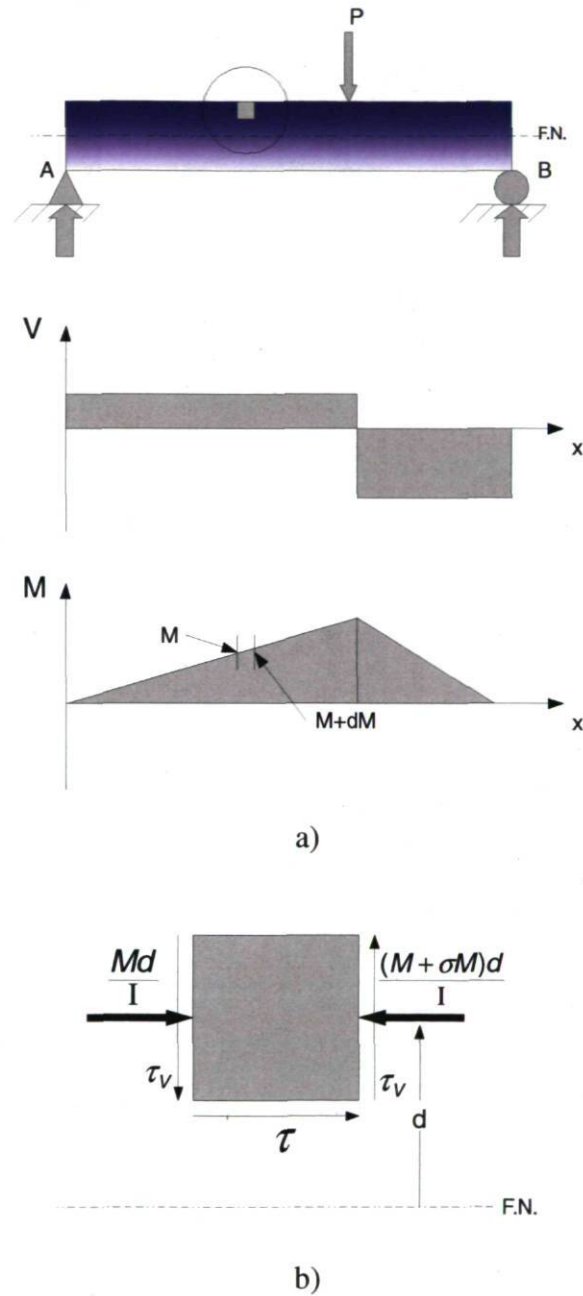


Figure 2.9 : a) Poutre simplement supportée et ses diagrammes d'effort b) Analyse du cisaillement transversal sur un élément de la poutre

Le cisaillement transverse s'évalue à l'aide de l'équation 2.19.

$$\tau = \frac{V}{Ib} \int_{y=y_0}^{y=c} ydA \quad (2.19)$$

Par contre la détermination de ce cisaillement devient rapidement complexe si la section de la poutre n'est pas pleine et présente des formes complexes. Pour mieux comprendre ces notions, un exemple tiré du volume « Fundamentals of Machine Component Design » [4] est présenté à l'annexe A.

Ceci clos la revue de la théorie des poutres. Toutes ces notions ont été nécessaires pour l'accomplissement de ce travail. Par conséquent, cette revue devrait faciliter la poursuite de la lecture de ce mémoire.

### ***2.3 Modélisation de structures par élément finis***

La modélisation de structures à l'aide de la méthode des éléments finis a été un outil essentiel tout au long du projet. Cet outil a permis d'analyser en détail des problèmes complexes. Toutefois, cette méthode qui prédit entre autres les déplacements, les déformations et les contraintes de façon approximative doit être utilisée judicieusement. Les résultats approximatifs peuvent perdre de leur précision si certaines particularités sont négligées ou mal évaluées. Une courte introduction à la méthode sera faite afin d'acclimater le lecteur à la nomenclature et au processus d'élaboration d'une analyse par éléments finis.

### **2.3.1 Généralité ([2], [11])**

La méthode des éléments finis est une méthode pour prédire le comportement de phénomènes physiques régis par des équations différentielles. La méthode s'applique aussi bien à des problèmes thermiques, structuraux et à la mécanique des fluides qu'ils soient linéaires ou non-linéaires. Elle approxime les équations différentielles par une fonction algébrique simple résolue par un ordinateur la plupart du temps. La méthode fait appel à trois disciplines, soient aux techniques de l'ingénieur pour la formulation des équations des systèmes physiques, à la mathématique pour l'élaboration des méthodes approximatives et aussi à l'informatique pour la programmation d'algorithme de résolution. Son utilisation dans l'industrie est maintenant très répandue et on la retrouve dans plusieurs secteurs comme l'aérospatiale, le nucléaire, le chimique etc. Des programmes déjà bien élaborés sont au service de l'ingénieur pour l'application de la méthode. Dans les circonstances du projet, les logiciels NX3 ainsi que NX NASTRAN ont été utilisés.

### **2.3.2 Les étapes et particularités de la modélisation par éléments finis**

Dans cette section, les étapes nécessaires à la modélisation par éléments finis seront présentées. Toutefois, pour la réalisation du projet, certaines étapes de modélisation n'ont pas été nécessaires. Par exemple, lors de l'élaboration d'un modèle par éléments finis il faudrait, en temps normal, établir les équations différentielles régissant le phénomène à modéliser. Par la suite formuler les équations d'approximation, la formulation variationnelle et d'autres étapes qu'il n'est pas nécessaire d'explorer en détail. Ces étapes, entre autres, n'ont pas été nécessaires parce que le problème à résoudre en est un bien connu pour lequel toutes ces étapes ont déjà été faites. Les logiciels NX3 et de NX NASTRAN offrent un choix de « solutions types » pour lesquelles ces étapes sont prédéfinies. Donc voyons les étapes nécessaires à la simulation d'une structure à l'aide des logiciels NX3 et NX NASTRAN.

### Étape 1 : Modélisation géométrique

Cette première étape définit le domaine à l'étude. La géométrie à analyser peut principalement prendre deux configurations, soient le type solide (3D), le type surfacique (2D). Il existe aussi des géométries 1D mais nous n'en tiendront pas compte. Les deux configurations qui nous intéressent sont présentées par l'exemple de la poutre I à la figure 2.9 a) et b). Elles supporteront les maillages nécessaires à l'analyse par éléments finis. Le choix du type de géométrie peut dépendre, par exemple, de la taille du modèle, de la morphologie du modèle, du type d'analyse à faire. Pour le projet de la remorque, la géométrie 2d a surtout été utilisée.

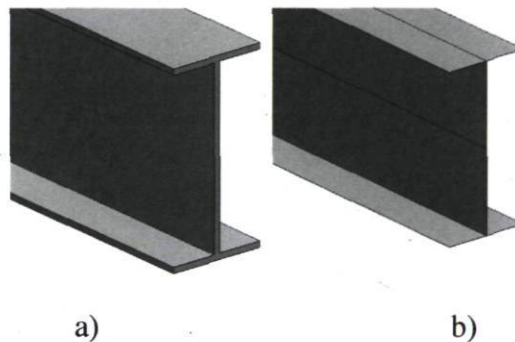


Figure 2.9 a) Géométrie solide 3D b) Géométrie surfacique 2D

### Étape 2 : Détermination des conditions aux limites

La détermination des conditions aux limites est une étape importante de la modélisation par éléments finis. Dans les cas plus complexes, il peut être difficile d'appliquer ces conditions pour qu'elles soient fidèles à la réalité. Si ces conditions sont mal déterminées, les résultats peuvent, dans certain cas, être erronés de façon significative. Il existe deux types de conditions aux limites. La première est une condition de type Dirichlet qui consiste à la valeur de l'inconnu à la frontière. Tandis que la condition de type Neumann est la valeur du gradient à la frontière. En structure, il est commun d'utiliser le premier type de conditions aux limites.



Pour aller plus loin il faut comprendre la notion de degré de liberté. En éléments finis le terme « degrés de liberté » revient souvent. Il existe 6 degrés de liberté d'un corps libre. Trois degrés de translation en x, y et z et trois autres en rotation autour de ces mêmes axes (voir figure 2.10).

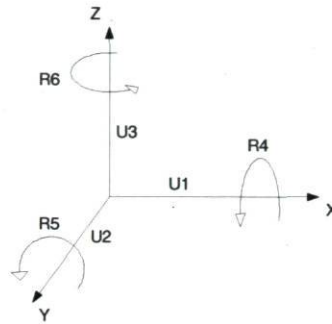


Figure 2.10 : Degrés de liberté d'un corps libre

Maintenant prenons l'exemple d'une poutre illustrée à la figure 2.11 a) et b). La figure 2.11 a) montre une poutre encastree à ces deux extrémités. La rotation autour de l'axe z à chacune de ces extrémités est impossible parce que la poutre est maintenue. Par conséquent, la pente de la tangente sera nulle à ces extrémités. Tandis que la figure b) montre la poutre simplement supportée et la rotation aux extrémités reste libre. Dans ce cas, la pente de la tangente aux extrémités sera non-nulle. Il est évident que le comportement de la poutre dans les deux cas d'appui sera différent même si les deux poutres possèdent les mêmes propriétés physiques.

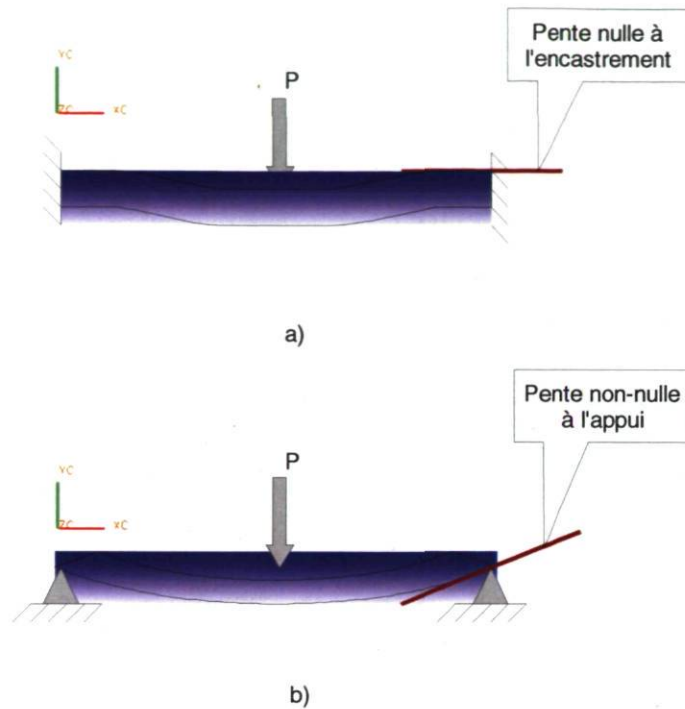


Figure 2.11 a) Poutre encastree b) Poutre simplement supportee

De plus, il existe une technique tres utilisee dans le domaine des simulations par elements finis utilisant des conditions limites particulieres dans le but de reduire le temps de calcul. Cette technique consiste a modeliser seulement la moitie de la geometrie et d'appliquer des conditions limites de symetrie sur le plan de symetrie. Reprenons l'exemple de la poutre de la figure 2.11 a. Il est possible de modeliser la moitie de la poutre et d'appliquer, au centre de la poutre, des conditions limites qui bloquent la rotation en Z ainsi que la translation en x (figure 2.12). Il faut aussi reduire la charge de moitie. En procedant de cette facon, on reduit la taille du modele et on accelere le temps de calcul. Cette technique a ete tres utile tout au long du projet.

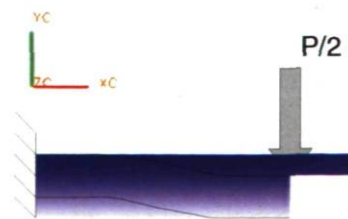


Figure 2.12 : Poutre encastree avec condition limite de symetrie



La détermination des conditions aux limites peut être difficile dans certain cas. Cette étape est cruciale car, comme constaté précédemment, les résultats peuvent être altérés de façon importante si ces conditions sont erronées.

### **Étape 3 : Détermination du chargement**

Évidemment cette étape est aussi cruciale et il est nécessaire d'appliquer les bonnes charges pour obtenir de bons résultats. Encore une fois, il peut arriver que les charges ne soient pas évidentes à déterminer. Les chargements peuvent être de plusieurs natures et combinés. Par exemple, une pression, une force ou une accélération sont des chargements possibles. Pour le projet, les forces ont été très utilisées.

### **Étape 4 : Le maillage**

Le maillage c'est la discrétisation en éléments du domaine à l'étude. Selon la géométrie à mailler, le maillage peut adopter trois configurations. Avec une géométrie de surfaces, le maillage sera composé d'éléments 2D, si la géométrie est solide, le maillage sera fait d'éléments 3D. Il existe aussi des maillages composés d'éléments 1D. Les maillages 2D ont été utiles pour le maillage de surfaces, tandis que les maillages 1D ont été utiles sous la forme de « liens rigides ». Pour favoriser la précision d'une simulation, le modèle doit compter un nombre minimal d'éléments. Ce nombre n'est pas constant d'une simulation à l'autre. Il dépend de la physiologie de la géométrie, du type d'éléments choisis et de d'autres facteurs. Un trop grand nombre d'éléments augmente le coût en calcul tandis qu'un nombre trop faible donne des résultats moins précis. Il existe une technique consistant à faire un raffinement du maillage jusqu'à ce qu'on observe une stabilité des résultats; cette technique est une analyse de convergence. Pour maximiser le maillage, il est aussi conseillé de resserrer le maillage dans les zones où le gradient est élevé. De cette façon, la précision est maximisée tout en limitant le coût de calcul.

Parlons maintenant des types d'éléments. Encore dans cette section, seules les notions favorisant la compréhension du travail accompli au cours du projet sont survolées.

Donc, il existe des éléments 3D, 2D et même 1D pour chacune des géométries respectives. Prenons par exemple les éléments 2D car ils ont été les plus utilisés lors du projet. Avec NX3 et NX NASTRAN, quatre types d'éléments sont disponibles au maillage de surfaces. Il y a les éléments à interpolation linéaire CQUAD4 dont la géométrie est quadrilatérale et le CTRIA3 dont la géométrie est triangulaire. Ces éléments possèdent un nœud à chacun de leurs sommets tel que montré à la Figure 2.13. Ils sont moins précis que les éléments quadratiques (CQUAD8, CTRIA6) possédant un nœud intermédiaire sur chacun de leurs côtés. Cette imprécision est accentuée lorsque le nombre d'éléments constituant le maillage est limité.

Les éléments quadratiques sont plus précis car ils permettent une interpolation quadratique des déplacements. Par contre, les coûts de calcul à l'aide des éléments linéaires sont moins élevés que ceux des éléments quadratiques. Il faut aussi tenir compte de la forme des éléments. La morphologie rectangulaire des éléments CQUAD permet le maillage de géométrie rectangulaire avec un nombre minimal d'éléments. Tandis qu'avec les CTRIA, le maillage de géométrie plus complexe devient possible et le maillage est plus régulier. Un maillage régulier constitué d'éléments peu déformés donnera de meilleurs résultats. On entend par élément déformé un élément qui est forcé d'avoir une géométrie irrégulière pour adopter la morphologie de la géométrie.

### **Étape 5 : Loi de comportement et propriétés mécaniques des matériaux**

La détermination de la loi de comportement d'un modèle est essentielle pour l'obtention de bons résultats. C'est à cette étape qu'il faut élaborer les équations qui régissent le phénomène physique à simuler. Il est important de rappeler que dans le cadre de ce projet, le phénomène physique à simuler est le comportement d'une structure qui ne devrait pas subir de déformation permanente lors de son utilisation. Encore une fois, NX et NX NASTRAN offrent des solutions déjà préparées pour ce type de problème.

Pour ce projet, c'est la loi de Hooke qui est à la base de cette étape. La loi de Hooke est exprimée sous forme d'équation (équation 2.20) et dit que la contrainte dans un matériau est proportionnelle de façon linéaire à la déformation «  $\epsilon$  » de celui-ci [3]. Elle est valide pour des petites déformations situées dans le domaine élastique. On appelle le module de Young « E » la pente de la courbe située dans la zone élastique.

$$\sigma = E\epsilon \quad (2.20)$$

### Étape 6 : Résolution et post-traitement

NX NASTRAN résout les équations à l'aide d'algorithmes. Ces algorithmes sont déjà en place, il s'agit de fournir les bonnes informations pour obtenir de bons résultats.

La partie post-traitement consiste en l'analyse et en l'interprétation des résultats. Dans le cas présent, les résultats intéressants sont surtout les déplacements, la déformation ainsi que les contraintes. On peut obtenir les contraintes selon la direction désirée, soit en x, y ou z. Il est aussi possible d'afficher la contrainte équivalente de Von Mises. La contrainte de Von Mises tient compte de tous les efforts, qu'ils soient en cisaillement ou normaux, elle est exprimée à l'équation 2.21.

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right]^{1/2} \quad (2.21)$$

## 2.5 Conclusion

Les notions fondamentales élaborées au cours de ce chapitre permettront au lecteur de mieux comprendre le travail effectué lors de ce projet. Les références bibliographiques pourraient permettre au lecteur d'approfondir ses connaissances dans ces domaines.



## Chapitre 3

# Revue de conception de la remorque Alutrec et évaluation de ses performances

### ***3.1 Mise en situation et problématique***

Cette étape cruciale consiste à étudier et à analyser le concept de la remorque Alutrec montrée à la figure 3.1. Les principaux éléments du concept de la remorque plane Alutrec sont, à quelques détails près, les mêmes que ceux des autres remorques sur le marché. Ce concept consiste essentiellement en deux poutres en I disposées de façon longitudinale. Ces poutres sont surmontées de traverses assurant la rigidité transversale. Des extrusions minces sont installées par-dessus le tout pour faire le plancher. Le problème de ce type de design est que les éléments structuraux transversaux et longitudinaux sont dissociés. C'est-à-dire que les traverses et le plancher n'ajoutent aucune rigidité aux deux poutres principales. Par conséquent, on peut dire que le rapport rigidité/masse de la structure n'est pas maximisé.



Figure 3.1 : Remorque Alutrec existante



## **3.2 Objectifs et méthodologie**

### **3.2.1 Objectif**

L'objectif de cette partie de mon travail consiste à mesurer la performance de la remorque existante. Pour ce projet, la performance est caractérisée par la combinaison de critères tels la rigidité, la limite avant la plasticité et la masse des composantes.

### **3.2.2 Méthodologie**

Pour évaluer la performance, une discrétisation du problème a été faite. Premièrement, de façon longitudinale, l'intégrité structurale est assurée par les deux poutres en I. Tandis que les extrusions transversales font la structure transversale. Ces deux parties ont été évaluées de façon distincte. Pour évaluer la rigidité et l'état de contrainte sous charge, des simulations à l'aide de la méthode des éléments finis ont été faites. Ces modèles permettent aussi de déterminer la masse des composantes. Les résultats seront des valeurs de références pour le design de la nouvelle remorque.

## **3.3 Simulation de la structure longitudinale**

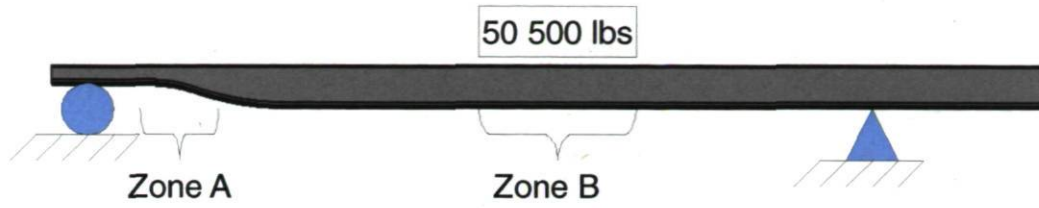
Pour évaluer le comportement longitudinal de la structure, des simulations par éléments finis ont été faites avec deux différents cas de chargement. La première simule une charge totale de 50 500 livres concentrée tandis que la seconde simule cette même charge de façon répartie. Cette charge maximale de 50 500 livres a été définie avec la compagnie Alutrec. La charge doit être disposée de façon à respecter les limites acceptées par les essieux. Cette répartition de charge par essieux est présentée à l'annexe B.

