

République algérienne démocratique et populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud MAMMERY DE TIZI-OUZOU

Faculté de Génie de la Construction

Département de Génie Mécanique

Projet de Fin d'Etudes

*En vu de L'obtention du
Diplôme de master en Génie Mécanique
Option : Construction Mécanique*

Thème :

***Vérification et optimisation de la structure autoportante
d'un autobus SNVI de type 100L6 et implantation d'un kit
de bouteilles de GNC***

Proposé par : chef de projet



Mr. SGHIR.Y
(SNVI de ROUIBA)

réalisé par :

Mr. IDDOU Djamel
Mr. TEKLAL Farid

Dirigé par:

Mr. SEDJAL.H (UMMTO)



Promotion: 2012-2013



**U
M
M
T
O**

Dédicaces



Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance à mes chères parents et, ma sœur, mes frères, ils n'ont pas hésité d'accepter mon rythme et reprendre présent à tout moment, alors je leur dédie ce travail.

Je le dédie aussi à tous mes amis

A mon binôme Farid et sa famille

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à sa réussite.

Djamel IDDOU

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents et toute ma famille

Mes amis surtout les constructeurs

Mon binôme et sa famille

Tous ceux qui ont participé d'une manière ou d'une autre

FARID TEKLA

Remerciements

En premier lieu, on remercie le bon Dieu de nous avoir donné la force, la volonté et le courage pour l'élaboration de ce travail.

En second, nos chers parents de nous avoir aidé pour arriver au terme de ce travail qui est le fruit de plusieurs années d'études.

On tient encore à remercier notre promoteur Mr. SEDJAL pour l'aide compétente qu'il nous a apportée et pour son encouragement. Son œil critique nous a été très précieux pour structurer le travail et pour améliorer la qualité des différents chapitres.

On remercie aussi notre encadreur Mr. SEGHIR pour bien vouloir nous encadrer et pour ses précieux conseils et orientations, son aide et son encouragement avec toute son équipe de la SNVI.

Nous sommes également très reconnaissant, à toute personne ayant contribué à la limite du possible du près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.

Chapitre I

Symbole	Désignation
SNVI	Société National des Véhicules Industriels
SONACOME	La SOCIETE NATIONALE de CONSTRUCTION MECANIQUE
DVI	Division des Véhicules Industriels
DFR	Division de la Fonderie Rouïba
DCR	Division de la Carrosserie Rouïba
DLS	Division Logistique et Service
UER	Unité Etude et Recherche
DFR	Direction Formation Rouïba
D.R.H	Direction des sources humaines
D.F.B	Direction des fabrications
D.M.I	Direction de maintenance industrielle
D.A.F	Direction administrative et financière
D.M.G	Direction des moyens généraux
D.A.A	Direction des achats et approvisionnements
D.T.C	Direction technique

Chapitre II

Symbole	Désignation
GNV	gaz naturel Pour véhicule
GNC	gaz naturel comprimé
GPL	gaz de pétrole liquéfiés
MWI	Motors Westport Innovations

Chapitre III

Symbole	Désignation
CAO	conception assistée par ordinateur
MEF	méthode des éléments finis
EDP	équations aux dérivées partielles
$u(x)$	déplacement d'un point matériel
σ	contrainte normale
r	forces externes
u	champ de déplacement
C	tenseur d'élasticité
V	Domaine (nombre fini d'éléments)
V_e	sous domaines
F_{ij}	force au nœud
E	module élastique

A	aire de la section
[K]	matrice de rigidité
[B]	matrice déformation-déplacement
[E]	matrice des propriétés du matériau (matrice constitutive)
dV	incrément de l'élément de volume V
L_{ext}	Travail extérieur
U_{def}	énergie de déformation élastique
[N]	matrice des fonctions de forme
{d}	vecteur des déplacements nodaux
w	déplacement latéral
{F ^e }	vecteur des forces nodales dans le système global d'axes
{f ^e }	vecteur des forces nodales dans le système local d'axes
[K ^e]	matrice de rigidité dans le système global d'axes
{U ^e }	vecteur des déplacements nodaux dans le système global d'axes
{u ^e }	vecteur des déplacements nodaux dans le système local d'axes

Chapitre V

Symbole	désignation	unités
σ_e	La limite élastique des matériaux des éléments assemblés	Mpa
$[\sigma]^s$	Contrainte admissible de cisaillement	Mpa
σ_{eq}	Contrainte résultante	Mpa
$[\sigma]^s$	Contrainte admissible de cordon de soudure	Mpa
σ_f	Contrainte de flexion	Mpa
τ_{cis}	Contrainte de cisaillement	Mpa
s	le coefficient de sécurité pour une charge statique	
As	aire de la section résistante de la partie fileté de boulon.	Mm ²
f_{ub}	la résistance maximale a la traction	Mpa
f_{yb}	la limite élastique.	Mpa
Γ_{mb}	le coefficient partiel de sécurité	
n	le nombre de boulons utilisés.	
N_{max}		KN
F	La charge appliquée	N
F_T	a résistance d'un boulon à la traction	N
M	La masse de réservoir	Kg
G	La gravité	m/s ²
F'	Charge appliquée de chaque coté de la structure	N
L	Longueur de la surface chargée	mm
e	Epaisseur de cordon de soudure	mm
As	aire de la section résistante de la partie fileté de boulon	Mm ²

Résumé

Le but de notre travail c'est de réaliser au moyen de logiciel solideworks une modélisation de la structure autoportante « carrosserie » de l'autobus 100L6 et de prévoir les modifications nécessaires à l'implantation optimisée d'un kit de bouteilles « réservoirs » de gaz naturel comprimé.

Sommaire

Dédicaces.....	I
Remerciement	II
Nomenclature.....	III
Résumé.....	VII
Sommaire.....	VIII
Liste des figures.....	XIII
Liste de tableaux.....	XV
Introduction générale	1
Chapitre I : Présentation et problématique	
I.1 Introduction	2
I.2 Historique.....	2
I.2.1 Berliet Algérie	2
I.2.2 SONACOM.....	2
I.2.3 La SNVI	3
I.3 Présentation de la D.V.1.....	4
I.4 Structures Fonctionnelles	4
I.5 Organigramme du complexe des véhicules industriels	5
I.6 Gammes de production de la SNVI	6
I.7 Identification fiscale des véhicules de transport en commun des personnes de transport en commun des personnes	7
I.7.1 Généralités	7
I.7.2 Classe I Autobus urbains	7
I.7.3 Classe II autobus ou autocars interurbains	8

I.7.4 Classe III Autocar de tourisme	8
I.8 Description du Bus 100L6	9
I.8.1 Dimension et poids	9
I.8.2 Fiche descriptive de 100L6	10
I.9 Problématique	12
 Chapitre II : pourquoi le GNC	
II.1 Généralités	13
II.2 Normes de sécurité	13
II.2.1 Pendant le ravitaillement	13
II.2.2 En cas de fuites	14
II.2.3 Cas d'incendie	14
II.3 Composants principaux	15
II.4 Gaz naturel comprimé et gaz naturel liquéfié	17
II.5 Une énergie intelligente pour le transport	17
II.6 Comment sont valorisées les émissions de CO ₂ ?	18
II.7 Le terrain de l'écologie.....	19
II.8 conclusion.....	19
 Chapitre III : Rappels Généraux Sur La Méthode Des Éléments Finis	
III.1 Introduction	20
III.2 Bref historique	21
III.2.1 La mécanique des milieux discrets	21
III.2.2 La mécanique des milieux continus	22
III.3 Applications	23
III.4 présentation générale de la Méthodes Des Éléments Finis.....	24
III.4.1 La modélisation des problèmes physiques.....	24
III.4.1.1 L'Analyse numérique	24

III.4.1.2 L'Informatique appliquée.....	24
III.5 Problèmes d'élasticité linéaire.....	24
III.6 Maillage.....	28
III.7 Forme des éléments classiques.....	29
III.8 Etapes d'analyse par la MEF.....	31
III.9 Connaissances requises pour la réalisation des logiciels MEF.....	33
III.10 Connaissances nécessaires à un utilisateur MEF.....	33
III.11 Analyse linéaire statique des barres articulées et des poutres.....	34
III.11.1 Déduction de la matrice de rigidité pour l'élément de barre.....	34
III.11.2 Déduction de la matrice de rigidité pour l'élément de poutre.....	37
III.12 Transformation des coordonnées du système local en système global.....	41
III.12.1 Transformation des forces du système local en système global.....	42
III.12.2 Déduction de la matrice de rigidité d'un élément de barre dans le système global d'axes.....	43
III.13 Application.....	44
III.14 Conclusion.....	49
Chapitre IV: Analyse de l'ossature d'autobus 100L6	
IV.1 Introduction	50
IV.2 Les unités de calcul	50
IV.3 Propriétés du matériau utilisé.....	50
IV.4 La géométrie de l'ossature d'autobus 100L6	51
IV.4.1 La face latérale gauche.....	51
IV.4.2 La face latérale droite	52
IV.4.3 L'ossature de pavillon	52
IV.5 Implantation de kit de bouteille de GNC	52
IV.5.1 Les différents éléments de réservoir de gaz GNC.....	52

IV.5.1.1 Les bouteilles de GNC.....	52
IV.5.1.2 Le berceau.....	53
IV.5.1.3 Le cache de réservoir	53
IV.5.2 Solutionne d'implantation de kit et de distribution de charge sur la structure	54
IV.6 Maillage et analyse de la structure.....	54
IV.6.1 Le but de l'analyse.....	54
IV.6.2 Le maillage.....	55
IV.6.3.1 Analyse de l'ossature pavillon.....	55
IV.6.3.2 Information sur le maillage.....	56
IV.6.3.3 Application des charges et les déplacements imposés.....	57
IV.6.3.4 Résultats de l'analyse	57
IV.6.4 Analyse de la face latérale gauche.....	59
IV.6.4.1 Information sur le maillage.....	59
IV.6.4.2 Application de charges et déplacements imposés.....	59
IV.6.4.3 Résultats de l'analyse	61
IV.6.5 Analyse de la face droite	62
IV.6.5.1 Information sur le maillage.....	62
IV.6.5.2 Application des charges et déplacements imposés.....	62
IV.6.5.3 Résultats de l'analyse.....	64
IV.7 Interprétation de tous les résultats.....	64
IV.8 Conclusion.....	65

Chapitre V: Proposition De La Solution

V.1 Introduction	66
V.2 L'explication du problème en vu de la RDM.....	66
V.2.1 Modélisation de l'arceau le plus sollicité en flexion	66
V.3 la solution proposée par la SNVI.....	69
V.4. Etudes des éléments qui portent le berceau et calcul de cordon de soudure.....	69

V.4.1 Calcul de la charge appliquée sur la pièce 7.....	71
V.5 Dimensionnement des boulons	74
V.6 Conclusion.....	75
Conclusion générale	76

annexes

Annexe A : Quelques fonctions de logiciel solidworks	77
Annexe B : Fiche technique de bus 100L6	79
Références bibliographique.....	82

Chapitre I

Figure. I.1 : Organigramme de la division des véhicules industriels.....	5
Figure. I.2 : Autobus urbain	7
Figure. I.3 : Autobus ou autocars interurbain	8
Figure. I.4 : Autocar de tourisme.....	8

Chapitre II

Figure. II.1 : 1 réservoir- 2 vannes d'arrêt et de sécurité VBE.....	16
---	----

Chapitre III

Figure.III.1 : Types d'éléments finis	30
Figure.III.2: Principales étapes pour une analyse par la Méthode des Eléments Finis	31
Figure.III.3: Elément de barre	34
Figure.III.4 : Les fonctions de forme pour un élément de barre à deux nœuds	36
Figure.III.5 : Elément de poutre.....	37
Figure.III.7 : système local et global de coordonnées.....	41
Figure.III.7: Forces nodales dans le système local et global d'axes de coordonnées	42
Figure.III.8: système de barres articulées	44