### **3.3.1 Renseignements sur les simulations**

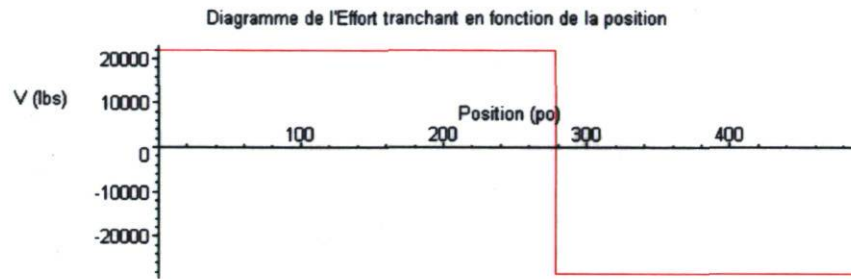
La géométrie a été fournie par la compagnie Alutrec en format « igs ». Ce format igs a dû être converti en « prt » pour le rendre compatible avec le logiciel de simulations. Le maillage est très régulier et il utilise environ 110 000 éléments 3D à interpolation linéaire (HEXA8). L'opération de maillage a été relativement facile car la géométrie est simple. Afin d'alléger le modèle, une seule des deux poutres a été simulée avec la moitié de la charge. Les conditions d'appuis limitent le déplacement vertical tout en laissant libre la rotation de la poutre. De cette façon, la reproduction des conditions d'appuis avec une sellette de camion sont assez fidèles. Il faut noter que la sellette d'un camion est montée sur un pivot et possède un diamètre d'environ 36 pouces. Les liens rigides (éléments 1D) ont été utilisés car on peut reproduire ces caractéristiques particulières à l'aide de ceux-ci (figure 3.3). L'appui à gauche est situé à 36 pouces du bout de la structure et une distance de 292 pouces sépare les deux appuis. Ce problème présente deux zones critiques. La zone A est située dans la transition de la tête de la remorque. La zone B est située directement sous la charge (figure 3.2 a).

### **3.3.2 Premier cas de chargement**

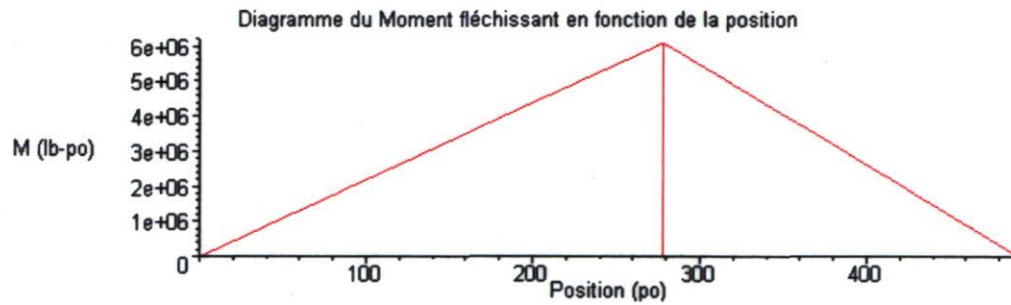
C'est ce cas de chargement qui induit le moment fléchissant le plus élevé soit environ  $6 \times 10^6$  livres-pouce et son maximum se retrouve directement sous la charge. Dans les cas où la poutre est relativement longue, l'effort tranchant a moins d'impact (figure 3.2 b et c). C'est le moment fléchissant qui aura le plus d'effet sur la structure. Les programmes pour le traçage de l'effort tranchant ainsi que du moment fléchissant sont à l'annexe C.



a)



b)



c)

Figure 3.2: a) Charge de 50 500 livres concentrée b) Diagramme de l'effort tranchant c) Diagramme du moment fléchissant

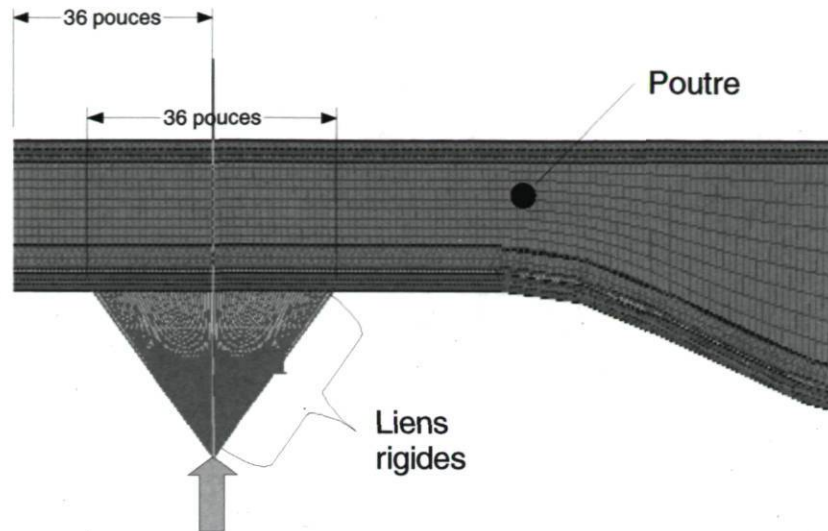


Figure 3.3 : Condition d'appui et maillage de la poutre en I

### 3.3.3 Résultats de la simulation du premier cas de chargement

La figure 3.4 est une image montrant la répartition des contraintes dans la structure. Évidemment, on remarque que les contraintes sont plus élevées aux fibres extrêmes et qu'elles sont plus basses à la fibre neutre. Aussi, comme prévu, les contraintes les plus élevées se situent dans les zones A et B. Le tableau 3.1 présente les valeurs des contraintes maximales à ces zones et le déplacement maximal de la poutre. On observe que les valeurs dans la partie inférieure de la poutre sont légèrement plus basses que celles dans la partie supérieure. On peut aussi voir que les liens rigides donnent le résultat attendu, soit une légère inclinaison des extrémités de la poutre en plus d'une bonne répartition de la réaction d'appui.



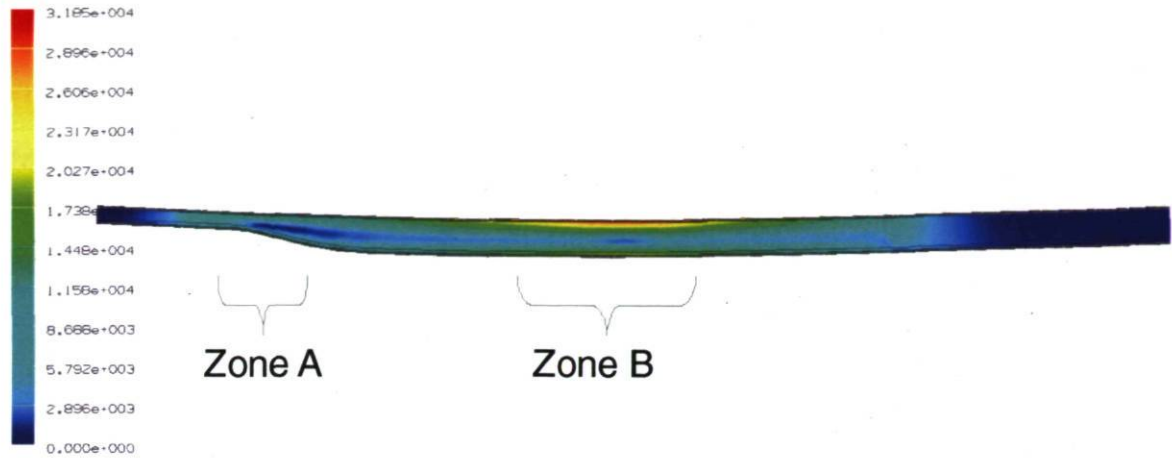


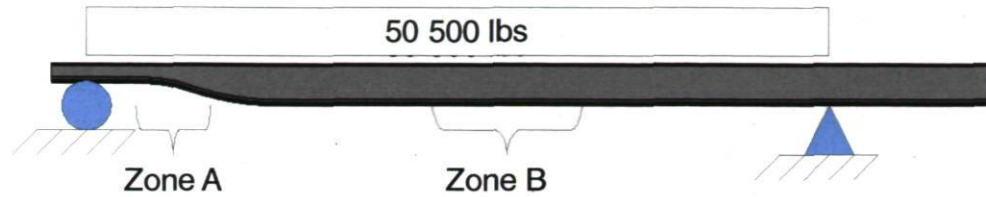
Figure 3.4 : Distribution des contraintes dans la structure sous charge concentrée

Tableau 3.1 : Résultats d'analyse de la structure avec charge concentrée

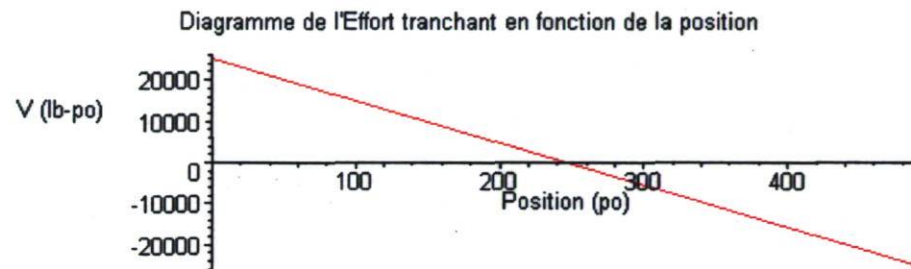
| Région |                   | Contrainte de Von Mises (Ksi) | Contrainte normale (Ksi) | Déplacement max (po) |
|--------|-------------------|-------------------------------|--------------------------|----------------------|
| Zone A | Partie supérieure | 15,3                          | 15,0                     | 5,578                |
|        | Partie inférieure | 12,6                          | 12,1                     |                      |
| Zone B | Partie supérieure | 31,5                          | 31,0                     |                      |
|        | Partie inférieure | 24,6                          | 24,4                     |                      |

### 3.3.4 Second cas de chargement

La poutre est appuyée de la même façon qu'au cas précédant (figure 3.4a). Le chargement est toujours le même, seule la dimension de la surface d'application de la charge est différente. La charge est appliquée sur une longueur de 397 pouces. Cette zone d'application commence directement vis-à-vis l'appui gauche. Les figure 3.5 b et c montrent l'effort tranchant et le moment fléchissant résultant d'un tel chargement. En comparaison avec le cas précédent, le moment fléchissant présente une forme parabolique et son maximum n'est que de  $3 \times 10^6$  lb-po soit la moitié de celui du cas précédent.



a)



b)

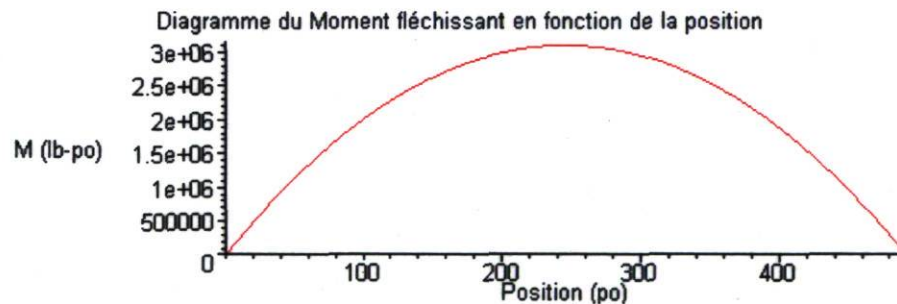


Figure 3.5 : a) Charge de 50 500 livres répartie sur la structure b) Diagramme de l'effort tranchant c) Diagramme du moment fléchissant

### 3.3.5 Résultat de la simulation du second cas de chargement

La figure 3.6 illustre la distribution des contraintes résultant de cette simulation. Encore une fois on remarque que les contraintes sont plus faibles dans la partie inférieure de la poutre. On voit aussi que les contraintes dans la zone B sont plus faibles que celles du premier cas. Il y a toutefois un fait marquant, les contraintes dans la zone A sont plus élevées.

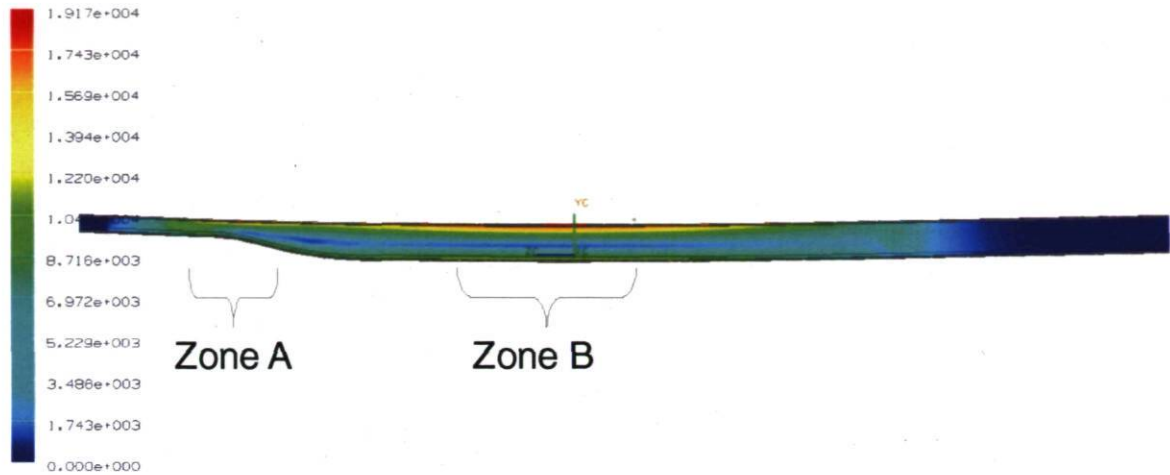


Figure 3.6: Distribution des contraintes dans la structure sous charge répartie

Tableau 3.2 : Résultats d'analyse de la structure avec la charge répartie

| Région |                   | Contrainte de Von Mises (Ksi) | Contrainte normale (Ksi) | Déplacement max (po) |
|--------|-------------------|-------------------------------|--------------------------|----------------------|
| Zone A | Partie supérieure | 19,1                          | 19,0                     | 4,165                |
|        | Partie inférieure | 15,6                          | 15,4                     |                      |
| Zone B | Partie supérieure | 19,1                          | 19,0                     |                      |
|        | Partie inférieure | 14,6                          | 14,5                     |                      |

Les résultats sont ceux attendus. C'est sans surprise qu'on observe des valeurs plus élevées dans la zone A et plus basse dans la zone B pour le deuxième cas de chargement. C'est résultats s'expliquent surtout du fait que le moment fléchissant du deuxième cas de chargement est plus élevé près de l'appui et qu'il est plus bas au centre de la poutre.

### 3.4 Simulation de la structure transversale

De la même façon, les éléments structuraux composant le plancher ont été simulés. Avec Alutrec, deux cas de chargement ont été établis, un premier cas où la force est appliquée sur

une zone plus restreinte, un autre où la force est répartie. Ces cas de chargements ont été choisis car ils présentaient, selon Alutrec, les cas les plus exigeants rencontrés lors de l'utilisation de cette remorque. Les résultats de ces simulations serviront de références pour la conception de la nouvelle remorque.

### 3.4.1 Renseignements sur les simulations

Encore une fois, pour alléger le modèle, seule la moitié du plancher a été simulée. De cette façon, le temps de calcul est fortement diminué. De plus, seule une portion de la plateforme constituée de deux traverses a été modélisée. La participation structurale des autres traverses était pratiquement inexistante lors de simulations préliminaires. C'est-à-dire qu'une fois la charge appliquée, seules les deux traverses les plus près de la charge supportaient celle-ci. Les traverses plus éloignées subissaient très peu de contrainte. La géométrie a été maillée avec 101 000 éléments 3D (HEXA8). Le maillage obtenu est très régulier. Des conditions limites de symétrie ont été utilisées au plan de symétrie. Encore ici, les liens rigides ont servi de supports aux traverses. De cette façon, on évite un effet d'encastrement. On veut que l'extrémité des traverses puisse s'incliner comme si elles étaient simplement supportées tout en ayant une zone de support raisonnablement grande (figure 3.7).

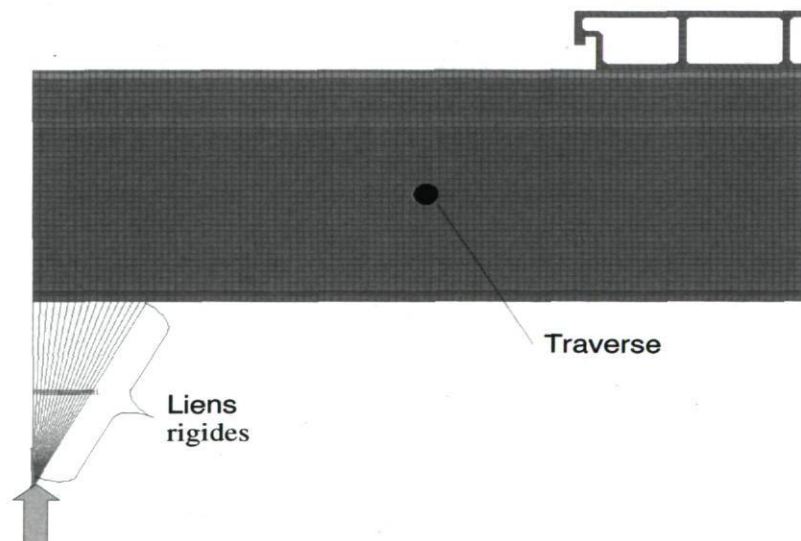


Figure 3.7 : Condition d'appui et maillage de la plateforme existante



### 3.4.2 Simulation avec une charge concentrée

Le premier cas est constitué d'une charge de 6000 livres qui agit localement sur le plancher, la zone d'application est de 4po X 8po (figure 3.8). La charge est située entre deux traverses afin d'accentuer la sollicitation des extrusions qui forment le plancher.

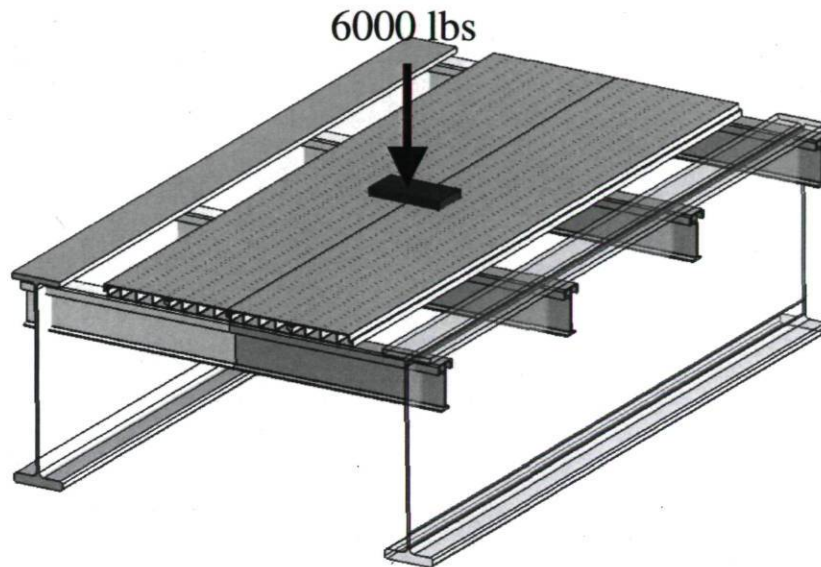


Figure 3.8 : Plate-forme de la remorque existante avec la charge concentrée

### 3.4.3 Résultat de la simulation du premier cas de chargement

La figure 3.9 illustre les zones de la plate-forme qui sont à surveiller. C'est à ces zones que l'on retrouve le moment de flexion le plus élevé. La figure 3.10 illustre la distribution de la contrainte de Von Mises dans la plate-forme. Le tableau 3.3 présente les contraintes ainsi que les déplacements à ces endroits.

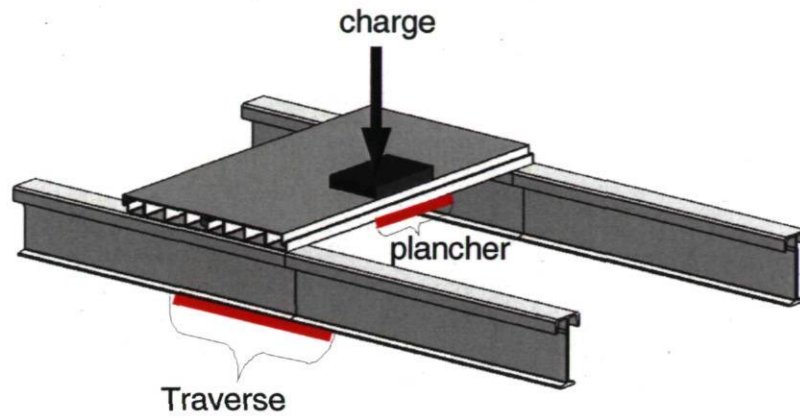


Figure 3.9 : Zones critiques de la plate-forme

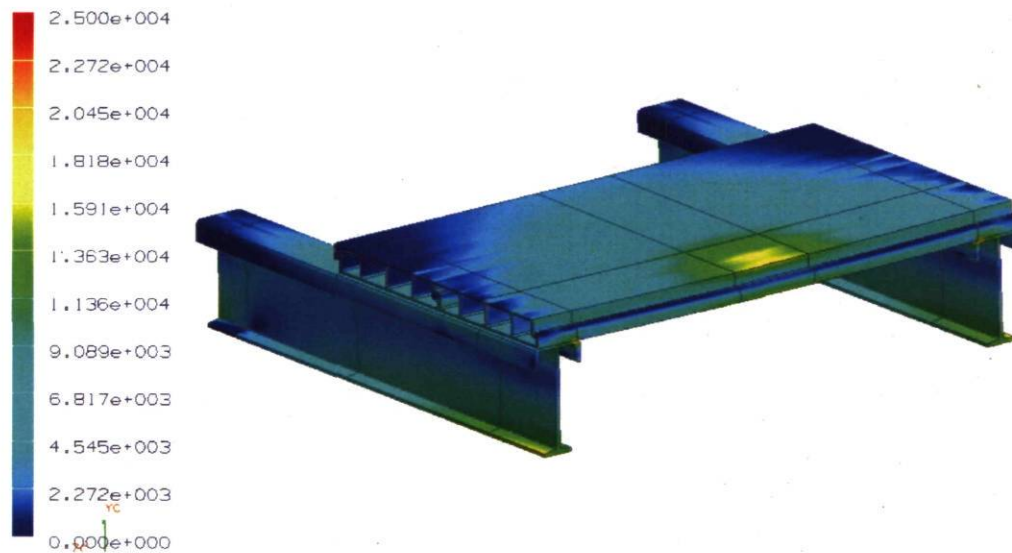


Figure 3.10 : Distribution des contraintes dans la plate-forme

Tableau 3.3: Résultats de l'analyse du plancher avec la charge concentrée

| Région   |                   | Contrainte de Von Mises (Ksi) | Contrainte normale (Ksi) | Déplacement max (po) |
|----------|-------------------|-------------------------------|--------------------------|----------------------|
| Traverse | Partie supérieure | 15,5                          | 15,1                     | 0,115                |
|          | Partie inférieure | 15,7                          | 15,4                     |                      |
| Plancher | Partie supérieure | 16,0                          | 15,7                     | 0,245                |
|          | Partie inférieure | 15,5                          | 15,5                     |                      |

On remarque que les contraintes dans les traverses sont approximativement les mêmes que celles dans le plancher. Il est à noter que la valeur du déplacement du plancher tient compte de la valeur du déplacement des traverses. Par exemple, si le plancher s'est déplacé de 0.245'' et que les traverses se sont déplacées de 0.115'', alors les extrusions du plancher ont fléchi de 0.130'' (0.245-0.115).

### 3.4.4 Simulation avec une charge répartie

Le deuxième cas possède une charge de 18 000 livres répartie sur une région de 8po X 26 po. La zone d'application est assez longue, de façon à rejoindre deux traverses, car l'écart entre celles-ci est de 24 pouces (figure 3.11).

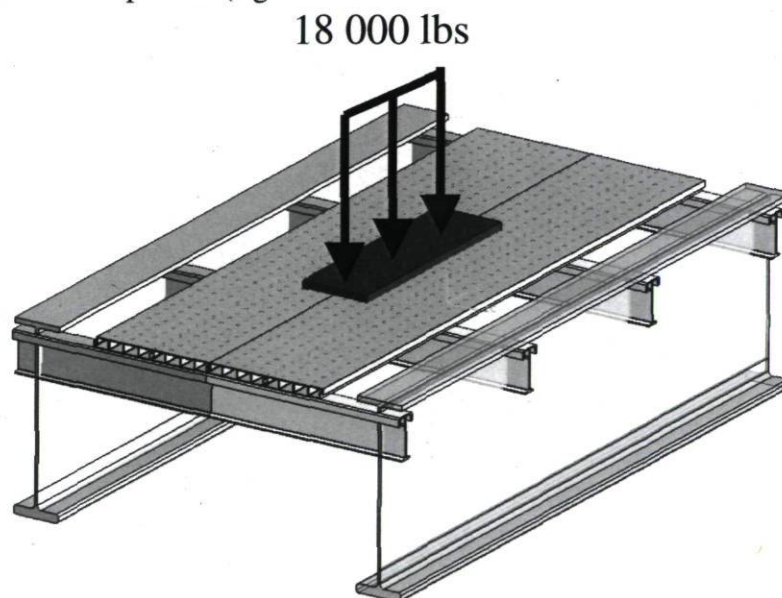


Figure 3.11 : Plate-forme de la remorque existante avec la charge répartie

### 3.4.5 Résultat de la simulation du second cas de chargement

Les zones critiques sont toujours les mêmes. On s'attend à ce que les traverses soient plus sollicitées car la charge est plus élevée. La figure 3.12 montre la distribution de la contrainte de Von Mises dans la plate-forme. Le tableau 3.4 affiche les contraintes et les déplacements des zones critiques.



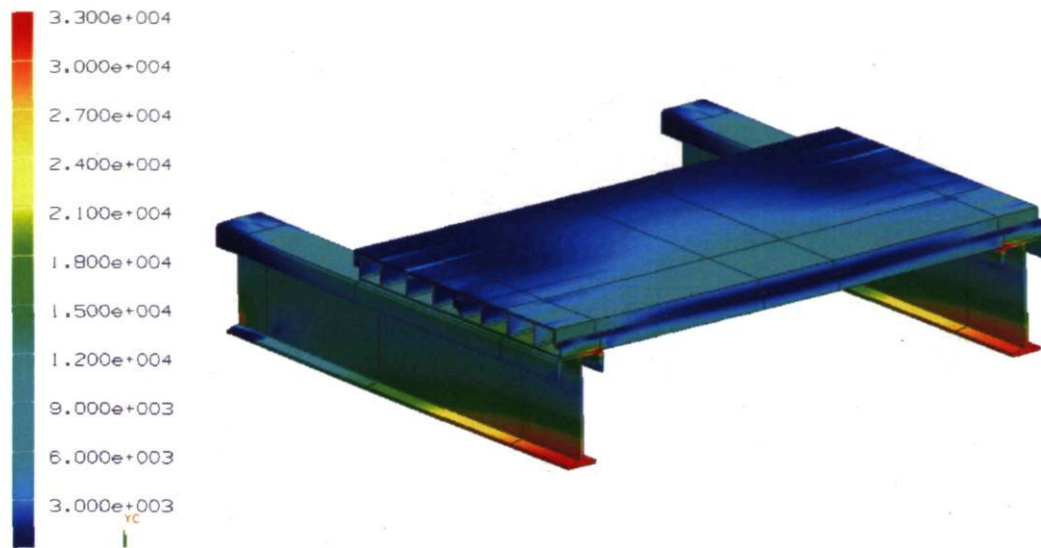


Figure 3.12 : Distribution de la contrainte dans la plate-forme

Tableau 3.4 : Résultats de l'analyse du plancher avec la charge répartie

| Région   |                   | Contrainte de Von Mises (Ksi) | Contrainte normale (Ksi) | Déplacement max (po) |
|----------|-------------------|-------------------------------|--------------------------|----------------------|
| Traverse | Partie supérieure | 29,1                          | 27,2                     | 0,232                |
|          | Partie inférieure | 33,0                          | 33,0                     |                      |
| Plancher | Partie supérieure | 5,5                           | 5,4                      | 0,309                |
|          | Partie inférieure | 6,1                           | 6,0                      |                      |

Tel que prévu préalablement, cette charge de 18 000 livres est plus exigeante sur les traverses. Cette fois, les contraintes sur les traverses sont plus élevées que celles sur les extrusions du plancher. On remarque aussi que l'effort normal est presque égal à celui de Von Mises, donc, le cisaillement est peu présent. On déduit que c'est le moment fléchissant qui induit la plus grande partie des contraintes dans ces membrures.



### **3.5 Conclusion**

Le travail effectué lors de cette étape est très important pour la poursuite du projet. Il est important de retenir que le but de ces simulations n'est pas de valider la conception de la remorque actuelle, mais plutôt d'établir des valeurs étalons qui serviront de références pour la conception de la future remorque. Nous savons déjà que les remorques Alutrec sont très robustes et que leurs preuves sont faites. Mais à titre de référence, la limite élastique de l'aluminium est de 35 Ksi tandis que le niveau des contraintes maximales obtenues est de 33 Ksi dans le cas le plus sollicité. On remarque que la marge de sécurité est relativement mince. Il ne faut oublier que les valeurs obtenues lors de ces simulations sont des approximations et qu'en réalité elles pourraient être bien différentes. Ensuite, lors de la phase de conception, les éléments structuraux seront simulés avec les mêmes cas de chargement. Par la suite, il s'agira de comparer les résultats avec ceux obtenus dans ce chapitre. Dans un processus itératif, des changements seront apportés au design de façon à obtenir les mêmes niveaux de déformation et de contrainte que ceux obtenus dans ledit chapitre.

# **Chapitre 4**

## **Conception de la plate-forme**

### ***4.1 Mise en situation et problématique***

L'objectif ultime de ce projet est de diminuer la masse de la structure. Pour y arriver, on cherche à maximiser la contribution structurale de la masse. L'idée directrice du concept est d'intégrer la plate-forme comme membre de la structure longitudinale. De cette façon, la plate-forme remplira une double fonction. Celle, comme auparavant, d'agir comme structure transversale mais en plus elle sera essentielle à l'intégrité longitudinale de la structure.

### ***4.2 Objectifs et méthodologie***

#### **4.2.1 Objectifs**

Il faut concevoir une plate-forme qui répondra aux nouveaux besoins requis par l'idée directrice menant ce projet. Le processus de conception de la plate-forme, mais aussi celle de la coque, ont été des processus itératifs de longue haleine. Seule la solution finale sera présentée au cours des prochains chapitres. L'étape de conception de la plate-forme ne sera terminée que lorsque celle de la coque sera aussi complétée. En effet, parce que la nouvelle plate-forme fait aussi partie de la structure longitudinale, son design sera validé en même temps que celui de la coque.

#### **4.2.2 Méthodologie**

Des simulations à l'aide de la méthode des éléments finis ont encore une fois été nécessaires afin de concevoir la plate-forme. Les mêmes cas de chargements utilisés lors de l'évaluation de la plate-forme antérieure seront simulés sur la nouvelle plate-forme. De

cette façon, les résultats d'analyses obtenus avec le design bien connu qui a déjà fait ses preuves seront comparés à ceux du nouveau design. Les contraintes induites ainsi que la déflexion seront des critères de comparaison. Bien que la comparaison des résultats des simulations ne garantisse pas le succès, elle est une excellente façon d'évaluer le potentiel de la performance du nouveau design.

### ***4.3 Cahier des charges pour la plate-forme***

Maintenant que la plate-forme fait partie de la structure longitudinale, elle doit remplir de nouvelles tâches. On sait que les fibres dans la partie supérieure d'une poutre simplement supportée et chargée au centre subissent des contraintes en compression. La plate-forme étant située dans la partie supérieure de la structure devra être résistante en compression. En plus, dans la partie avant de la remorque, qu'on appellera la tête, la hauteur de la structure doit être inférieure à 5 pouces (figure 4.1). Le fait de minimiser cette dimension permet de charger des objets plus hauts car la hauteur maximale ne doit pas excéder 4,15m [10]. La plate-forme sert évidemment à supporter la cargaison. Elle doit donc être suffisamment rigide de façon transversale pour soutenir ce cargo. Selon les cas, la charge transportée peut avoir une surface de contact assez limitée avec la plate-forme, la pression sera donc élevée. Pour résister à ces charges concentrées, l'espacement entre les âmes des extrusions doit être de 1,5 pouce. Cette valeur a été établie selon l'expérience de la compagnie Alutrec. Dans d'autres cas, la charge sera étendue donc moins sollicitante sur la plate-forme. Les valeurs visées ont été établies au chapitre précédant avec les simulations de la plate-forme de la remorque actuelle. La plate-forme doit aussi posséder un dispositif antidérapant de façon à ce que le chargement soit mieux sécurisé. La plate-forme doit remplir toutes ses fonctions mais en étant la plus légère possible de façon à rencontrer les objectifs de masse de la remorque qui, il ne faut pas oublier, est l'essence même de ce projet. Il est difficile d'établir une valeur précise de masse maximale de la plate-forme seule. Par contre, la réduction de poids de la remorque doit être de 1500 livres, ce qui fait que le poids total doit être inférieur à 4615 livres pour toute la remorque. Le tableau 4.1 résume en chiffre le cahier des charges de la plate-forme.



Tableau 4.1 : Cahier des charges de la plate-forme

| Caractéristiques          |                   | Valeurs visées                               |                         |
|---------------------------|-------------------|--|-------------------------|
| Résistance transversale   | Charge concentrée | Déflexion max : (0,245'')                    | Contrainte max (15 Ksi) |
|                           | Charge répartie   | Déflexion max : (0,309'')                    | Contrainte max (33 Ksi) |
| Résistance en compression |                   | Oui  |                         |
| Antidérapage              |                   | Oui  |                         |
| Poids                     |                   | Moins de 4615 livres (total de la structure) |                         |
| Épaisseur de la tête      |                   | Moins de 5'' à la sellette (figure 4.1)      |                         |
| Dimensions                |                   | 53'long x 102'' larg.                        |                         |
| Espacement des âmes       |                   | 1.5''  |                         |

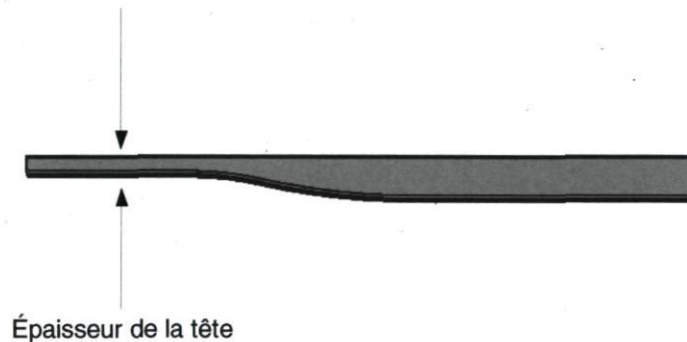


Figure 4.1 : Épaisseur de la tête de la remorque

#### **4.4 Les critères d'évaluation**

Maintenant voyons comment différents critères permettront d'évaluer les qualités des concepts. Pour faciliter le choix d'une plate-forme, il a fallu générer des critères d'évaluation. À chacun de ces critères est associée une pondération pour donner l'importance de ceux-ci. On obtient un résultat en pourcentage pour chacun des concepts. De cette façon, leurs évaluations deviennent beaucoup plus faciles. Le tableau 4.2 présente les critères d'évaluation de la plate-forme.



Tableau 4.2 : Critère d'évaluation de la plate-forme

| Critères                          | Pondération (%) |
|-----------------------------------|-----------------|
| Masse                             | 50              |
| Faisabilité, disponibilité (coût) | 30              |
| Rigidité                          | 20              |
| TOTAL                             | 100             |

#### **4.5 Gamme de solutions**

En design, il est important de mettre sur table toutes les solutions qui nous viennent en tête. Par la suite, une évaluation est faite et la meilleure solution devrait ressortir du lot. Donc, plusieurs solutions ont été envisagées et évaluées.

##### **4.5.1 Plate-forme en mousse métallique [4]**

La mousse métallique est une technologie relativement récente qui commence à avoir des applications industrielles. Entres autres, les panneaux structuraux sont des applications d'avenir pour cette technologie. Ces panneaux possèdent de bonnes qualités structurales tout en ayant une masse relativement basse. Les panneaux sont composés d'un corps poreux et de surfaces lisses voir figure 4.2.

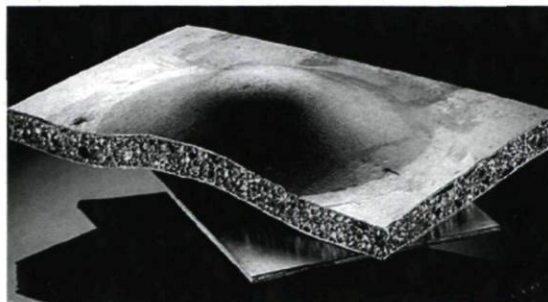


Figure 4.2 : Panneau de mousse métallique [6]

Les mousses métalliques ont une densité d'environ 15% à 25% du métal de base. Si la plate-forme était fabriquée de cette façon, sa masse serait de 4452 livres (Calcul Annexe D). Cette valeur est définitivement trop élevée considérant que la masse totale de la structure ne doit pas dépasser 4615 livres. De plus les mousses métalliques ne sont pas très répandues. L'approvisionnement est limité, voire impossible compte tenu des dimensions nécessaires au projet. De plus, le prix de ces panneaux demeure élevé. Une fois évaluée selon les critères, la plate-forme de mousse obtient un résultat de 15% (voir tableau 4.3).

Tableau 4.3 : Résultat de l'évaluation de la plate-forme de mousse

| Critères                          | Pondération (%) |
|-----------------------------------|-----------------|
| Masse                             | 0/50            |
| Faisabilité, disponibilité (coût) | 0/30            |
| Rigidité                          | 15/20           |
| TOTAL                             | 15/100          |

#### **4.5.2 Plate-forme en nids d'abeilles. [7]**

Les panneaux faits de nids d'abeilles sont bien connus de l'industrie, surtout de l'industrie aéronautique. Ces panneaux ont comme avantage de présenter un bon rapport rigidité/poids. Ils peuvent être faits d'un corps de nids d'abeilles d'aluminium mis en sandwich avec deux feuilles d'aluminium collées (Figure 4.3). La plupart du temps, ces panneaux sont utilisés dans un environnement connu ou contrôlé. En ce qui nous concerne, on ne sait pas ce que la remorque transportera. Des produits à base de pétrole ou autres formes de solvants peuvent venir en contact avec la plate-forme et mettre en péril l'intégrité de ce genre de panneaux. De plus, la remorque sera utilisée lors de conditions difficiles, par exemple en hiver, lorsque la température est très basse. Ces panneaux sont également très chers à produire et ne sont pas disponibles dans le format correspondant à celui de la plate-forme. Par conséquent, il est difficile d'évaluer une masse car l'épaisseur nécessaire n'est pas disponible de façon standard. Le tableau indique les performances que présente un tel concept, soit 55%.

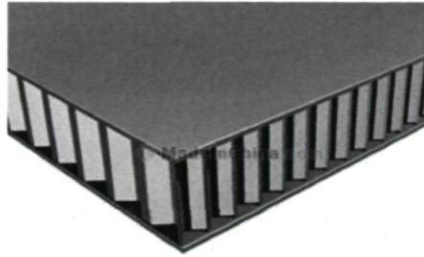


Figure 4.3 : Panneau fait de nids d'abeilles [7]

Tableau 4.4 : Résultat de l'évaluation de la plate-forme en nids d'abeilles

| Critères                          | Pondération (%) |
|-----------------------------------|-----------------|
| Masse                             | 40/50           |
| Faisabilité, disponibilité (coût) | 0/30            |
| Rigidité                          | 15/20           |
| TOTAL                             | 55/100          |

#### 4.5.3 Plate-forme composée d'extrusions d'aluminium

Les extrusions d'aluminium sont très répandues dans tous les secteurs de l'industrie. Les extrusions présentent un avantage de taille qu'est la flexibilité des géométries extrudables. Il est possible d'extruder à peu près n'importe laquelle des géométries (figure 4.4). Il est évident que certains profilés sont plus difficiles à produire que d'autres mais le concepteur est relativement libre. Alors, le concepteur peut vraiment designer le profilé de façon à obtenir des caractéristiques bien précises. Par exemple, une valeur précise d'inertie de section. En plus, il est possible d'obtenir des profilés faits d'aluminium 6061 traité thermiquement à T6, donc très résistant. Le tableau 4.5 montre les résultats de l'évaluation d'une plate-forme faite d'extrusions, soit 80%.