Chapitre IV

Figure. IV.1 : la structure autoportante d'autobus 100L6	51
Figure. IV.2 : la face latérale gauche.....	51
Figure. IV.3 : la face latérale droite.....	52
Figure. IV.4 : L'ossature pavillon	52

Figure. IV.5 : réservoir de gaz GNC	52
Figure. IV.6: le berceau pour le réservoir	53
Figure. IV.7 : le cache de réservoir enveloppé	53
Figure. IV.8 : assemblage réservoir, berceau et cache	53
Figure.VI.9 : Assemblage de kit sur la structure.....	54
Figure. IV.10 : maillage de pavillon.....	56
Figure. IV.11 : Le champ de contrainte dans l'ossature pavillon	57
Figure.IV.12 : le champ de déplacements dans l'ossature pavillon.....	58
Figure.IV.13 : Le champs de déformation dans l'ossature pavillon	58
Figure. IV.14 Le champ des déplacements dans la face latérale	61
Figure. IV.15: la face droite sous un chargement	62
Figure. IV.16 : Le champ des déplacements dans la face droite	64

Chapitre V

Figure.V.01. la chargement de l'arceau	67
Figure.V.02. la flèche maximale que subit l'arceau	67
Figure. V.03. le moment fléchissant	68
Figure.V.04. la contrainte normale que subit l'arceau	68
Figure. V.05. Solution de renforcement de l'arceau	69
Figure. V.06. La poutre la plus sollicitée en flexion	70
Figure. V.07. Représentation de cordon de soudure.....	70

Chapitre I

Tableau. I.1 : Gammes de production de la SNVI (Car et Bus)	6
Tableau. I.2: Gammes de production de la SNVI (Camions et véhicules Spéciaux)	6
Tableau. I.3: Dimension du Bus 100L6	9
Tableau. I.4: Poids du Bus 100L6	9

Chapitre III

Tableau.III.1: Les fonctions de forme.....	38
Tableau.III.2: tableau des résultats	45

Chapitre IV

Tableau. IV.1 : unités de calcul utilisées	50
Tableau. IV.2 : propriété de matériau utilisé	51
Tableau. IV.3 : les paramètres de maillage de l'ossature pavillon	56
Tableau. IV.4 : les paramètres de maillage de la face gauche.....	59
Tableau. IV.5 : les déplacements imposés sur la face gauche	60
Tableau. IV.6 : les charges appliquées sur la face gauche	60
Tableau. IV.7 : les paramètres de maillage de la face droite.....	62
Tableau. IV.8 : les déplacements imposés sur la face droite	63
Tableau. IV.9: Les charges appliquées droite	63

Chapitre V

Tableau. V.1 : les caractéristiques de la vis	74
--	----

Introduction Général

Introduction général

Le secteur du transport constitue aujourd'hui la colonne vertébrale de l'économie moderne, d'ailleurs parmi les caractéristiques les plus importantes des pays développés on trouve la grande mobilité de la marchandise et des personnes.

Pour le besoin du secteur de transport, la SNVI a conçu différents types de véhicules destinés à ce secteur, dont on trouve le Bus 100L6, ce Bus est conçu pour le transport urbain sur des distances moyennes. La conception de l'ossature de ce Bus est formée par un grand nombre d'éléments de petites dimensions réunis par des soudures.

La SNVI envisage de lancé un nouveau produit, qui est le bus 100L6 lui-même avec un moteur de GNC ,à cet effet, il faut apporter des modifications sur la structure de ce bus en lui implantant un kit qui porte la réserve de gaz GNC et en la renforçant afin qu'elle résiste à la charge de cette réserve qui vaut 1000Kg, Pour répondre à ça on est sensé de faire à l'aide de logiciel solideworks une conception de cette structure équipé d'une réserve de GNC et analyser cette structure pour voir toutes les zone dangereuse et les renforcer.

Ce travail qui est un mémoire de fin d'études est composé de cinq chapitres et d'une Introduction Générale et ainsi qu'une Conclusion Générale, ces chapitres sont les suivants :

Chapitre I : présentation et problématique ;

Chapitre II : Pourquoi le GNC ;

Chapitre III : Rappels Généraux Sur La Méthode Des Éléments Finis ;

Chapitre IV : Analyse de l'Ossature d'Autobus100L6 ;

Chapitre V : proposition de la solution.

Chapitre I :
Présentation Et
Problématique

I.1 introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter la société des véhicules industriels la SNVI ; ses différents types de produits et notamment des véhicules de transport en commun de personnes, puis nous allons faire une description technique de bus 100L6 –dans le quel le problème posé par la SNVI se situe.

I.2 Historique:

I.2.1 Berliet Algérie:

Le 02 juin 1958, la Société Française "BERLIET" entreprend la construction d'une usine de poids lourds, à 30 Km à l'est d'Alger (Rouïba) sur une superficie de 100 Hectares, dont 5,5 hectares couverts. Le 10 octobre 1958, l'usine a réalisé le premier véhicule BERLIET entièrement monté en Algérie.

En juin 1964, après l'indépendance, le gouvernement Algérien par l'intermédiaire de la caisse de développement, a pris une participation de 40% dans la société Berliet Algérie.

I.2.2 SONACOME:

La SONACOME est créée par l'ordonnance No 67/ 150 en 1967 dans le but de promouvoir et développer le secteur des industries mécaniques et d'exercer le monopole d'importation des produits mécaniques en Algérie.

Au titre de cette mission, elle lance 2,5 Milliards de Dinars pour l'édification du complexe industriel intégré dont celui des véhicules.

La politique adoptée par la SONACOME pour la mise en place de cet appareil de production est fondée sur les options suivantes:

- Création des complexes industriels aux produits à fabriquer.
- Promotion de l'industrie par l'utilisation et le développement de toutes les techniques de traitement de transformation des métaux (fonderie -forgeage -usinage -traitement thermique).
- Formation intensive des personnels, techniciens, ingénieurs, pour cela, la SONACOME à doté chaque complexe d'une usine, une école de formation à haut niveau d'intégration et de démarrage de la production, elle a également créé

de divisions de ces produits.