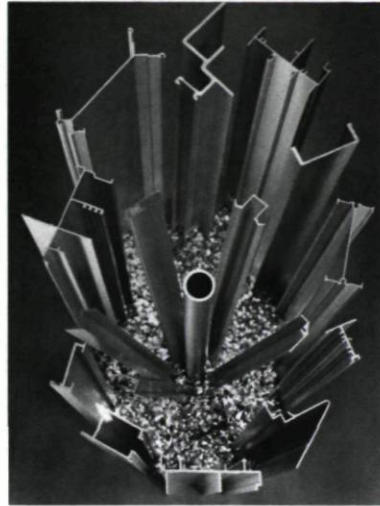


Figure 4.4 : Profilés d'extrusion d'aluminium [8]

Tableau 4.5 : Résultat de l'évaluation de la plate-forme en extrusions d'aluminium

| Critères                          | Pondération (%) |
|-----------------------------------|-----------------|
| Masse                             | 40/50           |
| Faisabilité, disponibilité (coût) | 25/30           |
| Rigidité                          | 15/20           |
| TOTAL                             | 80/100          |

#### **4.6 Solution retenue**

Il est évident que les extrusions d'aluminium présentent un net avantage sur les autres solutions envisagées. C'est le critère de disponibilités qui a vraiment fait la différence. Effectivement, les applications industrielles des autres méthodes sont encore relativement limitées. Il reste maintenant à élaborer une plate-forme faite d'extrusions d'aluminium qui respectera les exigences du projet.



#### 4.6.1 Raffinement de la solution

Préalablement, il a été dit qu'il est possible d'extruder à peu près n'importe quel profilé. Lors de ce projet, nous avons vite pris connaissance des limitations de ce procédé. Certaines lois gouvernent le procédé. Entre autres, il existe une relation importante entre le diamètre circonscrit du profilé et de son épaisseur. Plus un profilé est gros, plus l'épaisseur de ces parois devra être élevée, comme l'indique la charte de l'annexe E [9]. Aussi, le nombre de cavités est un facteur important. Un profilé sans aucune cavité, par exemple une barre, est plus facile à extruder qu'un profilé avec une ou plusieurs cavités, par exemple un tube, etc. Toutes ces caractéristiques du procédé ont contraint le design de la plate-forme ayant, le plus souvent, comme conséquence d'augmenter l'épaisseur des parois des profilés ou de diminuer la largeur hors-tout de ceux-ci. Le fait de diminuer la largeur a eu l'effet malencontreux d'augmenter le nombre d'extrusions. Il faut joindre ces extrusion entre-elles et la façon qui s'est avérée être la meilleure est le soudage. Donc qui dit plus de pièces, dit plus de joints à souder. D'autres méthodes comme l'assemblage par adhésif ou par insertion rapide ont été envisagées. L'assemblage par adhésif présentait des incertitudes au niveau de la durabilité. Tandis que l'assemblage par insertion rapide ajoutait beaucoup de masse à la plate-forme.

Le fait que la hauteur de la tête de la remorque soit limitée en épaisseur a nécessité une orientation de design un peu particulière. En effet, cette partie de la remorque est particulièrement sollicitée parce que le moment d'inertie à cet endroit est grandement limité par la restriction de l'épaisseur. Pour contrer cet effet indésirable, les extrusions dans la partie avant de la plate-forme sont orientées longitudinalement (figure 4.5). Les extrusions offrent une meilleure résistance à la flexion lorsqu'elles sont orientées de cette façon. Elles sont orientées longitudinalement seulement sur une distance de 130 pouces car il était impossible pour Alcoa de les extruder sur une longueur de 53 pieds. Les extrusions constituant le reste de la plate-forme, c'est-à-dire de 130'' à 636'', sont légèrement différentes en plus d'être orientées transversalement.

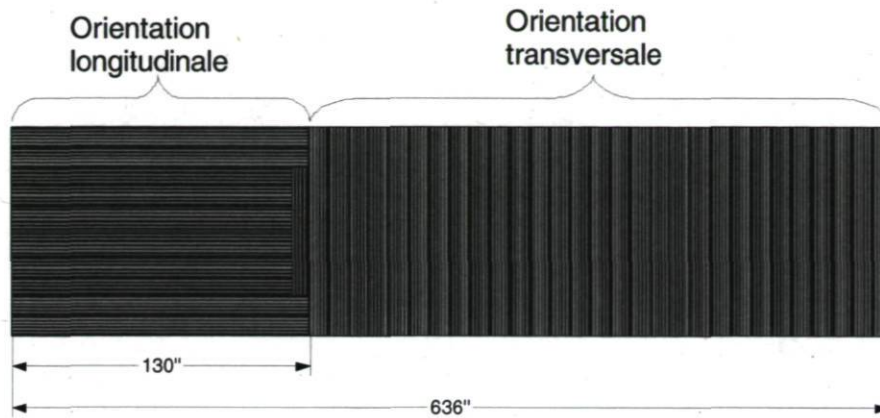


Figure 4.5 : Disposition des extrusions de la plate-forme

#### 4.6.2 Extrusions longitudinales

Après de multiples itérations, plusieurs analyses par éléments finis ont été faites et l'extrusion présentant les meilleures qualités pour la partie avant est celle de la figure 4.6. Il faut mentionner que cette extrusion va au maximum des possibilités du procédé d'extrusion. Effectivement, on retrouve neuf cavités dans ce profil, ce qui représente un défi de taille pour l'extruder de façon correcte. Pour optimiser le rapport rigidité/masse, les semelles supérieures et inférieures sont plus épaisses que les âmes. En plus, la hauteur de l'extrusion n'est que de 3,5'', ce qui améliore considérablement la demande d'Alutrec, qui vise une épaisseur maximale de 5''.

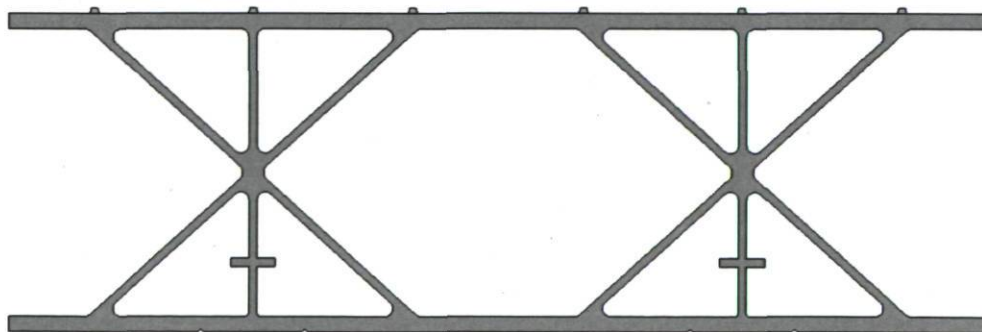
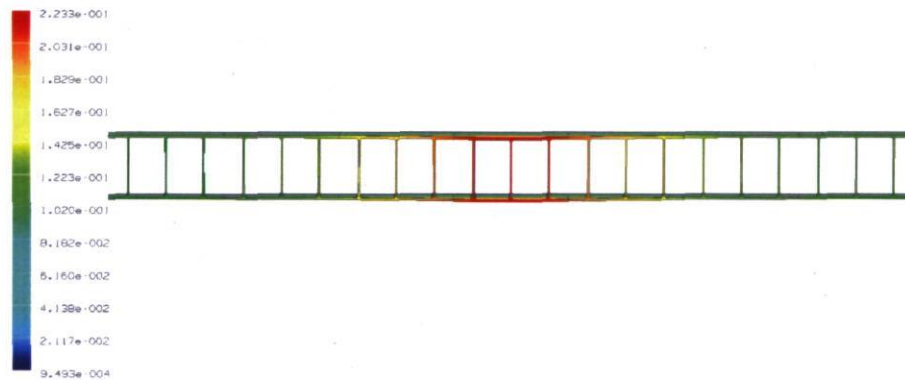
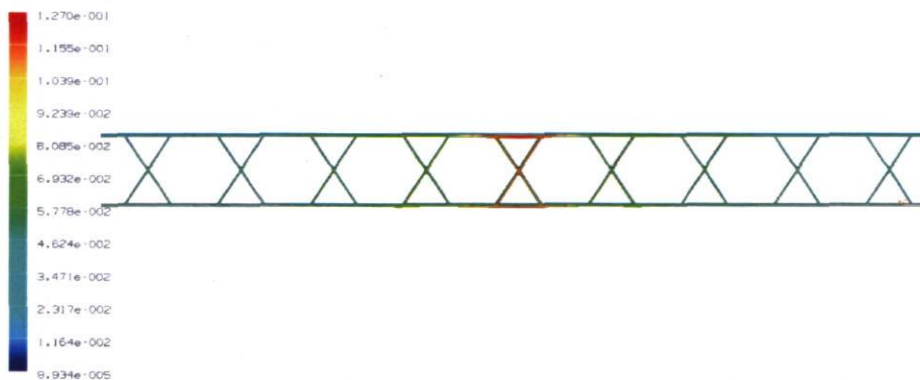


Figure 4.6 : Profil de l'extrusion longitudinale

Tel que cité dans le cahier des charges, l'espacement des âmes est de 1,5'' pour résister aux charges localisées. Aussi, on remarque la forme particulière des âmes qui sont disposées en « X ». L'idée de cet agencement vient du principe des « croix de Saint -André ». Les croix de Saint André sont bien connues en génie civil car elles permettent de faire des poutres légères tout en ayant une meilleure résistance. Dans cette partie de la plate-forme, la rigidité longitudinale est essentielle mais la plate-forme doit aussi avoir une bonne rigidité transversale car la remorque est appuyée sur le camion par son centre. Les croix permettent une réduction de 43% la déflexion maximale comme le montre l'analyse comparative illustrée à la figure 4.7 a et b.



a)



b)

Figure 4.7 a) Déplacement de la plate-forme en I : max= 0,223''

b) Déplacement de la plate-forme en X : max= 0,127''



L'analyse longitudinale de la structure sera présentée au chapitre 5 avec les analyses de la structure longitudinale et la coque. On remarque aussi les deux petits appendices de chaque côté de l'âme verticale. Ces appendices servent à retenir des petites pièces filetées introduites à l'intérieur des extrusions qui serviront à retenir la plaque de friction qui entre en contact avec la sellette du camion.

#### 4.6.3 Extrusions transversales

Maintenant regardons le détail de la conception des extrusions orientées transversalement. Ces extrusions forment 80% de la surface totale de la plate-forme. Le profil retenu est présenté à la figure 4.8. Ce profil va encore une fois à la limite du procédé d'extrusion car il comporte plusieurs cavités. Plus encore, les parois sont très minces par rapport à ses autres dimensions. Encore ici, l'espacement des âmes au niveau supérieur est de 1,5 pouce de façon à respecter la demande d'Alutrec. On remarque que la semelle inférieure de l'extrusion est légèrement plus mince que celle du haut, de façon à minimiser la masse tout en gardant une bonne résistance à l'impact pour la partie supérieure.

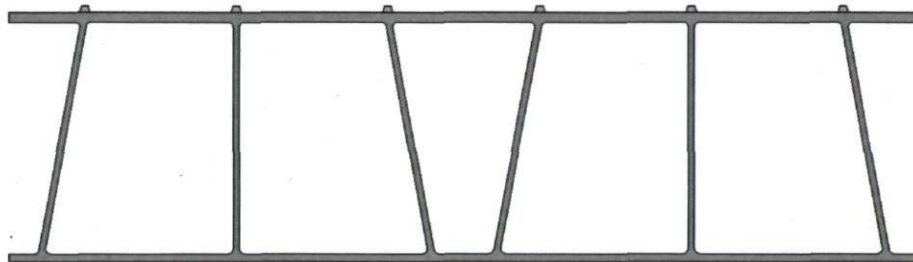


Figure 4.8 : Profil de l'extrusion transversale

Pour arriver à ce profil, des simulations par éléments finis ont été faites. Les charges utilisées lors de ces simulations sont les mêmes que celles utilisées pour l'évaluation du plancher déjà existant. Encore une fois, seule une moitié du modèle a été simulée. Les conditions limites et les cas de chargements sont les mêmes que ceux des évaluations de la plate-forme existante présentées au chapitre précédent. Des conditions limites de symétrie ont été appliquées au plan de symétrie. Pour éviter un effet d'encastrement, les liens rigides ont encore été utilisés. Le maillage est constitué d'éléments 3D et il est très régulier comme le montre la figure 4.9.



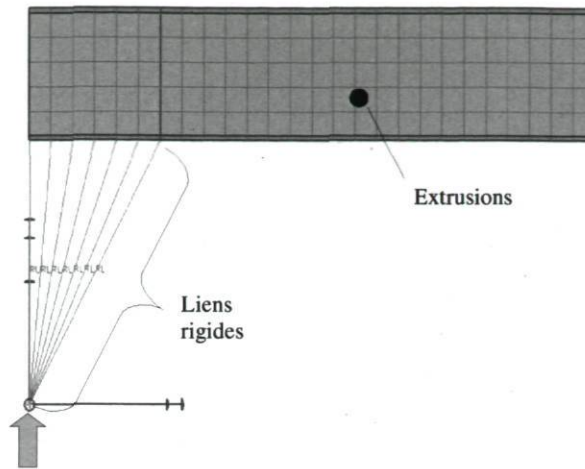


Figure 4.9 : Condition d'appui et maillage de la nouvelle plate-forme

Le premier cas est constitué d'une charge de 6000 livres concentrée sur une zone de 4po x 8 po (figure 4.10). La plate-forme présente d'excellentes performances et les résultats sont affichés au tableau 4.6, tandis que la distribution des contraintes dans la plate-forme est présentée à la figure 4.11.

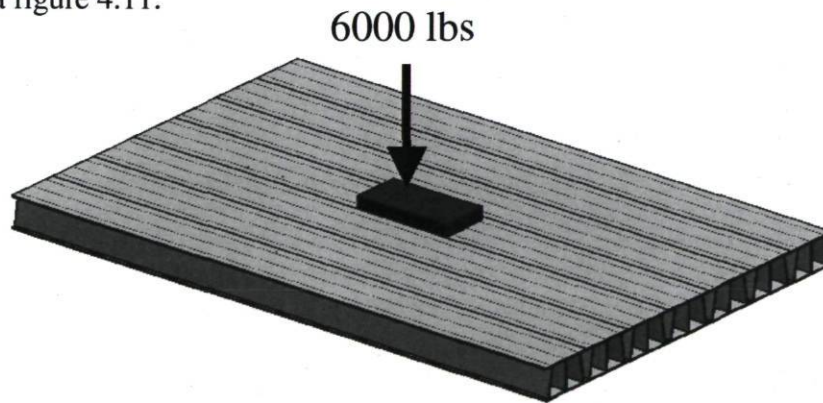


Figure 4.10 : Nouvelle plate-forme avec la charge concentrée

Tableau 4.6 : Résultats de l'analyse de la plate-forme avec la charge concentrée

| Région   |                   | Contrainte de Von Mises (Ksi) | Déplacement max (po) |
|----------|-------------------|-------------------------------|----------------------|
| Plancher | Partie supérieure | 13,0                          | 0,183                |
|          | Partie inférieure | 14,0                          |                      |

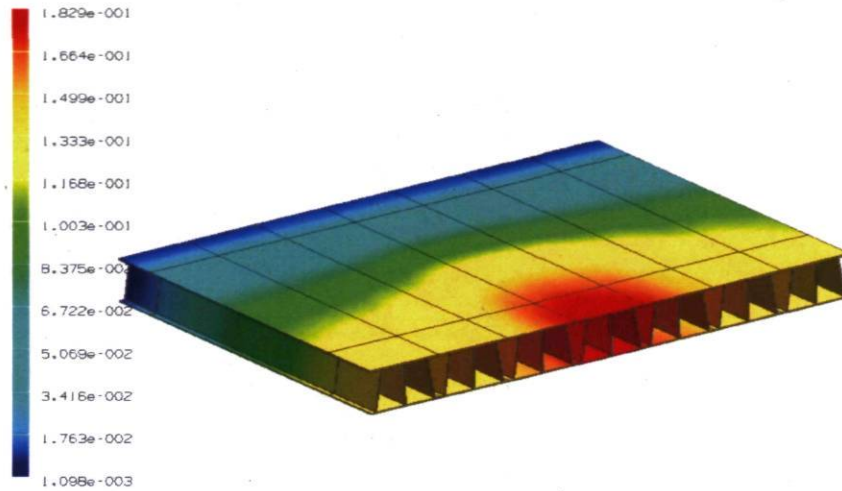


Figure 4.11 : Distribution des contraintes dans la nouvelle plate-forme

Maintenant nous pouvons comparer les résultats obtenus à ceux de la plate-forme de la remorque existante. Le tableau 4.7 nous montre les résultats des deux designs et affiche le gain obtenu par la nouvelle plate-forme.

Tableau 4.7 : Résultats de l'analyse comparative avec la charge concentrée

|                      | Contrainte max<br>Von Mises (Ksi) | Déplacement max<br>(po) |
|----------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| Plate-forme Alutrec  | 16,0                              | 0,245                   |
| Nouvelle plate-forme | 14,0                              | 0,183                   |
| Gain                 | 12,5 %                            | 25 %                    |

Pour ce qui est du chargement de 18 000 livres réparti (figure 4.12), la distribution des contraintes est présentée à la figure 4.13, tandis que les résultats sont montrés au tableau 4.8.

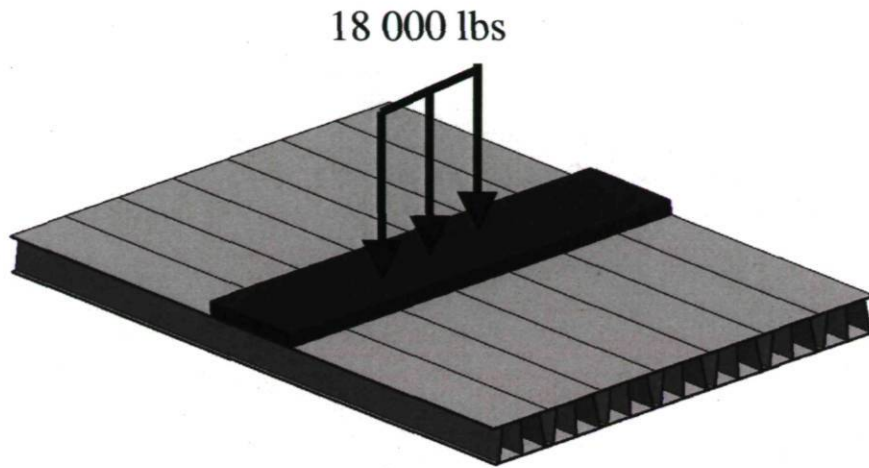


Figure 4.12 : Nouvelle plate-forme avec la charge répartie

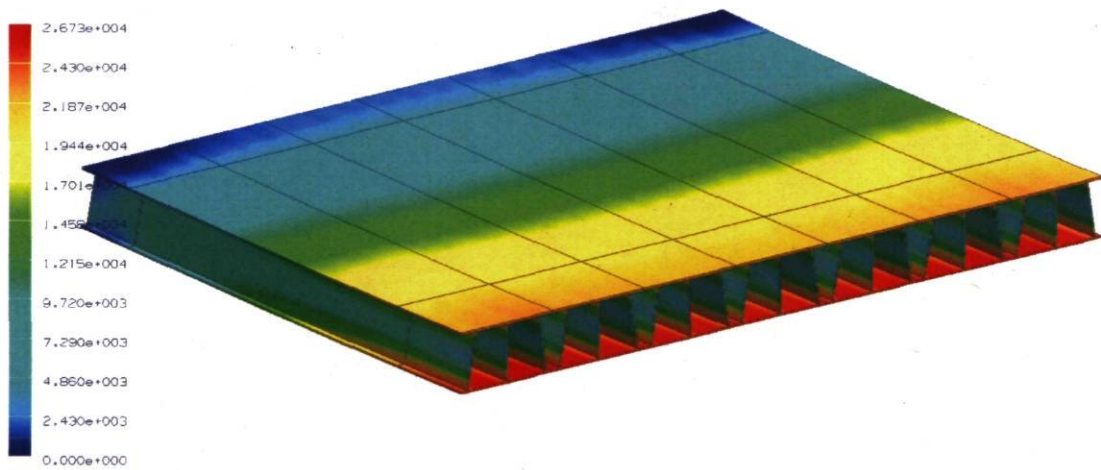


Figure 4.13 : Distribution des contraintes dans la plate-forme

Tableau 4.8 : Résultats de l'analyse de la plate-forme avec la charge répartie

| Région   |                   | Contrainte de Von Mises (Ksi) | Déplacement max (po) |
|----------|-------------------|-------------------------------|----------------------|
| Plancher | Partie supérieure | 22,0                          | 0,441                |
|          | Partie inférieure | 26,0                          |                      |



Encore une fois, les résultats obtenus sont comparés à ceux de la plate-forme de la remorque déjà existante (tableau 4.9). On remarque qu'il y a une réduction de 20% des contraintes induites, par contre la déflexion de la nouvelles plate-forme est plus importante de 40% comparativement à celle de la remorque existante.