I.2.3 La SNVI :

Société Nationale des Véhicules Industriels dénommée SNVI suite au décret présidentielle N° 81-342 du 12 /12 /1981 et après la restructuration de la SONACOME.

La SNVI dont le siège se situe à Rouïba est composée de six (06) unités de production qui sont:

- DVI : Division Véhicules Industriels.
- DFR: Division Fonderie Rouïba.
- DCR: Division Carrosserie Rouïba.
- DLS: Division Logistique et Service.
- UER: Unité Etude et Recherche.
- DFR: Direction Formation Rouïba.

L'UER a pour mission de:

- Développer la gamme actuelle produit par le complexe véhicules industriels.
- Améliorer la qualité et la fiabilité de ce produit.
- Réduire les coûts de la participation.
- Mener des actions pour diversifier leurs sources d'approvisionnement.
- Mener des actions pour consolider les sous-traitants nationaux.

Son domaine d'activité concerne:

- Les châssis.
- La chaîne cinématique.
- La carbine.
- Les équipements.
- Les carrosseries autobus et autocars.

Afin de concrétiser ces objectifs, l'U.E.R mène les opérations suivantes:

- Calculs des systèmes.
- Etude de conception des nouveaux produits.
- Homologation.
- Fabrication et essais prototype.
- Mise en place des produits nouveaux par traitement de nomenclature.
- Standardisation et normalisation.
- Elaboration et exécution du plan produit. [1]

I.3 Présentation de la D.V.I :

La division Véhicule Industriel (D.V.I) est située dans la zone industrielle de Rouïba à 30 KM à l'est de la capitale avec une superficie de 100 hectares dont 177125 m² couverts, il comprend les bâtiments suivants avec leurs superficies:

- Mécanique :40625 m²
- Tôlerie emboutissage:32000 m²
- Montage camion:32000 m²
- Montage autobus:2700 m²
- Services généraux:7500 m²
- Polyester:9000 m²
- Administration :1 6000 m²
- Reception control :7500 m²

I.4 Structures Fonctionnelles:

La D.V.I est structurée en sept (07) directions:

- Direction des sources humaines. D.R.H
- Direction des fabrications. D.F.B
- Direction de maintenance industrielle. D.M.I
- Direction administrative et financière. D.A.F
- Direction des moyens généraux. D.M.G
- Direction des achats et approvisionnements. D.A.A
- Direction technique. D.T.C.[1]

I.5 Organigramme du complexe des véhicules industriels :

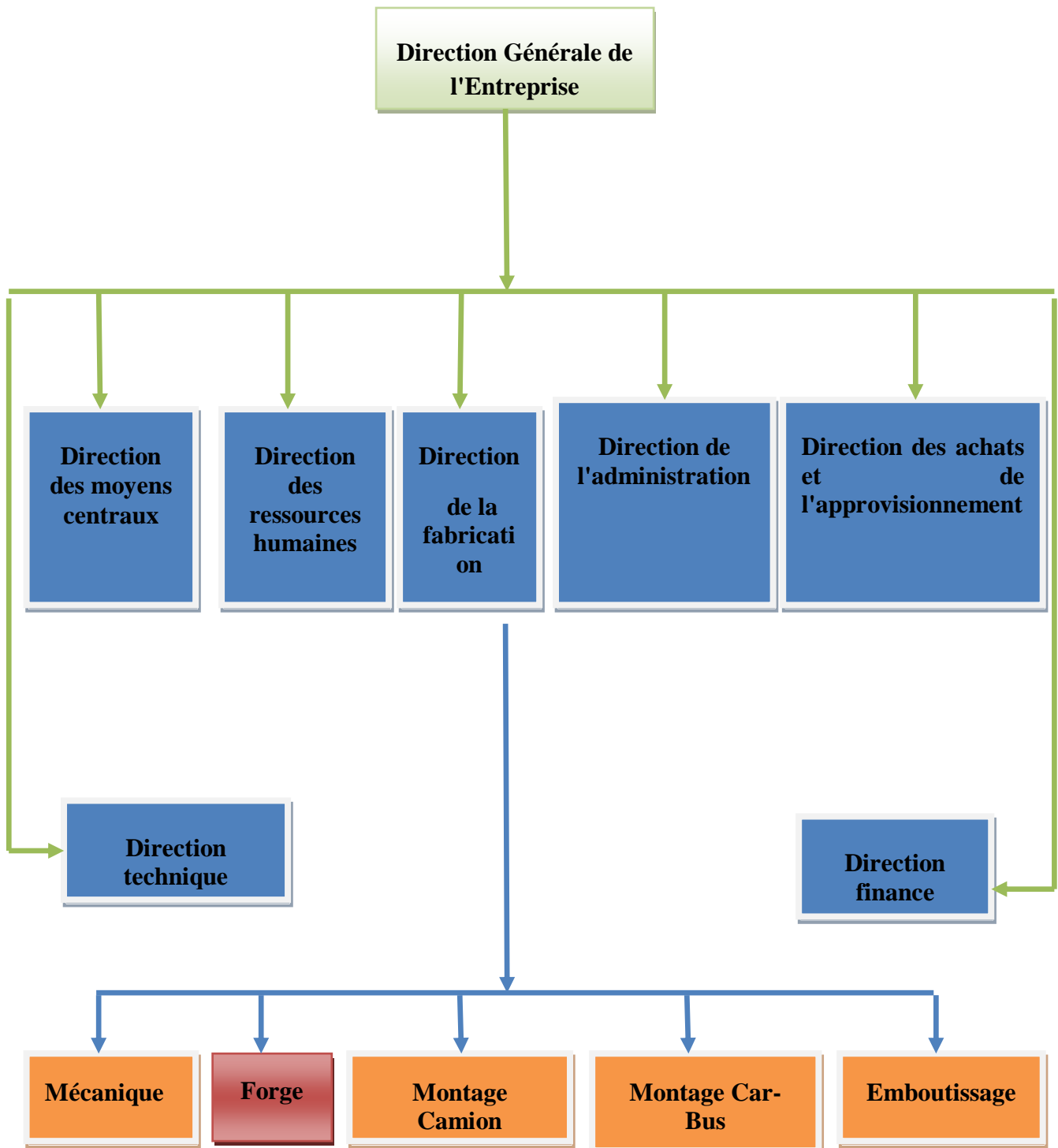


Figure. I.1: Organigramme de la division des véhicules industriels

I.6 Gammes de production de la SNVI :

Catégories	Gammes	Désignation	Type de véhicule
Car et Bus	Autocars	49L6	Autocar
	Autobus	100V8	Autobus
	Minicars	25L4	Minicar châssis mécanisé
	Minicars	1 8L4	Minicar châssis mécanisé
	Minibus	38L6	Minicar interurbain
	Minibus	70L6	Minibus urbain

Tableau. I.1 : Gammes de production de la SNVI (Car et Bus)

Catégories	Gammes	Désignation	Type de véhicule
Camions	Basse	K66	porteur 4 X 2
		cabine type k	porteur 4 X 2
		K120	porteur 4 X 2
		cabine type k	porteur 4 X 2
	Haute	B260 Cabine basculante	porteur tracteur 4 X 2
		C260	porteur tracteur 4 X 4
		C260	porteur tracteur 6 X 4
		T350 Camion	porteur 4 X 2
		B350	porteur 6 X 4
		Tracteur	tracteur 6 X 4
véhicules spéciaux	Militaire	M120	porteur tracteur 4 X 4
		Militaire	porteur tracteur 4 X 4
		M230 Militaire	porteur tracteur 6 X 6

Tableau. I.2 : Gammes de production de la SNVI (Camions et véhicules Spéciaux)

I.7 Identification fiscale des véhicules de transport en commun des personnes

I.7.1 Généralité :

Dans la réglementation algérienne, le terme transport en commun de personnes, désigne le transport de plus de huit (8) personnes et ayant un poids maximal excédant une (1) tonne.

Véhicules de transport en commun de faible dimension sont conçus et équipés pour le transport de personnes assises ou debout et ayant une capacité ne dépassant pas 22 places assises ou debout, conducteur non compris il existe trois classes de ces véhicules :[8]

I.7.2 Classe I Autobus urbains :

Véhicule construit avec des zones pour les voyageurs debout permettant les déplacements fréquents de voyageurs, ce véhicule est aménagé pour le transport urbain de passagers caractérisé par plusieurs accès faciles.

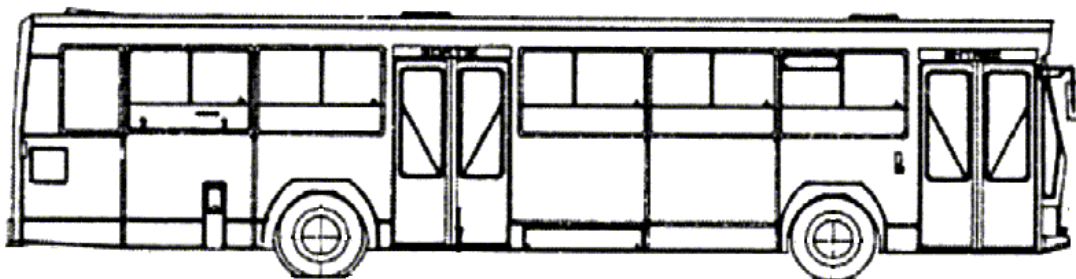


Figure. I.2 : Autobus urbains

I.7.3 Classe II autobus ou autocars interurbains :

Véhicule construit principalement pour le transport de voyageurs assis et conçus pour Permettre le transport de voyageurs debout dans l'allée et/ou dans un endroit spécial dont la Surface n'est pas supérieure à celle prévue pour deux doubles sièges

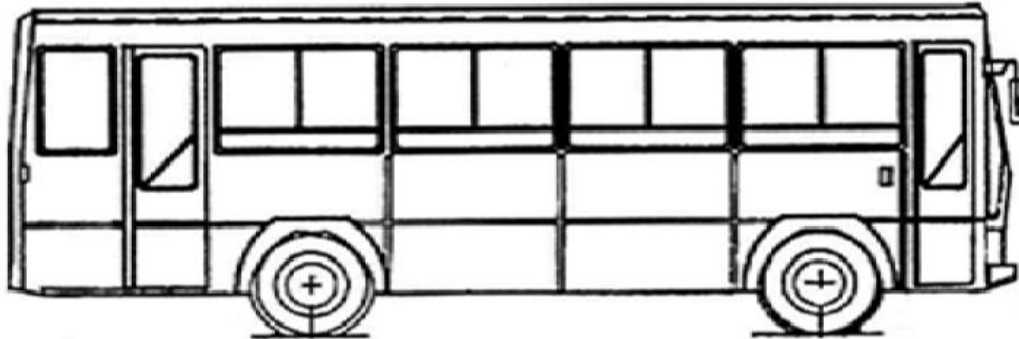


Figure. I.3 : autobus ou autocars interurbains

I.7.4 Classe III Autocar de tourisme :

Véhicule construit exclusivement pour le transport de voyageurs assis, ce véhicule est aménagé pour le transport de passagers sur de grandes distances et dans des conditions Agréable.

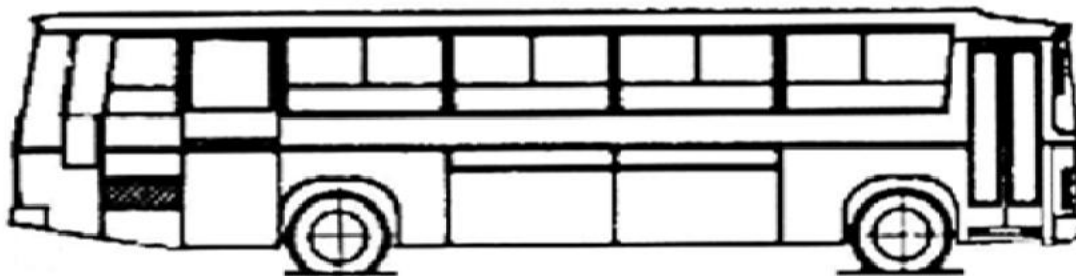


Figure. I.4 : Autocar de tourisme

I.8 Description du Bus 100L6

I.8.1 Dimension et poids.