Tableau 4.9 : Résultats de l'analyse comparative avec la charge répartie

|                      | Contrainte max<br>Von Mises (Ksi) | Déplacement max<br>(po) |
|----------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| Plate-forme Alutrec  | 33,0                              | 0,309                   |
| Nouvelle plate-forme | 26,5                              | 0,441                   |
| Gain                 | 20 %                              | - 40 %                  |

#### **4.7 Conclusion**

Dans l'ensemble, le cahier des charges pour la plate-forme a été respecté. Le rendement de la nouvelle plate-forme surpasse celui de la remorque actuelle dans la plupart des cas. Seul l'objectif pour la déflexion sous charge répartie n'est pas atteint. Le fait que la plateforme fléchisse d'avantage n'est pas nécessairement un inconvénient. En fait, cette déflexion accrue est la conséquence d'une meilleure distribution des contraintes dans la plateforme et le seul inconvénient est l'aspect visuel d'une grande déformation. Après discussion avec Alutrec, il a été décidé que cette déformation était acceptable compte tenu du fait que le plancher de la remorque Alutrec surpasse les attentes de l'industrie. Tous les efforts sont mis pour réduire la masse de la structure. Certains compromis ont été nécessaires pour arriver. La masse de la structure sera compilée une fois que la coque sera complétée lors du chapitre suivant. La diminution de la masse de la nouvelle plate-forme seule n'est pas très impressionnante car cette dernière possède de nouvelles fonctions structurales et a dû être renforcée.

Un autre aspect important reste à soulever. Un des désirs d'Alutrec est de réduire les temps d'assemblage de façon à réduire les coûts. Lorsque l'on réévalue le concept de la plate-



forme on peut douter de l'atteinte de cet objectif. La quantité de soudure nécessaire à l'assemblage de la plate-forme est très élevée et vient à l'encontre de ce désir. Toutefois, le design de la plate-forme facilite l'assemblage à l'aide de l'automatisation.

Enfin, le design de la plate-forme ne sera validé qu'une fois la coque complétée. Effectivement, la plate-forme et la coque ne forment qu'une seule entité du point de vue structural. Ces deux composantes doivent être analysées de façon solidaire.

# Chapitre 5

## Conception de la coque

### ***5.1 Mise en situation et problématique***

Sur les remorques conventionnelles, les deux poutres en I forment la structure longitudinale. Pour le nouveau design, l'innovation majeure est que ces poutres en I sont remplacées par une coque. La proposition de la coque a été faite par la compagnie Alutrec pour plusieurs raisons, entre autres, une coque offre un meilleur aérodynamisme que celui d'une structure de poutres en I et de traverses. De plus, la coque devrait fournir une meilleure résistance à la torsion, par conséquent une meilleure stabilité et surtout, une remorque faite d'une coque est un avantage concurrentiel au niveau marketing car aucun autre manufacturier n'offre une telle remorque. Donc, la problématique est d'élaborer un design de coque à la hauteur des besoins structuraux sans oublier les contraintes d'assemblage qu'amène ce type de design. En effet, avec une structure de type coque, l'accès à l'intérieur de celle-ci peut devenir une difficulté importante lors de l'assemblage.

### ***5.2 Objectifs et méthodologie***

#### ***5.2.1 Objectifs***

Élaborer une coque qui, une fois combinée à la plate-forme, fournira une rigidité suffisante pour soutenir la charge de 50 500 livres. Il ne faut pas oublier que la structure doit être plus légère de 1500 livres que celle du design existant. Aussi, les niveaux de contrainte doivent être les mêmes que ceux obtenus lors des simulations de la remorque déjà existante.

## 5.2.2 Méthodologie

Pour atteindre les objectifs du projet, un long processus itératif a été nécessaire. Plusieurs simulations par éléments finis ont été faites et refaites. Avec les résultats de ces simulations, des ajustements de design ont été faits pour abaisser le niveau de contrainte dans la structure. Cette étape a été répétée jusqu'à ce que les contraintes et la déflexion soient à un niveau tolérable tout en ayant atteint les objectifs de réduction de poids.

## 5.3 Cahier des charges pour la plate-forme

L'arrangement de la coque et de la plate-forme doit former une structure qui résistera au chargement de 50 500 livres. La coque devra, de façon générale, résister à la tension induite par ce chargement. Les niveaux de contraintes induites doivent avoisiner ceux obtenus dans la structure de la remorque existante. La remorque doit avoir une longueur de 53', tandis que la largeur doit être d'environ 48'' pour s'introduire entre les pneus d'essieux standards. L'arrière de la remorque où vient s'installer les essieux doit avoir une hauteur d'environ 16''3/4 de façon à accepter les essieux standards. Évidemment, la structure doit être plus légère de 1500 livres. Les données du cahier des charges sont présentées au tableau 5.1.

Tableau 5.1 : Cahier des charges de la coque

| Caractéristiques         |                   | Valeurs visées                               |                         |
|--------------------------|-------------------|--|-------------------------|
| Résistance longitudinale | Charge concentrée | Déflexion max : 5,578''                      | Contrainte max : 31 Ksi |
|                          | Charge répartie   | Déflexion max : 4,165''                      | Contrainte max : 19 Ksi |
| Résistance en tension    |                   | Oui  |                         |
| Poids                    |                   | Moins de 4615 livres (total de la structure) |                         |
| Épaisseur arrière        |                   | 16,75'' (figure 5.1)                         |                         |
| Dimension                |                   | 53'long                                      |                         |



Figure 5.1 : Épaisseur de l'arrière de la remorque

#### 5.4 Les critères d'évaluation

Encore une fois, pour faciliter l'évaluation des solutions envisagées, certains critères ont été nécessaires. Les critères sont accompagnés de leur pondération (tableau 5.2).

Tableau 5.2 : Critère d'évaluation des concepts de coque

| Critères                          | Pondération (%) |
|-----------------------------------|-----------------|
| Masse                             | 50              |
| Faisabilité, disponibilité (coût) | 30              |
| Rigidité                          | 20              |
| TOTAL                             | 100             |

#### 5.5 Gamme de solutions

Les possibilités pour la conception de la coque sont relativement limitées. À cette étape on sait que la plate-forme sera faite en aluminium. On limitera la gamme de solutions aux coques faites d'aluminium. D'un point de vue financier, surtout pour une PME, il est préférable de limiter les domaines de fabrication du projet. En ce concentrant sur l'aluminium, deux solutions sont envisageables. La première est une coque faite en une seule pièce formée, l'autre faite de plusieurs plaques et extrusions assemblées.



### 5.5.1 Coque monopièce formée

Avec cette solution il est possible de faire la répartition de la masse de façon à optimiser le rapport rigidité/masse. Il est évident qu'un assemblage comptant une seule pièce est intéressant à plusieurs points de vue. Entre autres, on évite les problèmes d'assemblage comme les jeux et les défauts. Dans le cas de la remorque, le problème est d'ordre dimensionnel. L'outillage et la matière première nécessaires pour cette solution sont peu envisageables. En effet, la production d'une matrice de 50 pieds pour effectuer une opération d'estampage ou de moulage est peu réaliste, surtout pour la PME qu'est Alutrec. Donc, malgré les avantages qu'apporte cette solution, elle a vite été écartée comme le démontre sont résultat d'évaluation présenté au tableau 5.3.

Tableau 5.3 : Résultat de l'évaluation de la coque monopièce

| Critères                          | Pondération (%) |
|-----------------------------------|-----------------|
| Masse                             | 40/50           |
| Faisabilité, disponibilité (coût) | 0/30            |
| Rigidité                          | 15/20           |
| TOTAL                             | 55/100          |

### 5.5.2 Coque composée d'extrusions assemblées

Cette solution consiste en l'assemblage de pièces extrudées et formées. Il est certain qu'un assemblage de plusieurs pièces n'est pas souhaitable mais les dimensions nécessaires l'exigent. Les jeux entre les pièces, les défauts d'assemblage, la manutention de plusieurs pièces sont des exemples d'inconvénients. Malgré ceux-ci, cette solution offre certains avantages. L'utilisation de plusieurs pièces permet de faire des changements mineurs du concept sans changer tout l'outillage. Aussi, elle permet de bien répartir la masse aux endroits favorisant le rapport rigidité/masse en adaptant chacune des pièces à ses fonctions structurales. En plus, la faisabilité et la disponibilité de l'outillage et des extrusions sont excellentes. Le tableau 5.4 montre les résultats de l'évaluation de cette solution.

Tableau 5.4 : Tableau de l'évaluation du concept de la coque assemblée

| Critères                          | Pondération (%) |
|-----------------------------------|-----------------|
| Masse                             | 40/50           |
| Faisabilité, disponibilité (coût) | 25/30           |
| Rigidité                          | 15/20           |
| TOTAL                             | 80/100          |

## 5.6 Solution retenue

Il est clair que le concept aux extrusions assemblées est la solution à adopter. Cette solution offre une flexibilité incomparable. Il s'agit maintenant de trouver l'agencement de celle-ci de façon à rencontrer les exigences demandées.

### 5.6.1 Raffinement de la solution retenue

Le premier facteur qui a été considéré pour la conception de la coque est le dimensionnement de celle-ci. La remorque doit avoir une longueur de 53'. La largeur de la coque doit être environ de 48 pouces pour s'insérer entre les roues des essieux. L'épaisseur à la tête doit être de moins de 5 pouces et celle à l'arrière de 16''  $\frac{3}{4}$ . La partie arrière qui accueille les essieux doit avoir une longueur de 210''. En quelque sorte, ces dimensions déterminent l'enveloppe dimensionnelle (figure 5.2).

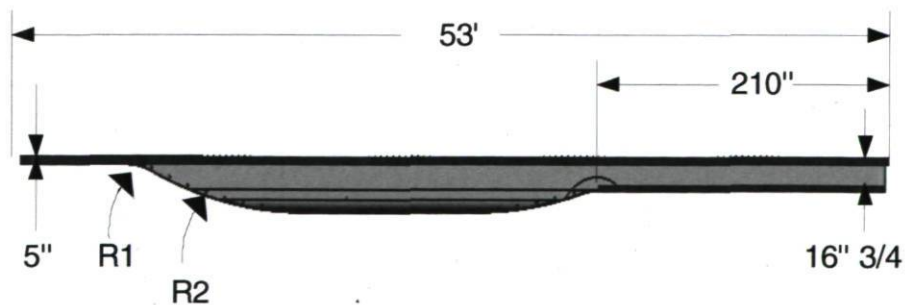


Figure 5.2 : Enveloppe dimensionnelle

Maintenant, il faut déterminer les courbes de la coque. Les notions de la théorie des poutres (chapitre 2) ont été très utiles lors de cette étape. On sait que dans le cas d'une poutre simplement supportée et chargée au centre, le moment fléchissant est au maximum directement sous la charge et est nul aux appuis. Donc, logiquement, le moment d'inertie de la structure devrait être plus élevé dans la partie centrale de la structure. Le programme de l'annexe F a permis de déterminer l'inertie de la structure ainsi que les courbes R1 et R2 (figure 5.2). Avec ce programme, la contrainte normale a été calculée pour plusieurs formats de coque. Prenons le cas de la figure 5.3 a où  $R1=200''$  et  $R2=500''$  et le cas optimisé de la figure 5.3 b où  $R1=50$  et  $R2=300$ , il faut noter que ces figures affichent seulement la région de la remorque située entre les appuis. Une partie de  $36''$  en avant et une autre de  $108''$  en arrière ont été retranchées. On s'intéresse à la partie centrale de la structure.

Le profil de la remorque est tracé en noir tandis que la contrainte est en rouge. On remarque la discontinuité de la contrainte à la position 100. Cette discontinuité est normale, car les extrusions avant constituant la plate-forme sont orientées longitudinalement. De plus, la plate-forme change abruptement d'épaisseur à cet endroit. Aussi, on voit que le fait de changer les rayons influence la contrainte dans la coque. Dans le premier cas, la valeur de la contrainte atteint un maximum de 25 Ksi. Tandis qu'au second cas, la contrainte atteint seulement 21 Ksi. La figure 5.4 tente d'expliquer les raisons de cette réduction.



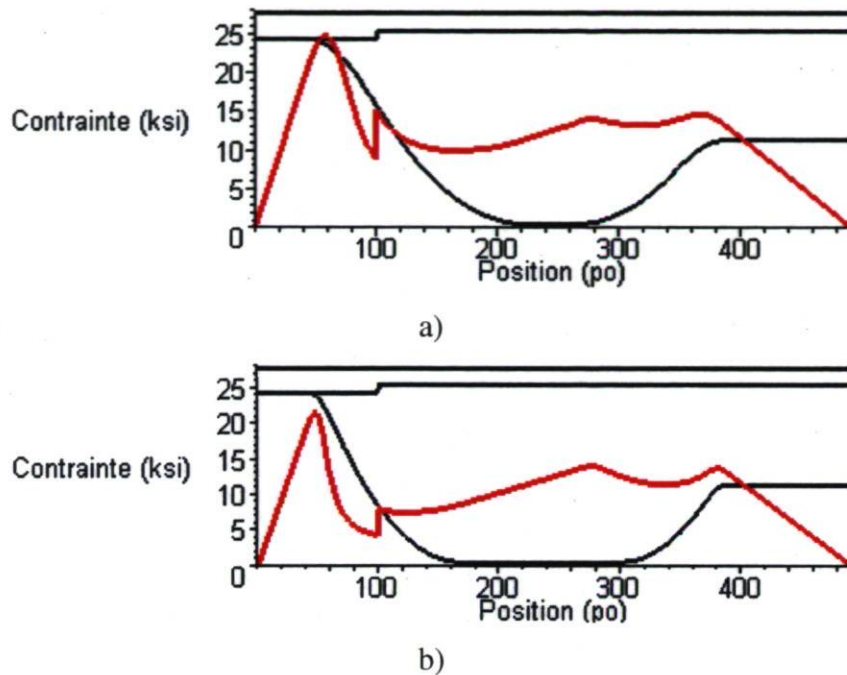


Figure 5.3 a) Contrainte dans la coque

b) Contrainte dans la coque avec des courbures maximisées

La réduction de la contrainte pour le profil b s'explique du fait que pour une position  $x_p$  donnée, la hauteur de la coque et par conséquent son inertie de section sont plus élevés. Donc, on peut maximiser l'inertie de section avec les courbes utilisées pour le profil de la coque. Le programme de calcul des contraintes a permis de faire une ébauche de la coque. Des analyses par éléments finis ont été nécessaires pour compléter le travail.

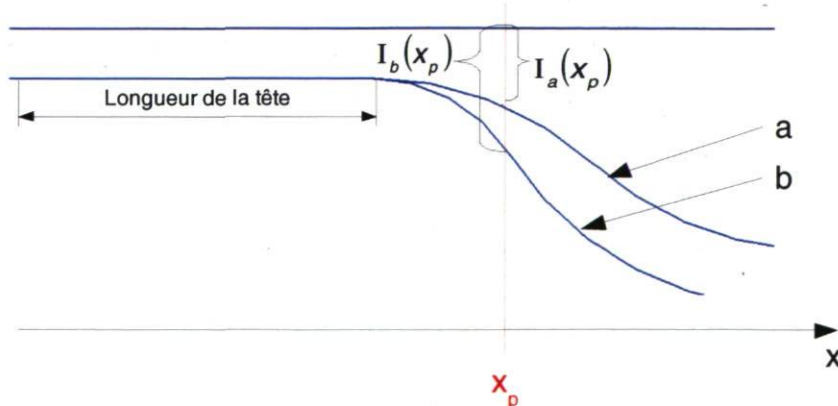


Figure 5.4 : Inertie de section en fonction de la position pour les profils a et b



La coque a été modélisée dans NX afin de l'analyser. Encore une fois, seule la solution finale sera présentée. Aussi, seulement une moitié de la remorque a été modélisée afin de réduire le temps de calcul. Plusieurs itérations ont été nécessaires avant d'en arriver à une solution viable. Pour fins d'analyse, la remorque a été modélisée avec des surfaces (2D). L'utilisation de surfaces est très appropriée car la remorque contient des géométries minces, c'est-à-dire qu'elles ont deux dimensions très importantes par rapport à la troisième. L'utilisation des éléments 2D paramétrés permet d'accélérer le calcul en comparaison du temps d'un calcul avec des éléments 3D. Le maillage de ce modèle est constitué d'environ 107 000 éléments qui sont en majorité des « CQUAD 4 ». L'étape maillage de cette géométrie a nécessité des précautions particulières. En effet, la géométrie possède plusieurs éléments structuraux. Pour joindre tous ces éléments, il a fallu ajuster les dimensions des éléments pour qu'elles concordent avec celles de la structure. Un exemple de cette situation est illustré à la figure 5.5. On y voit la partie avant de la remorque (tête). On remarque que la dimension des éléments de la partie supérieure et inférieure de la plate-forme concorde avec la position des âmes des extrusions. Aussi, de la même façon que pour l'évaluation des poutres en I de la remorque existante, des liens rigides ont été utilisés pour laisser libre la rotation des extrémités de la structure (figure 5.6).

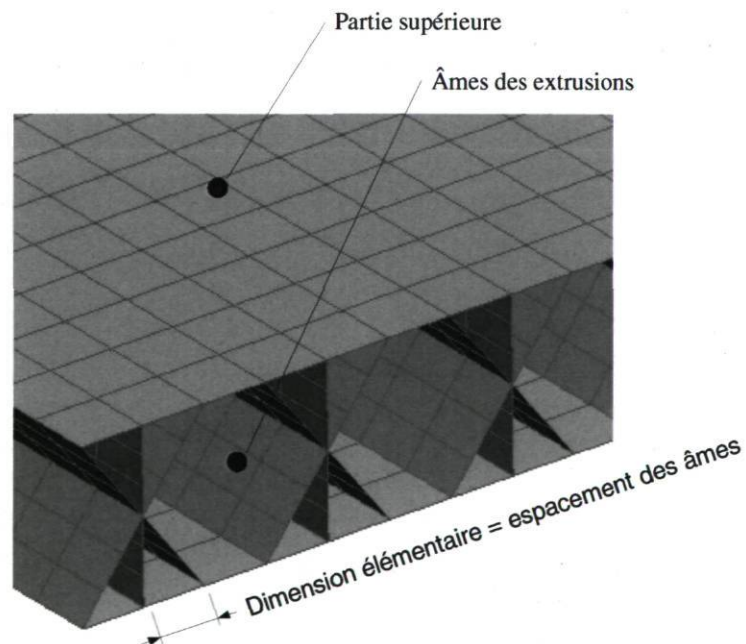


Figure 5.5 : Particularité du maillage de la structure

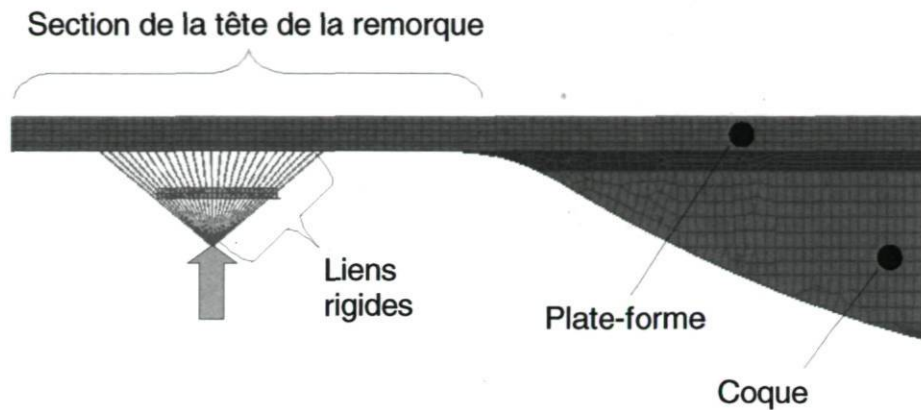


Figure 5.6 : Condition d'appui et maillage de la structure

La figure 5.7 montre la géométrie finale de la remorque. À partir de cette vue, on peut apercevoir certains éléments structuraux à l'intérieur de la coque. Les traverses situées sur le fond de la coque et les montants verticaux disposés sont des éléments indispensables.