Empattement	5600mm
Porte-à-faux Avant	2562mm
Porte-à-faux arriere	3360mm
Longueur hors tout	11522mm
Largeur hors tout	2500mm
Hauteur à vide	2920mm
Porte avant	1424mm
Porte arrière	1430mm
Garde au sol avant	189mm
Garde au sol arrière	247mm
Voie Avant	2063mm
Voie Arrière	1888mm
Angle d'attaque	8°
Angle de fuite	8°

Tableau. I.3:Dimension du Bus 100L6

POIDS TOTAL EN CHARGE		16000Kg
Charge maxi. Admissible sur	Essieu AV	6000kg
	Essieu AR	10000kg
Poids de véhicule en ordre de marche		9260
Répartition de ce poids sur :	Essieu AV	2730
	Essieu AR	6530

Tableau. I.4: Poids du Bus 100L6

I.8.2 Fiche descriptive 100L6

Motorisation Cumins

Moteur

Type :	Cumins C300-20
Nombre de cylindre :	6 en ligne
Injection	directe
Alésage /course (mm) :	114/135
Cylindrée	8.3L
Taux de compression	16.5/1
Carburant :	gaz GNC
Puissance maxi :	296 ch (221kw) à 2200tr/mn
Couple maxi :	1125 Nm à 1400tr/mn
Aspiration :	turbocompressée
Refroidissement :	à eau
Capacité d'huile :	23.6 L

Embrayage

Sans

Boite de vitesse

ZF 5 HP 592 à commande automatique

5 rapports AV synchronisée + 1 m AR

Rapport extrêmes : 3.43-83

Convertisseur 2.2 :1

Pont arrière

SNVI P 1021X

Couple conique à denture hypoïde et réducteurs dans les moyeux.

Couple : 12x41x1/2 (réduction totale : 6.83)

Ou

Couple 10x41x1/2 (réduction totale : 8.2)

Essieu

Type : Riga à roues indépendantes

Sièges voyageurs

En polyester avec revêtement mousse et tissu.

Bâti en tube acier.

Siege conducteur

Dossier inclinable et assise réglable en hauteur et en longueur.

Revêtement en tissu plastique

Portes

3 portes louvoyantes à 2 vantaux. Grande glace en deux parties sur chaque ventail. Poignées et rambarde.

Commande électropneumatique des portières avant.

Centrale et arrière par le conducteur.

Baies

Glacé de grande surface en verre sécurit.

Pare – brise panoramique

Suspension

Avant : 2 ressorts hélicoïdaux + 2 amortisseurs télescopiques et 4 coussins d'air.

Arrière : 2 ressorts à lames +2 amortisseurs télescopiques et 4 coussins d'air.

Barre de torsion à l'AV et l'AR.

FREINAGE ABS

-Frein principal (service) :

Frein à pied. à air comprimé agissant sur l'ensemble des roues.

Frein à tambours ou à disque sur roues AV et AR. Avec ABS

Circuit avant et arrière indépendants

-Frein de secours :

Indépendant, commandé par robinet et agissant sur les roues AR

-Frein de stationnement :

Dispositif à verrou à blocage mécanique agissant sur les roues AR.

-Ralentisseur intégré sur boîte.

Equipement électrique :

Tension : 24 V

2 accumulateurs de 12 volts chacun capacité 200 AH.

Alternateur de 125 A.

Pneumatiques

Dimension : 11 R 22.5 tubeless

AV : simples AR : jumelées [1]

I.9 Problématique

Il s'agit de réaliser une modélisation de la structure autoportante « carrosserie » de l'autobus 100L6 et de prévoir les modifications nécessaires à l'implantation optimisée d'un kit de bouteilles « réservoirs » de gaz naturel comprimé. et la résolution de ce problème est l'objectif de notre travail.

Chapitre II :
Pourquoi Le GNC

II.1 Généralités

Le gaz naturel est un mélange essentiellement constitué de méthane (élément principal), d'éthane, de propane, de dioxyde de carbone et d'azote. Pour faciliter sa détection en cas de fuite, on lui ajoute un odorisant (THT) qui lui donne une odeur de soufre caractéristique.

La composition exacte du carburant dépend de la source du gaz naturel. La densité du GNV est d'environ 0,6, il est donc plus léger que l'air. Le GNV peut être explosif si sa concentration est comprise approximativement entre 5 à 15 % dans l'air.

Le GNV n'est pas toxique par inhalation mais peut entraîner la suffocation en cas de substitution de l'oxygène de l'air.

Les véhicules roulant au GNV peuvent avoir un moteur bicarburation (fonctionnant à l'essence ou au GNV, au moyen de deux circuits distincts de carburation) ou mono carburation (fonctionnant exclusivement au GNV).

Le GNV est stocké dans les réservoirs à une pression proche de 200 bars. Initialement logées dans la malle arrière du véhicule ou dans le pavillon.

Quelques éléments sont différents sur la version CNG par rapport aux autres Stralis : certains composants du moteur ont été modifiés, l'électronique de commande est propre à cette version et le véhicule est équipé de réservoirs et de conduits spécifiques.

Il faut donc que l'équipementier prenne en considération la plus grande complexité technique du véhicule, non seulement au moment de l'étude de la transformation mais aussi et surtout pendant son exécution. [4]

II.2 Normes de sécurité

II.2.1 Pendant le ravitaillement

- Au moment du ravitaillement en gaz, ce dernier est généralement comprimé à 200 bars. Pendant cette opération, il se peut que des petites quantités de gaz naturel soient libérées. Le refroidissement qui suit sa décompression rapide peut provoquer des symptômes de congélation en cas de contact avec la peau. Mettre des gants de protection pendant le ravitaillement.
- Il est interdit de fumer, de manipuler des flammes libres ou des sources de lumière inflammables.