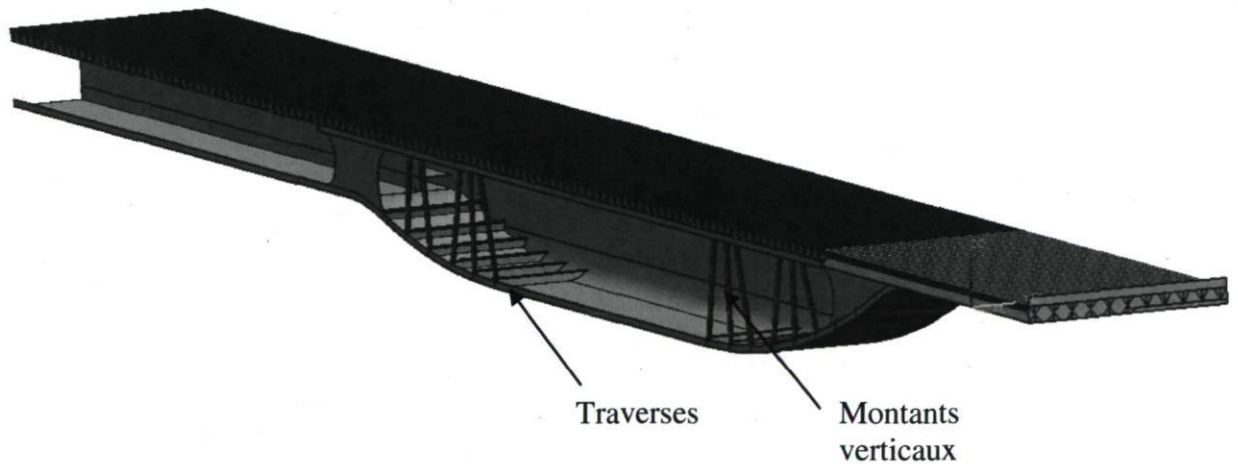


Figure 5.7 : Géométrie surfacique (2D) de la remorque

Maintenant voyons comment ces éléments ont affecté les performances de la structure. Des analyses ont été faites avec les mêmes conditions limites et la même charge de 50 500 livres que pour l'évaluation de la remorque existante. Plus tard, dans ce chapitre, la comparaison de la remorque existante et de la nouvelle remorque sera faite.

Le développement des méthodes de renforcement a été fait sous les conditions illustrées à la figure 5.8.



Figure 5.8 : Conditions pour développer le renforcement

La figure 5.9 montre les résultats d'analyse de la coque dépourvue de ces deux éléments. Les contraintes sont très élevées avec un maximum de plus de 60 Ksi.



Figure 5.9 : Résultat d'analyse de la coque sans renfort

Tandis que la figure 5.10 montre les résultats d'analyse de la coque renforcée de supports verticaux. Les contraintes ont chuté significativement à 30 Ksi sans toutefois atteindre un niveau acceptable. Les supports verticaux ont comme fonction de maintenir la distance entre la plate-forme et le bas de la coque. En quelque sorte, ces supports agissent comme une troisième âme. Sans eux, la partie supérieure et la partie inférieure de la structure avaient tendance à se rapprocher l'une de l'autre. Maintenant que la coque est bien

maintenue par son centre en plus des côtés, ce sont les parties entre ces trois âmes qui tentent toujours de se rapprocher. Pour remédier à ce problème, des traverses ont été ajoutées au fond de la coque.



Figure 5.10 : Résultats d'analyse de la coque renforcée des supports verticaux

La figure 5.11 montre les résultats d'analyse de la coque renforcée des supports verticaux en plus des traverses situées au fond de la coque. La combinaison de ces renforcements permet d'abaisser le niveau de contrainte légèrement sous les 20 Ksi. Les contraintes maximales se situent à la tête de la remorque et dans la transition arrière. Les résultats du modèle par éléments finis concordent parfaitement avec ceux du calcul analytique présentés préalablement à la figure 5.3 b. Il est intéressant de voir que les deux méthodes, complètement différentes, permettent d'obtenir les mêmes résultats. Tel qu'expliqué plus haut, le rôle des traverses est de maintenir la pleine largeur de la coque en reliant les âmes et les supports verticaux.



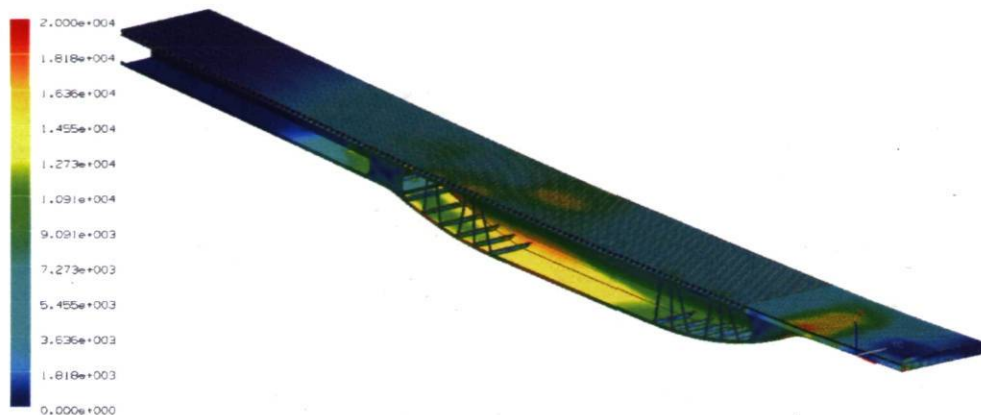


Figure 5.11 : Résultats d'analyse de la coque renforcée des supports verticaux en plus des traverses

Le tableau 5.5 résume l'évolution des résultats en comparant les contraintes maximales, la déflexion et la masse ajoutée dans chacun des cas d'évolution. Les renforts ajoutés sont très efficaces car ils ont pour effet de réduire la contrainte ainsi que la déflexion sans pour autant ajouter trop de masse. Le gain de 70 livres n'est qu'une fraction de la masse de la structure dont le total est maintenant de 4370 livres. Le désavantage de ces pièces supplémentaires est qu'elles augmentent le temps de fabrication.

**Tableau 5.5 : Évolution du renforcement de la coque**

|                                     | Contrainte max<br>(Ksi) | Déflexion<br>(po) | Masse ajoutée<br>(livres) |
|-------------------------------------|-------------------------|-------------------|---------------------------|
| Coque sans renfort                  | 61,2                    | 5,6               | -                         |
| Coque avec supports<br>verticaux    | 30,8                    | 4,2               | 31                        |
| Coque avec supports<br>et traverses | 19,0                    | 3,7               | 40                        |

### 5.7 Évaluation des performances de la structure

De la même façon qu’avec la plate-forme, une étude comparative pour la structure est faite. C’est en quelque sorte une façon de valider la nouvelle structure. Des analyses ont été faites en utilisant les mêmes cas de chargement soient, un cas avec une charge concentrée et l’autre répartie. La structure est encore appuyée simplement, la distance entre les appuis est de 492’’.

#### 5.7.1 Charge concentrée

Le premier cas est celui avec la charge de 50 500 livres concentrée (figure 5.12). La charge est appliquée sur une zone de 3 pieds. La zone A et la zone B sont les endroits critiques qu’il faut examiner.

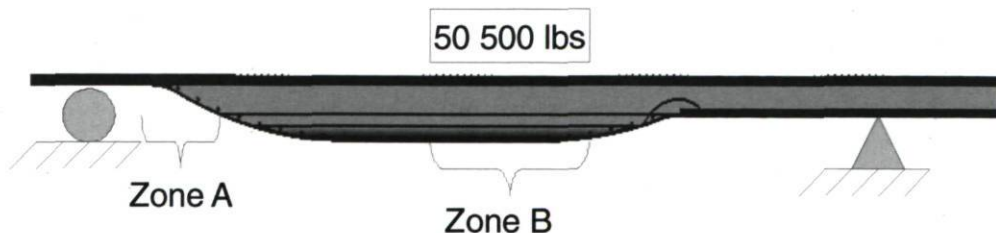


Figure 5.12 : Charge concentrée sur la structure

La distribution des contraintes est présentée à la figure 5.13. Comme prévue, les zones A et B sont les plus contraintes. En regardant le résumé de l'analyse au tableau 5.6, on remarque que pour la zone A la contrainte normale est très près de la contrainte équivalente de Von Mises. Ces résultats ne sont pas des surprises car la contrainte est surtout induite par le moment fléchissant. La valeur de la contrainte maximale est de 19,4 Ksi et elle se situe dans la zone A. On peut expliquer ce maximum par le fait que l'inertie de section est très basse à cet endroit. Dans la partie supérieure de la zone B, on obtient un léger écart entre la contrainte normale et celle de Von Mises. La contrainte de Von Mises de 17 Ksi est plus élevée que la contrainte normale à 12 Ksi. La contrainte de Von Mises combine l'effort normal à l'effort transversal induit par le chargement. De son côté, le déplacement maximal est au centre et est d'une valeur de 3,633 pouces.

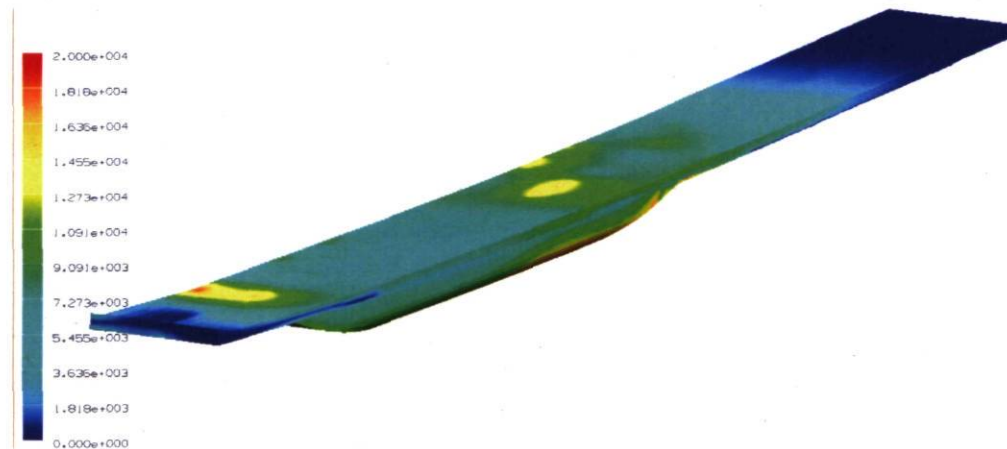


Figure 5.13 : Distribution de la contrainte sous la charge concentrée

Tableau 5.6 : Résultats d'analyse de la structure sous la charge concentrée

| Région |                   | Contrainte de Von Mises (Ksi) | Contrainte normale (Ksi) | Déflexion (po) |
|--------|-------------------|-------------------------------|--------------------------|----------------|
| Zone A | Partie supérieure | 19,4                          | 19,0                     | -              |
|        | Partie inférieure | 17,0                          | 15,0                     |                |
| Zone B | Partie supérieure | 17,1                          | 12,2                     | 3,633          |
|        | Partie inférieure | 15,6                          | 15,4                     |                |

### 5.7.2 Charge répartie

Maintenant regardons le comportement de la structure avec une charge répartie (figure 5.14). La charge est répartie sur une zone de 397 pouces de long et débute directement sur l'appui de gauche.

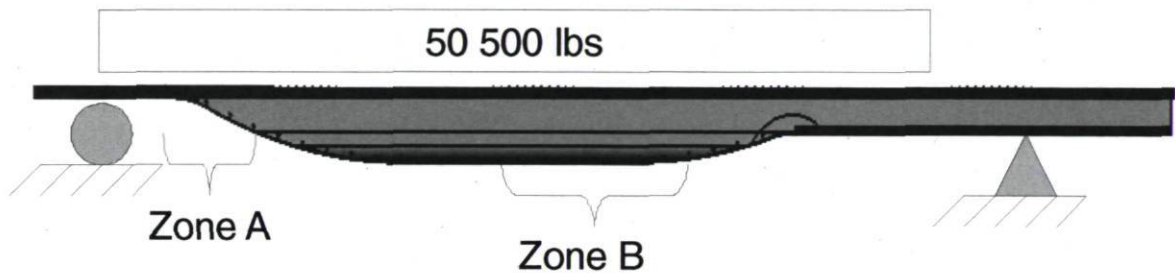


Figure 5.14 : Charge répartie sur la structure

La figure 5.15 présente la distribution des contraintes dans la structure. Cette fois, les contraintes de la zone B sont plus basses et se situent maintenant sous les 10 Ksi, tandis que celles de la zone A ont augmenté à 23 Ksi. Cette augmentation s'explique du fait que la charge se retrouve légèrement plus vers l'avant de la remorque. Cette fois-ci, lorsqu'on regarde le tableau 5.7, on remarque que la contrainte normale et celle de Von Mises sont très semblables sur toutes les zones. Contrairement au cas de charge concentrée, la contrainte transversale induite par le chargement est pratiquement nulle car le chargement est réparti sur une très grande région de la plate-forme. La déflexion maximale s'est abaissée pour atteindre une valeur d'environ 3 pouces.



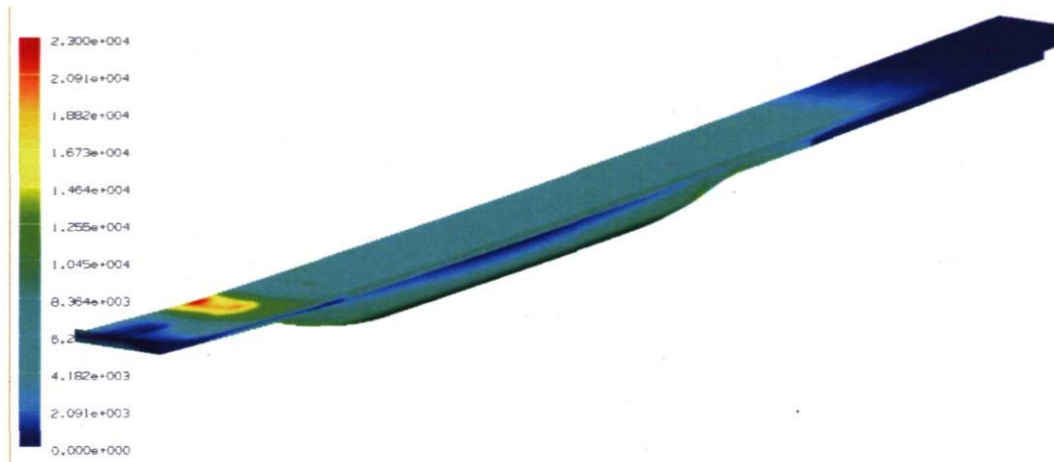


Figure 5.15 : Distribution de la contrainte sous la charge répartie

Tableau 5.7 : Résultats d'analyse de la structure sous la charge répartie

| Région |                   | Contrainte de Von Mises (Ksi) | Contrainte normale (Ksi) | Déflexion (po) |
|--------|-------------------|-------------------------------|--------------------------|----------------|
| Zone A | Partie supérieure | 23,2                          | 23,0                     | -              |
|        | Partie inférieure | 20,1                          | 19,1                     |                |
| Zone B | Partie supérieure | 8,5                           | 7,8                      | 2,995          |
|        | Partie inférieure | 9,7                           | 9,6                      |                |

### 5.7.3 Comparaison de la structure de la remorque existante à celle de la nouvelle remorque

Pour donner de la perspective aux performances de la nouvelle structure, une comparaison à celles de la structure Alutrec a été faite. On sait que la structure de la remorque Alutrec sert de référence. Cette comparaison est importante car elle permet de supposer que le nouveau design rencontrera les attentes de l'industrie.

Le tableau 5.8 montre la contrainte maximale et la déflexion sous charge concentrée pour chacune des structures. La contrainte maximale dans la nouvelle structure a été réduite de façon importante, soit de 38%. De son côté, la déflexion est passée de 5,578'' à 3,633'' pour une amélioration de 34%.

Tableau 5.8 : Résultats de l'analyse comparative des structures avec la charge concentrée

|                    | Contrainte max<br>Von Mises (Ksi) | Déflexion<br>(po) |
|--------------------|-----------------------------------|-------------------|
| Structure Alutrec  | 31,5                              | 5,578             |
| Nouvelle structure | 19,4                              | 3,633             |
| Gain               | 38 %                              | 34 %              |

Maintenant, le tableau 5.9 montre les mêmes résultats mais pour le cas avec la charge répartie. Malencontreusement, la contrainte est passée de 19,1 Ksi à 23,1 Ksi, soit une augmentation de 20 %. Heureusement, cette augmentation non-négligeable de la contrainte maximale se retrouve dans la partie supérieure de la structure. Dans cette partie, la contrainte est en compression. Les contraintes en compression sont moins dommageables en fatigue ce qui amoindrit l'effet non-désiré de cette augmentation. La déflexion a été réduite de 28 %.

Tableau 5.9 : Résultats de l'analyse comparative avec la charge répartie

|                    | Contrainte max<br>Von Mises (Ksi) | Déflexion<br>(po) |
|--------------------|-----------------------------------|-------------------|
| Structure Alutrec  | 19,1                              | 4,165             |
| Nouvelle structure | 23,1                              | 2,995             |
| Gain               | -20 %                             | 28 %              |

## **5.8 Conclusion**

La conception de la coque a été un élément important du projet. Les résultats d'analyses faites au cours de cette étape ont souvent été très difficiles à interpréter. À certains moments, il a même été nécessaire de valider les résultats douteux avec Abaqus pour s'assurer de la validité de ceux ci.

Dans son ensemble, le cahier des charges a été respecté pour la conception de la coque. La déflexion de la remorque a été réduite de plus de 28%. Le seul point négatif est que la contrainte maximale obtenue pour le cas de charge répartie est supérieure à celle fixée dans le cahier des charges. Par contre, à 3,5'', l'épaisseur de la tête de la remorque est plus basse que celle prévue à 5''. Avec une tête épaisse de 5'', la contrainte serait certainement plus basse. Il a été convenu avec Alutrec de laisser la tête à 3,5'' et de poursuivre le projet. Plus tard dans le projet, des ajustements seront faits si le besoin s'impose. Il ne faut pas oublier que l'objectif principal du projet a été dépassé. La masse de la structure est passée de 6115 livres à 4370 livres, soit une réduction de 1745 livres (28%).



## Chapitre 6

### Conclusion

Le but de ce travail était de concevoir une structure de remorque ultralégère en aluminium. L'emploi de la coque, comme élément structural, a été imposé par la compagnie Alutrec. Cette requête est justifiée, entre autres, par l'avantage concurrentiel qu'elle offre. L'objectif ultime était de réduire la masse de la structure de 1500 livres. Pour en arriver à ces fins, l'analyse d'une remorque faite par la compagnie Alutrec a été nécessaire. Cette étude a révélé que la plate-forme n'était pas profitable à la structure principale. Par conséquent, une optimisation structurale pouvait être apportée au niveau de l'intégration de la plate-forme à la structure principale.

L'évaluation de la remorque de la compagnie Alutrec a été faite afin d'établir son comportement lors de différents cas de chargement. La rigidité et la résistance ont été les critères d'évaluation du comportement. Les valeurs obtenues lors de cette évaluation ont servi de valeurs cibles pour la conception de la nouvelle structure. La nouvelle structure devait être plus légère tout en étant aussi résistante.

La plate-forme doit maintenant remplir une double fonction. La première est de supporter la marchandise et l'autre est d'agir comme membre de la structure principale. Un design de plate-forme utilisant des extrusions d'aluminium a été fait et il remplit adéquatement les deux fonctions précitées.

De plus le design comporte une coque qui a remplacé les deux poutres en I de la structure principale. Un profil optimal des courbes de la coque a été réalisé à l'aide d'un programme destiné à cette fin. Mis à part le niveau de contraintes inquiétant dans la partie transitoire de la tête, la coque remplit tous les besoins. Une attention particulière devra être portée à cette région de la structure lors des essais du prototype. Il ne faudrait aussi souligner l'effet qu'a le soudage sur la résistance des matériaux, en particulier l'aluminium. Le soudage crée une zone affectée thermiquement qui altère les caractéristiques mécaniques. Les zones de



soudage devront être surveillées attentivement lors de l'étape de prototypage. En conclusion, la structure finale est plus légère de 1745 livres que la structure originale de la remorque. L'objectif d'alléger de 1500 livres est dépassé d'environ 16 %.

Ce travail n'est que la première partie du projet. D'autres tâches seront nécessaires pour le conclure. Des analyses plus détaillées doivent être accomplies sur les régions les plus contraintes. Il faudra aussi définir plus en détail les méthodes d'assemblage. Il faut entre autres, définir la méthode de soudage la plus adéquate, compte tenu de la quantité de soudure à faire. Aussi, d'autres éléments de la remorque restent à concevoir, par exemple, le pare-chocs arrière ainsi que les longerons latéraux. Des analyses dynamiques de la structure devront être achevées afin de mieux connaître le comportement de la nouvelle structure. Par la suite, la construction d'un premier prototype devra être faite. Des tests statiques hors- route seront nécessaires. En toute fin, des tests dynamiques sur route seront essentiels avant la mise en marché.

## Bibliographie

- [1] Gere James M., « *Mechanics of Material* », Brooks/Cole, 2001. 926p.
- [2] Dhatt Gouri, Touzot Gilbert, Lefrançois Emmanuel, *Méthode des éléments finis*, Hermes Science, 2005. 601p.
- [3] C. Hibbeler, « *Mechanics of Material seventh edition* », Pearson Prentice Hall, 2008. 910p.
- [4] Robert C. Juvinall / Kurt M. Marshek, « *Fundamentals of Machine Component Design* », Wiley & Sons, 2000. 888p.
- [5] <http://www.cymat.com/index.html>
- [6] <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0012/Banhart-0012.html>
- [7] <http://www.panelprojects.com/index.htm>
- [8] <http://www.slv.vic.gov.au/miscpics/0/2/1/doc/mp021286.shtml>
- [9] <http://www.engineersedge.com/extrusion.htm>
- [10] Ministère des transports du Québec, Guide des normes de charges et dimensions des véhicules, Bibliothèque nationale du Québec 2004, 28p.
- [11] Augustin Gakwaya, Méthode des éléments finis en CMAO, Notes de cours, 2006, 286p.

# Annexe A

## Exemple de calcul de cisaillement dans une poutre

### SAMPLE PROBLEM 4.2 Determine Shear Stress Distribution

Determine the shear stress distribution for the beam and loading shown in Figure 4.18. Compare this with the maximum bending stress.

132

Chapter 4 ■ Static Body Stresses

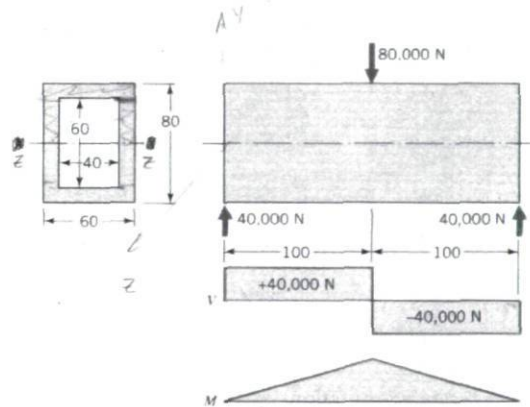


FIGURE 4.18  
Sample Problem 4.2. Beam shear stress distribution. Note: all dimensions are in millimeters; section properties are  $A = 2400 \text{ mm}^2$ ;  $I_x = 1840 \times 10^6 \text{ mm}^4$ .

### SOLUTION

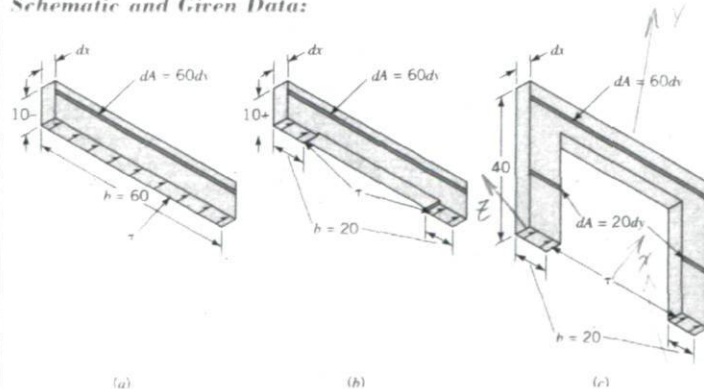
**Known:** A rectangular beam with given cross-sectional geometry has a specified central load.

**Find:** Determine the shear stress distribution and the maximum bending stress.

**Assumptions:**

1. The beam is initially straight.
2. The beam is loaded in a plane of symmetry.
3. The shear stress in the beam is uniform across the beam width at each location from the neutral axis.

**Schematic and Given Data:**



**Analysis:**

1. With reference to Figure 4.14 and Eq. 4.12, it is known at the outset that  $\tau = 0$  at the top and bottom surfaces. This gives a start in plotting the shear stress distribution in Figure 4.20. As the imaginary parallel

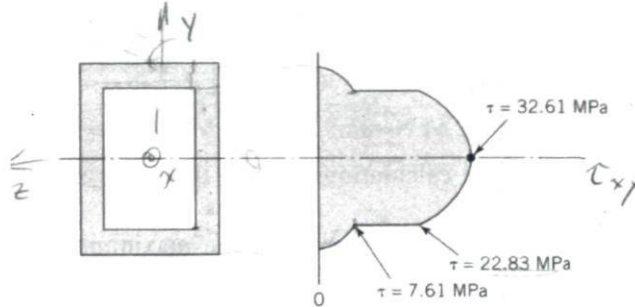


FIGURE 4.20

Plot of shear stress distribution—Sample Problem 4.2.

saw cuts (described in connection with Figure 4.14) proceed down from the top to increasing depth, the areas exposed to the slightly unbalanced bending stresses increase, thereby causing the compensating shear stress at the bottom of the imaginary segment to increase parabolically. This continues to a saw cut depth of 10 mm. Figure 4.19a illustrates the imaginary segment just before the saw cuts break through the interior surface of the section. The shear stress at this level (which acts on bottom area  $60 \cdot dx$ ) is calculated as

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{V}{Ib} \int_{y=y_0}^{y=c} y \, dA = \frac{40,000}{(1.840 \times 10^6)(60)} \int_{y=30}^{y=40} y(60 \, dy) \\ &= \frac{40,000}{(1.840 \times 10^6)(60)} (60) \left[ \frac{y^2}{2} \right]_{y=30}^{y=40} = 7.61 \text{ N/mm}^2, \text{ or } 7.61 \text{ MPa}\end{aligned}$$

2. With a slightly deeper saw cut, the inner surface is broken through, and the area over which the shear stress acts is suddenly reduced to  $20 \, dy$ , as shown in Figure 4.19b. The unbalanced bending forces acting on the segment sides are virtually unchanged. Thus, the only term that changes in Eq. 4.12 is  $b$ , which is reduced by a factor of 3, thereby giving a shear stress three times as high, or 22.83 MPa.
3. As the saw cut depth increases until it reaches the neutral axis, the area over which the shear stress acts remains the same, while greater and greater imbalances build up as additional areas  $dA$  are exposed. But, as shown in Figure 4.19c, these added areas  $dA$  are only one-third as large as those in the top portion of the section. Hence, the increased shear stress at the neutral axis is not as great as might at first be expected. When using Eq. 4.12 to find  $\tau$  at the neutral axis, note that two integrals are involved, one covering the range of  $y$  from



0 to 30 mm and the other from 30 to 40 mm. (The latter integral, of course, has already been evaluated).

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{V}{Ib} \int_{y=v_0}^{y=c} y \, dA = \frac{40,000}{(1.840 \times 10^6)(20)} \left[ \int_{y=0}^{y=30} y(20 \, dy) + \int_{y=30}^{y=40} y(60 \, dy) \right] \\ &= \frac{40,000}{(1.840 \times 10^6)(20)} (20) \left[ \frac{y^2}{2} \right]_{y=0}^{y=30} + 22.83 \\ &= 32.61 \text{ N/mm}^2, \text{ or } 32.61 \text{ MPa}\end{aligned}$$

These calculations enable the shear stress plot in Figure 4.20 to be drawn.

4. By way of comparison, the maximum bending stresses occur in the top and bottom surfaces of the beam, halfway along its length, where the bending moment is highest. Here, the bending stress is computed as

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{Mc}{I} = \frac{(40,000 \times 100)(40)}{1.84 \times 10^6} = 86.96 \text{ N/mm}^2 \\ &= 86.96 \text{ MPa}\end{aligned}$$

*Comment:* Recalling that the shear stress must be zero at the exposed inner surface of the section, it is apparent that the evenly distributed shear stress assumed in Figure 4.19a is incorrect, and that the shear stresses in the outer supported portions of the section at this level will be higher than the calculated value of 7.61 MPa. This is of little importance because, to the degree that shear stresses are of concern, attention will be focused at the level just below, where the calculated value of  $\tau$  is three times as high, or at the neutral axis where it is a maximum.

[4] Robert C. Juvinall / Kurt M. Marshek, «*Fundamentals of Machine Component Design*», Wiley & Sons, 2000. 888p.

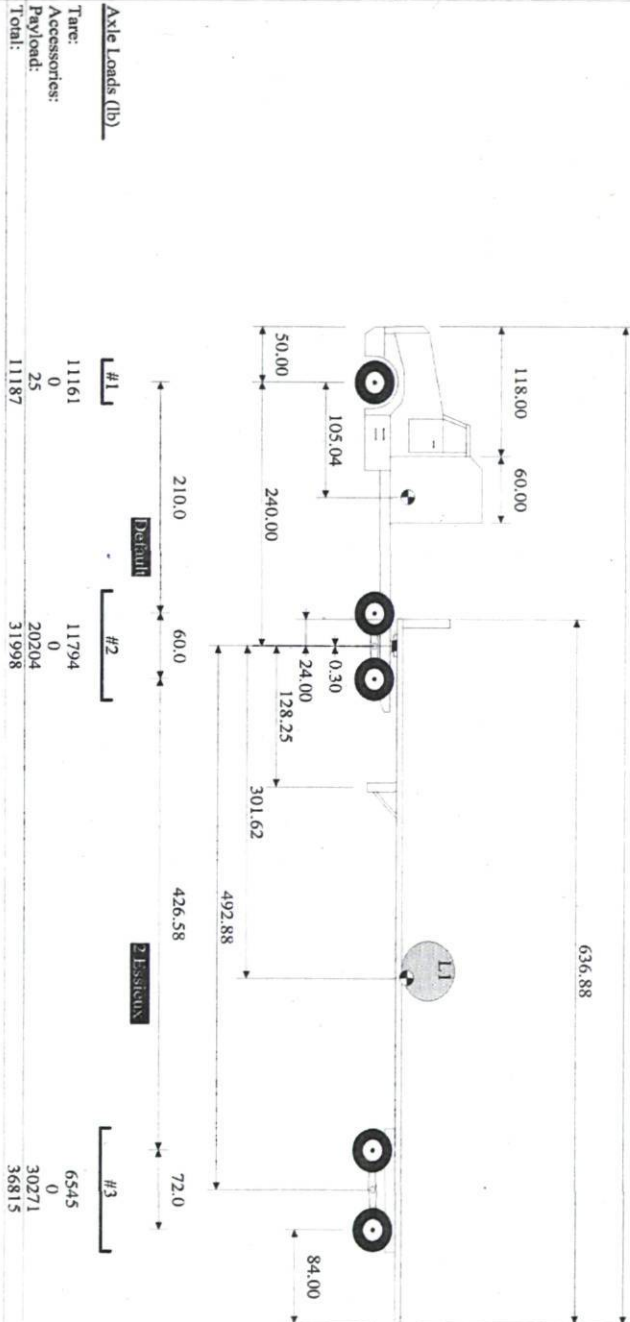
# Annexe B

## Répartition de la masse

All lengths in inches and weights in pounds

Overall Length: 902.58

Printout of Load Xpert softw



|                   | Unit 1 (Tractor) | Unit 2 (Trailer) | Vehicle |
|-------------------|------------------|------------------|---------|
| Tare weight (lb): | 19841.4          | 9658.2           | 29499.6 |
| Accessories (lb): | 0.0              | 0.0              | 0.0     |
| Payload (lb):     | 0.0              | 50500.0          | 50500.0 |
| Total (lb):       | 19841.4          | 60158.2          | 79999.6 |

Title: **2essi 53' (72")**

Company: Alutrec Inc.  
 Date: 04/07/26  
 By:   
 Dwg No.:   
 36815

## Annexe C

### Programme de traçage de l'effort tranchant et du moment fléchissant pour le problème de la poutre simplement supportée

Problème de la poutre simplement supportée avec une force concentrée

```
> restart;
```

Donnés de la poutre (seul la partie entre les appuis est considérée)

Longueur=475 po, position de la charge a=278 po, b=L-a

```
> L:=492: a:=278: b:=L-a:
```

Force de 50 500 lbs

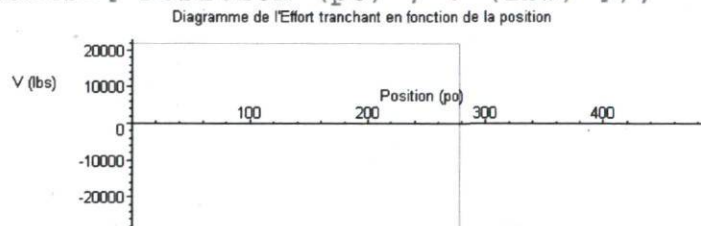
```
> P:=50500:
```

Effort tranchant:  $V_g$ = côté gauche de la poutre,  $V_d$ = côté droit de la poutre

```
> Vg:=P*b/L*(Heaviside(x)-Heaviside(x-278)): Vd:=-
```

```
P*a/L*(Heaviside(x-278)-Heaviside(x-492)):
```

```
> plot([Vg,Vd],x=0..492,color=[red,red],title="Diagramme de  
l'Effort tranchant en fonction de la  
position",labels=["Position (po)","V (lbs)"]);
```



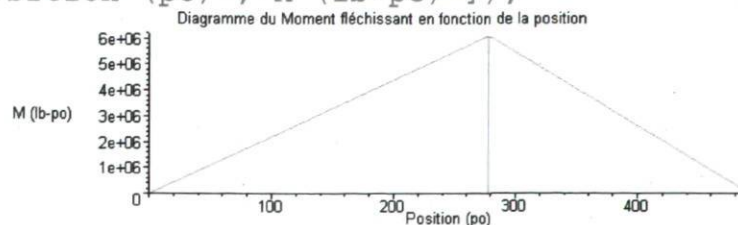
Moment Fléchissant  $M_g$ = côté gauche de la poutre,  $M_d$ = côté droit de la poutre

```
> Mg:=P*b*x/L*(Heaviside(x)-Heaviside(x-278)): Md:=P*a*(L-
```

```
x)/L*(Heaviside(x-278)-Heaviside(x-492)):
```

```
>
```

```
> plot([Mg,Md],x=0..492,color=[red,red],title="Diagramme du  
Moment fléchissant en fonction de la position",  
labels=["Position (po)","M (lb-po)"]);
```



## Problème de la poutre simplement supportée avec une force répartie

```
> restart;
```

Données de la poutre (seul la partie entre les appuis est considérée)

Longueur=492 po,

```
> L:=492:
```

Force de 50 500 lbs réparti entre les 2 appuis(492po)

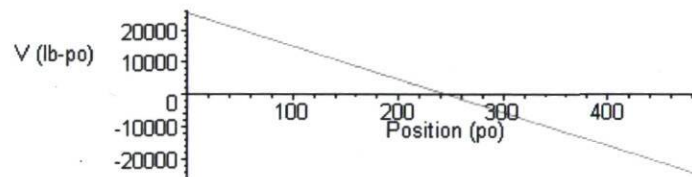
```
> q:=50500/492:
```

Effort tranchant:

```
> V:= ( (q*L/2) - q*x) * (Heaviside(x) - Heaviside(x-492)):
```

```
> plot(V, x=0..492, color=[red], title="Diagramme de l'Effort tranchant en fonction de la position", labels=["Position (po)", "V (lb-po)"]);
```

Diagramme de l'Effort tranchant en fonction de la position



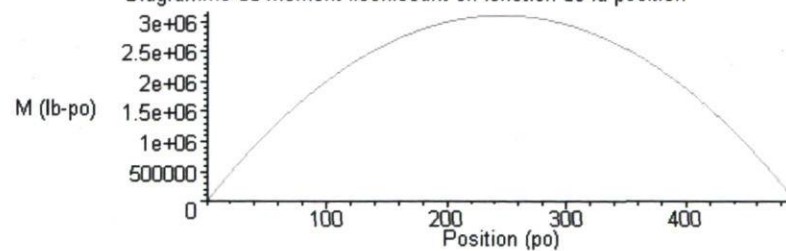
Moment Fléchissant

```
> M:= ( (q*L*x/2) - (q*x^2)/2) * (Heaviside(x) - Heaviside(x-492)):
```

```
>
```

```
> plot(M, x=0..492, color=[red], title="Diagramme du Moment fléchissant en fonction de la position", labels=["Position (po)", "M (lb-po)"]);
```

Diagramme du Moment fléchissant en fonction de la position





## Annexe D

### Calcul du poids de la plate-forme faite de mousse d'aluminium.

Hypothèse :

Densité de l'aluminium :  $\rho = 0,1 \text{ lb/po}^3$

Densité relative de la mousse d'aluminium :  $\rho_{rel} 20\%$

Dimension de la plate-forme : 3,5 po x 100po x 636 po.

Équations :

Poids de la plate-forme :  $P = (L \times l \times e) \times \rho \times \rho_{rel} = 4452 \text{ lbs}$

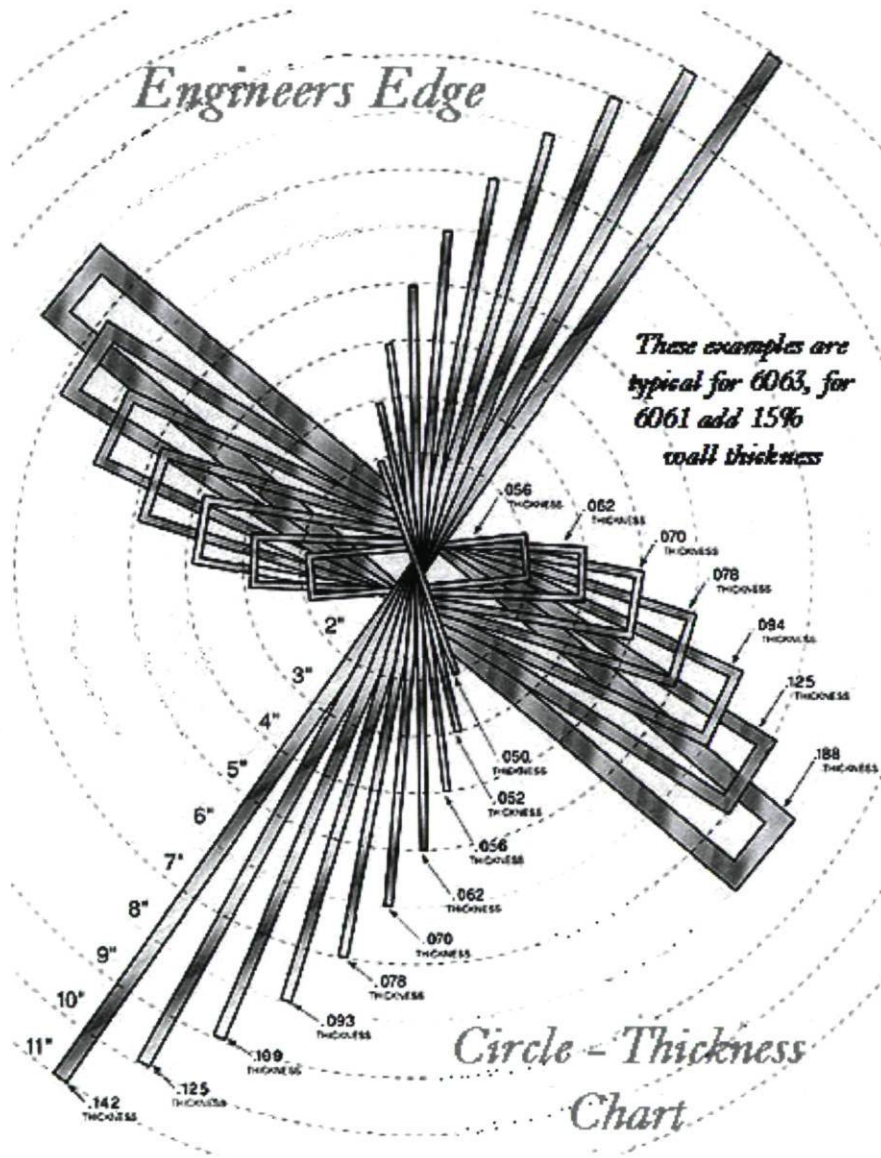
Conclusion : Le poids de la plate-forme faite en mousse métallique est de 4452 livres.