- Avant de remplir l'installation de gaz sous pression, vérifier qu'elle ne présente pas de défauts visibles.
- Les véhicules à ravitailler doivent être immobilisés ; le moteur doit être à l'arrêt et la clé de contact doit être retirée du neiman.
- Disposer des extincteurs adaptés à portée de la main (classes A, B ou C) et d'autres dispositifs anti-incendie. Pour le méthane, la classe anti-incendie C est particulièrement indiquée.
- Prêter immédiatement secours aux personnes blessées. Les opérations de secours aux personnes ont la priorité sur les opérations d'extinction de l'incendie.

II.2.2 En cas de fuites

En cas de fuite, il ya un risque d'explosion : par conséquent, il est important, non seulement de respecter toutes les réglementations prescrites par les lois et les autorités compétentes, mais aussi d'observer les consignes de sécurité suivantes :

- Fermer les vannes d'interception des bouteilles de gaz, des colonnes et du réservoir de la station de ravitaillement.
- Désactiver l'interrupteur général de l'installation électrique du stable ou de la zone de ravitaillement.
- Bloquer l'accès à la zone dangereuse et éloigner les personnes non autorisées.
- Informer immédiatement les organismes compétents et leur demander d'intervenir.
- Bien aérer toute la zone environnante.

II.2.3 Cas d'incendie

- Ne pas éteindre la flamme; refroidir éventuellement l'objet en flammes.
- Fermer les robinets d'interception des bombones de gaz, des colonnes et du réservoir de ravitaillement.
- Au cas où les flammes s'étendraient aux objets environnants, utiliser les extincteurs pour éteindre l'incendie. Eloigner immédiatement les véhicules situés dans la zone dangereuse.

- En cas d'incendie, aviser immédiatement les SAPEURS POMPIERS avant d'entreprendre les opérations d'extinction.
- Prêter immédiatement secours aux personnes blessées. Les opérations de secours aux personnes ont la priorité sur les opérations d'extinction de l'incendie.
- Désactiver l'interrupteur général de l'installation électrique du stable ou de la zone de ravitaillement. [2]

II.3 Composants principaux

II.3.1 Réservoir

Le réservoir de gaz est composé d'une série de bouteilles installées sur une structure fixée au châssis.

Le nombre de bouteilles, leur capacité et leur position de montage diffèrent selon la version du véhicule.

II.3.2 Vannes d'arrêt et de sécurité

Sur chaque bouteille une vanne est prévue qui contient les dispositifs mentionnés ci de suite:

- Fermeture manuelle pour entretien et sectionnements.
- Électrovanne unidirectionnelle asservie à la clé de contact, interrompt le flux entrant dans la bouteille : les bouteilles doivent donc être rechargées lorsque les électrovannes ne sont pas alimentées.
- Détendeur intervenant en cas de variation de pression brutale, en limitant fortement le flux de gaz vers l'extérieur (par exemple en cas de rupture d'un tuyau).
- Pastille fusible fondant à $103 \pm 10^{\circ}\text{C}$ en cas d'incendie et permettant au gaz de s'échapper vers l'extérieur.

II.3.3 Tuyaux

Tous les tuyaux sont en acier inoxydable (AISI 316 ou AISI 304) recuit, avec dureté HRB > 80 (ASTM A269) et sans soudures.

Installation de recharge du méthane :

- Tuyau de chargement
- Tuyaux avec diamètre extérieur de 10 mm ou bien 8 en rapport aux options
- Raccords en acier inoxydable avec double bague

Tuyaux de raccordement du distributeur aux vannes VBE sur les bouteilles

- Tuyaux avec un diamètre de 10 mm
- Raccords avec ogive

Tuyau de raccordement entre vannes de sécurité VBE

- Tuyaux avec diamètre externe de 6 mm
- Raccords avec ogive

Les tuyaux du méthane sont bridés par une liaison métallique (support ou bride) sur le châssis du véhicule. Entre le support et le tuyau, on interpose normalement un joint en caoutchouc ou en PVC qui doit rester intègre de manière à éviter le contact entre les parties métalliques. [2]

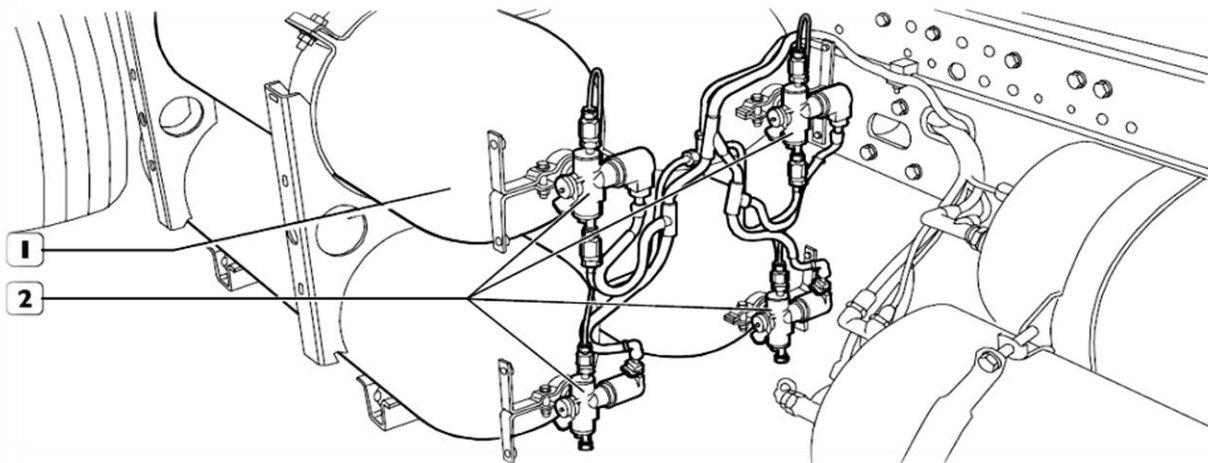


Figure. II.1 : 1réservoir - 2vannes d'arrêt et de sécurité VBE.