Référence :

<http://www.cymat.com/flatPanel.html>

# Annexe E

## Charte d'extrudabilité



## Annexe F

### Programme de calcul de contraintes dans la structure

## Calcul de la contrainte dans le profil final de la coque

Remarques: Les diagrammes illustrent seulement la région de la remorque entre les appuis. Les parties excédantes aux extrémités ne sont pas considérées dans ces diagrammes. Donc le domaine se limite de 0 à 492 pouces tandis que la remorque mesure 638 pouces (53 pieds). 36 pouces sont retranchés à l'avant ainsi que 108 pouces à l'arrière.

```
> restart;
```

Équation de la partie inférieure de la coque. Établi avec la fonction Heaviside et l'équation d'un cercle  $R^2 = \sqrt{(X-C_x)^2 + (Y-C_y)^2}$ .

```
R1=50
```

```
R2=300
```

```
> d:=2.5+(0.25*(Heaviside(x)-Heaviside(x-41))+(-sqrt(50^2-(x-41)^2)+50.25)*(Heaviside(x-41)-Heaviside(x-59))+sqrt(300^2-(x-168.37)^2)-276)*(Heaviside(x-59)-Heaviside(x-168.37))+24*(Heaviside(x-168.37)-Heaviside(x-300))+sqrt(300^2-(x-300)^2)-276)*(Heaviside(x-300)-Heaviside(x-375))+(-sqrt(50^2-(x-387)^2)+63.25)*(Heaviside(x-375)-Heaviside(x-387))+13.25*(Heaviside(x-387)-Heaviside(x-492))):
```

```
> plot(d,x=0..492):
```

Partie supérieure et inférieure de la plateforme et repositionnement de la coque.

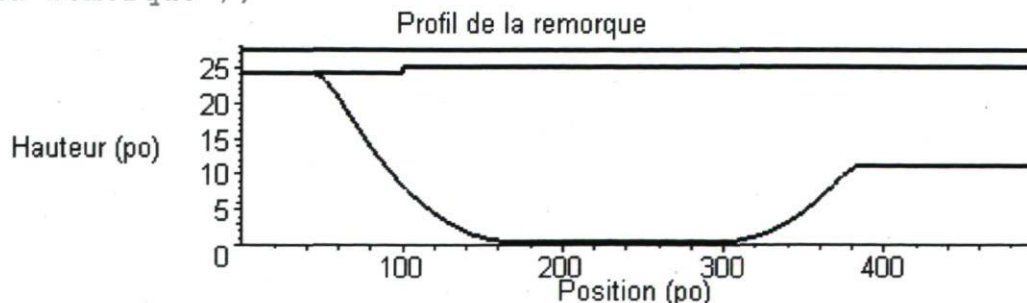
```
> c:=27.01-d: pi:= 24.26*(Heaviside(x)-Heaviside(x-100))+25.26*(Heaviside(x-100)-Heaviside(x-492)):
```

```
ps:=27.5:
```

## Tracage de la remorque

```
>
```

```
plot([pi,ps,c],x=0..492,color=[black,black,black],thickness=[2,2,2],labels=["Position (po)","Hauteur (po)"],title="Profil de la remorque");
```



## Calcul de l'effort tranchant et du moment fléchissant Charge de 50 500 lbs concentrée à 277 po(a).

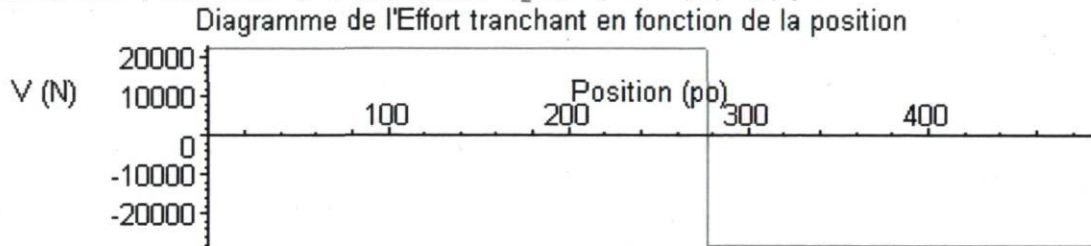
```
> P:=50500: L:=492: a:=277: b:=L-a:
```

Effort tranchant:  $V_g$ = côté gauche de la poutre,  $V_d$ = côté droit de la poutre

```
> Vg:=P*b/L*(Heaviside(x)-Heaviside(x-277)):
```

```
Vd:=-P*a/L*(Heaviside(x-277)-Heaviside(x-492)):
```

```
> plot([Vg,Vd],x=0..492,color=[red,red],title="Diagramme de  
l'Effort tranchant en fonction de la  
position",labels=["Position (po)","V (N)"]);
```

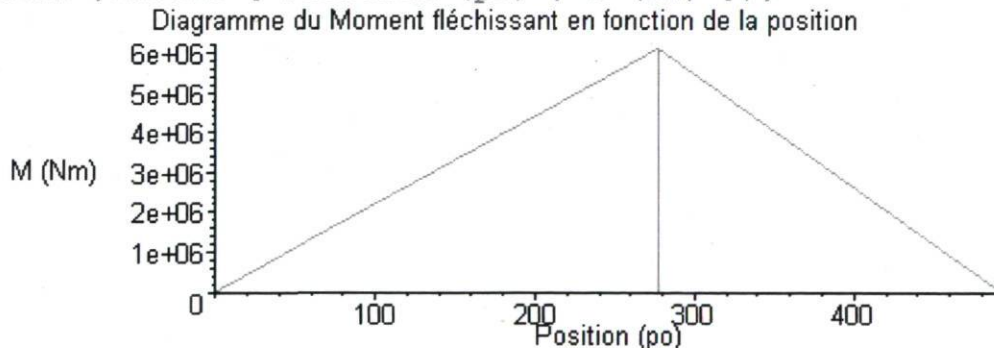


Moment Fléchissant  $M_g$ = côté gauche de la poutre,  $M_d$ = côté droit de la poutre

```
> Mg:=P*b*x/L*(Heaviside(x)-Heaviside(x-277)): Md:=P*a*(L-  
x)/L*(Heaviside(x-277)-Heaviside(x-492)):
```

```
>
```

```
> plot([Mg,Md],x=0..492,color=[red,red],title="Diagramme du  
Moment fléchissant en fonction de la  
position",labels=["Position (po)","M (Nm)"]);
```



## Charge de 50 500 lbs réparti de 0 à 475 po.

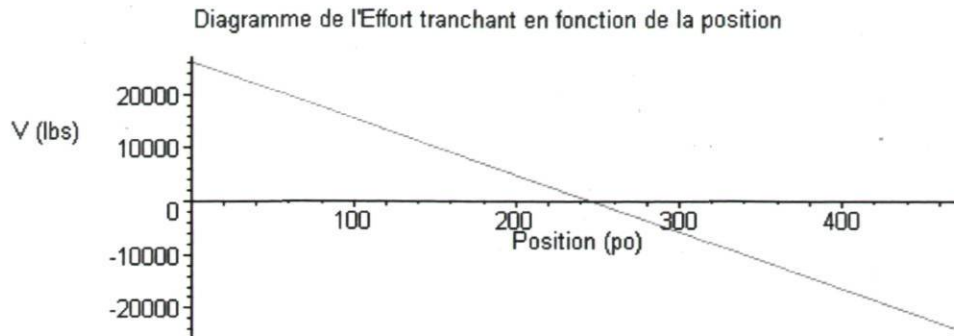
```
> q:=50500/475:
```

Effort tranchant:

```
> V:=(q*L/2) - q*x*(Heaviside(x)-Heaviside(x-475)):
```

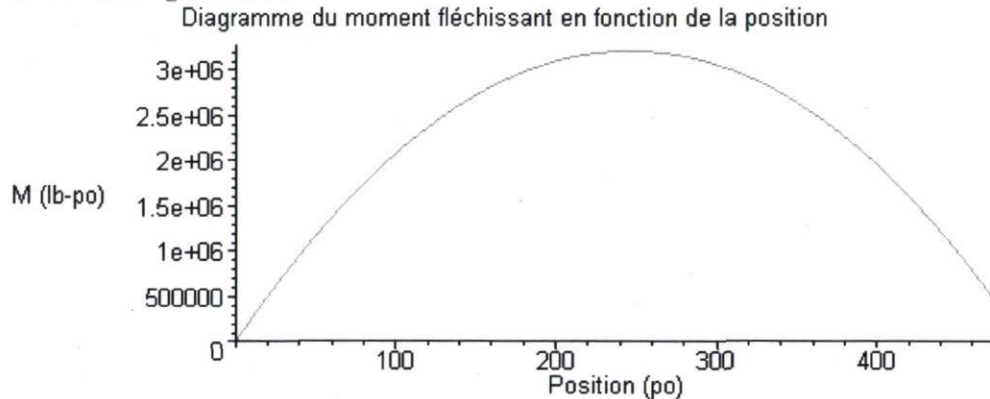
```
> plot(V,x=0..475,color=[red],title="Diagramme de l'Effort  
tranchant en fonction de la position",labels=["Position  
(po)","V (lbs)"]);
```





### Moment fléchissant

```
> M:=((q*L*x/2) - (q*x^2)/2) * (Heaviside(x) - Heaviside(x-475)) :
> plot(M,x=0..475,color=[red],title="Diagramme du moment
fléchissant en fonction de la position",labels=["Position
(po)", "M (lb-po)"]);
```



>  
>

## Détermination de l'inertie de la structure en fonction de la position axiale.

La partie avant de la plate-forme (jusqu'à 100 pouces) est constituée d'extrusions orientées longitudinalement. L'indice "plate\_a" accompagne les caractéristiques des extrusions de cette section.

On retrouve quatre extrusions #1, quatre extrusions #2, deux extrusions #3.

Caractéristiques des extrusions avant. Inertie:  $I=po^4$ , Centroïde:  $=C(po)$ , Aire:  $=A(po^2)$

```
> Iplate_a1:=12.368: Cplate_a1:=1.750: Aplate_a1:=6.129:
```

```
Iplate_a2:=2.952: Cplate_a2:=1.200: Aplate_a2:=2.513:
```

```
Iplate_a3:=6.973: Cplate_a3:=1.630: Aplate_a3:=4.160:
```

Calcul de l'inertie totale correspondante et du centroïde pour la plateforme (partie avant 100po)

```
> Aplate_a:=4*Aplate_a1+4*Aplate_a2+2*Aplate_a3:
```

```
> Iplate_a:=4*Iplate_a1+4*Iplate_a2+2*Iplate_a3;
```

```
lplate_a := 75.226
```

```
>
Cplate_a:=(Cplate_a1*4*Aplate_a1+Cplate_a2*4*Aplate_a2+Cplate
_a3*2*Aplate_a3)/Aplate_a;
Cplate_a := 1.597812908
```

Le reste "plate\_b" de la plate-forme est constitué d'extrusions orientées transversalement (de 100po à 492po). Seule la partie supérieure et la partie inférieure de ces extrusions sont considérées dans le calcul. Le dessus est .100" d'épais et le dessous est 0.080" pouce. Aire dans section: A (po^2) ->épaisseur de la paroi de l'extrusion \* la largeur de la remorque (<100po). Centroïde de cette section

```
> Aplate_bdessus:=0.1*100: Aplate_bdessous:=0.080*100:
Cplate_bdessus:=0.100/2: Cplate_bdessous:=(-0.080/2)+2.5:
> Aplate_b:=Aplate_bdessus+Aplate_bdessous:
Calcul de l'inertie totale correspondante et du centroïde pour la plate-forme (partie arrière
>100po). I=bh^3/12+Ac^2
Calcul du centroïde: C= somme ci*Ai / somme Ai
> Cplate_b:=(1/(Aplate_b))*(
(Aplate_bdessus*Cplate_bdessus)+(Aplate_bdessous*Cplate_bdess
ous) );
Cplate_b := 1.121111111
```

```
> Iplate_bdessus:=(100*0.100^3)/12:
Iplate_bdessous:=(100*0.080^3)/12:
> Iplate_b:=Iplate_bdessus+((Cplate_b-
Cplate_bdessus)^2)*Aplate_bdessus +
Iplate_bdessous+((Cplate_bdessous-
Cplate_b)^2)*Aplate_bdessous;
Iplate_b := 25.82637778
```

Calcul de l'inertie de la coque

La coque est constituée de 2 côtés verticaux ainsi que son dessous de 50po de large (horizontal).

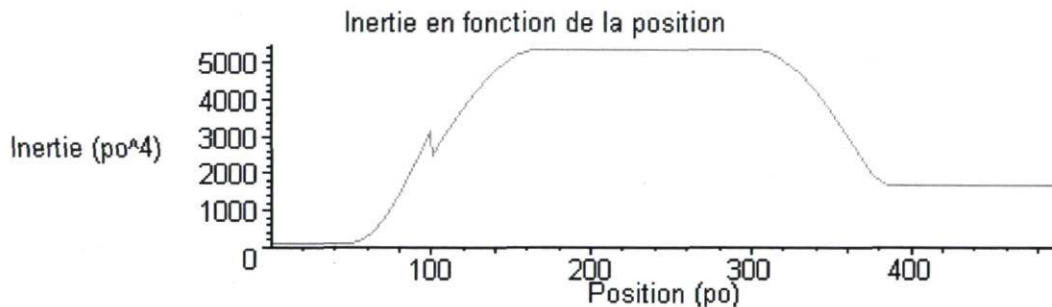
```
> Icoque_vert:=2* (0.25*(d-2.5)^3)/12:
Icoque_hori:=(50*0.25^3)/12: Acoque_vert:=2*0.25*(d-2.5):
Acoque_hori:=0.25*50:
> Ccoque_vert:=((d-2.5)/2)+2.5: Ccoque_hori:=d+(0.25/2):
> Acoque:=Acoque_vert+Acoque_hori:
>
Ccoque:=(1/Acoque)*((Acoque_vert*Ccoque_vert)+(Acoque_hori*Cc
oque_hori)):
> Icoque:=Icoque_vert+((Ccoque-
Ccoque_vert)^2)*Acoque_vert+Icoque_hori+((Ccoque_hori-
Ccoque)^2)*Acoque_hori:
> plot(Ccoque,x=0..492):
```

Calcul de l'inertie totale et du centroïde

La fonction heaviside est utilisée car l'inertie totale est calculée avec l'inertie de la plateforme avant et celle de la coque pour les 100 premiers pouces tandis que pour le reste on utilise l'inertie de la plateforme arrière et celle de la coque.

Aire totale de la section de la structure.

```
> Aa:=Aplate_a+Acoque:
> Ab:=Aplate_b+Acoque:
> C:=( (1/Aa)* ( (Acoque*Ccoque)+(Aplate_a*(Cplate_a)) )
) * (Heaviside(x)-Heaviside(x-100)) + ( (1/Ab)* (
(Acoque*Ccoque)+(Aplate_b*(Cplate_b)) ) ) * (Heaviside(x-100) -
Heaviside(x-492)) :
> plot(C,x=0..492):
> II:=(Icoque+Acoque*((Ccoque-C)^2)+Iplate_a+Aplate_a*((C-
(3.5-Cplate_a))^2))* (Heaviside(x)-Heaviside(x-
100)) + (Icoque+Acoque*((Ccoque-C)^2)+Iplate_b+Aplate_b*((C-
(2.5-Cplate_b))^2))* (Heaviside(x-100)-Heaviside(x-492)) :
> plot(II,x=0..492,labels=["Position (po)", "Inertie
(po^4)"],title="Inertie en fonction de la position" );
>
```



>  
Calcul de vérification de la valeur de l'inertie pour la partie centrale.  
Comparaison de l'inertie calculée au paravent avec un calcul simplifié de l'inertie au centre de la remorque.

```
> c1:=0.05: c2:=2.46: c3:=2.5+12: c4:=26.375:
> a1:=0.1*100: a2:=0.08*100: a3:=2*0.25*24: a4:=50*0.25:
> A:=a1+a2+a3+a4:
> cbarre:=(1/A)* ( (a1*c1)+(a2*c2)+(a3*c3)+(a4*c4) ):
> I1:=(100*0.1^3)/12: I2:=(100*0.080^3)/12:
I3:=(2*0.25*24^3)/12: I4:=(50*0.25^3)/12:
> Ibarretest:=I1+((cbarre-c1)^2)*a1+I2+((cbarre-
c2)^2)*a2+I3+((c3-cbarre)^2)*a3+(I4+((c4-cbarre)^2)*a4);
Ibarretest := 5385.678432

> II_250:=subs(x=250,II): evalf(II_250);
5370.563951
```

Vérification faite, le calcul de l'inertie II semble bon à 0.0027 soit 0.27%.

```
> plot(Ibarretest):
```



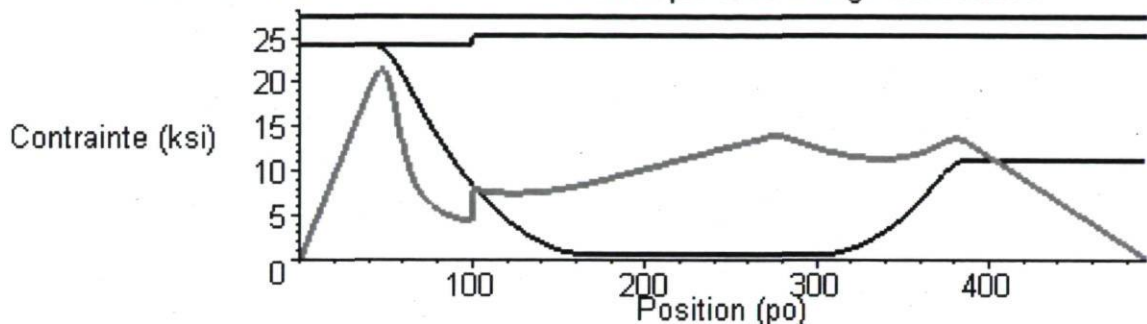
## Calcul de la contrainte dans la structure

### Charge concentrée

Contrainte axiale  $\sigma = MC/I$

```
> sigma_axi1 := (Mg*C/II) * (Heaviside(x) - Heaviside(x-277)) + (Md*C/II) * (Heaviside(x-277) - Heaviside(x-492));  
> plot( [sigma_axi1/1000, ps, pi, c], x=0..492,  
color=[red,black,black,black], thickness=[3,2,2,2], labels=["Position (po)", "Contrainte (ksi)"], title="Distribution de la  
contrainte sur la remorque avec charge concentrée" );
```

Distribution de la contrainte sur la remorque avec charge concentrée



### Charge répartie

Contrainte axiale  $\sigma = MC/I$

```
> sigma_axi2 := (M*C/II) :  
> plot( [sigma_axi2/1000, ps, pi, c], x=0..492,  
color=[red,black,black,black], thickness=[3,2,2,2], labels=["Position (po)", "Contrainte (ksi)"], title="Distribution de la  
contrainte sur la remorque avec charge réparti" );
```

Distribution de la contrainte sur la remorque avec charge réparti