II.4 Gaz naturel comprimé et gaz naturel liquéfié

Le gaz naturel comprimé (GNC) et les gaz de pétrole liquéfiés (GPL) sont en majorité des carburants de remplacement produits au pays qui peuvent aider à réduire les émissions de gaz à effet de serre de votre parc de véhicules. Vous n'avez pas besoin de faire appel à un spécialiste en aménagement indépendant. Les fourgonnettes alimentées au GNC sont expédiées chez le concessionnaire équipé de moteurs V8 spécialement conçus pour fonctionner avec des carburants gazeux, de même que d'un système d'alimentation spécialisé intégré garanti. [3]

II.5 Une énergie intelligente pour le transport

Aujourd'hui l'utilisation du gaz naturel dans le transport compte pour moins d'un pour cent de la demande totale de gaz naturel au Canada, mais le gaz est de plus en plus considéré comme une source abondante, efficace et faible en carbone qui peut être utilisée à meilleur escient pour réduire la croissance des émissions du secteur des transports au Canada, en particulier celles des parcs de véhicules urbains et de camions lourds.

L'un des défis majeurs est d'établir une infrastructure de ravitaillement pour ces véhicules.

Le gaz naturel comprimé (GNC) est un bon choix pour les parcs de véhicules urbains qui reviennent se ravitailler à leur garage, comme les autobus, les camions à déchets ou des véhicules de services municipaux.

Les camions lourds peuvent fonctionner au GNC dans certaines applications spécialisées comme le transport des conteneurs dans les ports, tandis que l'aire de circulation des camions au gaz naturel peut être accrue en proposant du gaz naturel liquéfié (GNL) dans les postes de ravitaillement situés le long des voies de circulation les plus passantes.

Les entreprises canadiennes sont des chefs de file mondiaux dans le développement et la fabrication de véhicules au gaz naturel et de technologies de ravitaillement.

Les sociétés britanno-colombiennes, Westport Innovations et Cummins Westport fournissent les gros moteurs au gaz naturel qui sont intégrés dans des milliers de camions et d'autobus fabriqués par plus de 15 équipementiers en Amérique du Nord. IMW Industries fabrique des stations de ravitaillement en gaz naturel qui sont exportées vers plus de 20 pays à travers le monde. IMW a été

récemment reconnue comme l'exportateur de l'année en Colombie- Britannique. Powertech est un leader mondial dans les tests et la certification de cylindres de stockage de carburant pressurisé en plus de fournir la direction dans le développement de codes et des normes de l'industrie.

Le gaz naturel est un carburant beaucoup moins chargé en carbone que les autres. [3]

II.6 Comment sont valorisées les émissions de CO₂ ?

Les méthodes de calcul nationales et internationales des émissions de gaz à effet de serre qui en découlent se basent toutes sur le même principe : convertir la consommation d'une quantité de source d'énergie en dioxyde de carbone ou en équivalent dioxyde de carbone (lorsque l'on tient compte des autres gaz à effet de serre que le CO₂) par l'utilisation d'un facteur d'émission qui est spécifique à l'élément qui est consommé. Par exemple la consommation de 20 litres de gazole génère 61,4 kg de CO₂ compte tenu du facteur d'émission de ce carburant qui est de 3,07 kg de CO₂ par litre.

Pour être complète et comparable entre les différentes sources d'énergie, cette valorisation des émissions doit tenir compte des émissions générées en amont pour leur production.

Dans le cas des carburants, cela correspond à intégrer les opérations d'extraction du produit brut (pétrole), de raffinage et de transport du carburant, et non seulement la combustion.

Dans le cas de l'électricité (traction ferroviaire par exemple), si le fonctionnement du véhicule ne génère pas d'émissions, il y a en revanche des émissions de gaz à effet de serre (et de CO₂ en particulier) lors de la phase de production de l'électricité. C'est la raison pour laquelle le présent dispositif d'information CO₂ des prestations de transport prend en compte un ensemble comprenant la phase de fonctionnement et la phase amont: la phase de fonctionnement correspond à l'utilisation du moyen de transport, et donc à la combustion de la source d'énergie (carburants) ; la phase amont correspond aux activités mises en œuvre pour que le moyen de transport dispose de sa source d'énergie (qu'il s'agisse de gazole, de GNV, d'électricité...) : il peut donc s'agir de

l'extraction du pétrole, de son raffinage, de la distribution du carburant depuis la raffinerie jusqu'à la pompe. Dans le cas des biocarburants, il s'agit notamment de la culture de la plante et des étapes de la transformation en carburant.

Dans le cas de l'électricité, il s'agit de l'extraction du combustible utilisé dans la centrale, de son transport et des émissions liées à son utilisation dans la centrale électrique. Par exemple, dans le cadre de ce guide, les facteurs d'émission pour le kérosène sont de 0,48 kg de CO₂ par litre pour la phase amont et de 2,52 kg de CO₂ par litre pour la phase de fonctionnement. Ainsi, les émissions de l'ensemble sont, pour un litre de kérosène, égales à $2,52 + 0,48 = 3,00$ kg de CO₂.

II.7 Le terrain de l'écologie

Le carburant gaz naturel permet de diminuer de 25 % les émissions de gaz à effet de serre par rapport à une voiture essence.

Il limite, de manière très importante, les rejets de particules dangereuses pour notre santé, d'oxyde d'azote ou de polluants non réglementés toxiques².

Le GNV est une énergie « primaire » qui ne nécessite aucune transformation potentiellement polluante.

Son transport est facile et non polluant : le gaz arrive à destination par canalisation.

Les mêmes véhicules équipés GNV pourront fonctionner avec le biogaz, issu des stations d'épuration). [5]

II.8 CONCLUSION

Dans le contexte du secteur des transports, le gaz naturel convient le mieux dans les parcs de véhicules.

Au moment où la diversification des sources d'approvisionnement énergétique et la réduction des gaz à effet de serre sont au cœur des débats, le Gaz Naturel pour Véhicules (GNV) dispose d'atouts qui le placent en bonne position parmi les carburants de substitution.

Les constructeurs de véhicules et les équipementiers ne s'y sont pas trompés et élargissent progressivement leur gamme. En France, plus de 12 000 véhicules (dont plus de 2 000 bus) consomment du GNV en 2010, alors qu'ils n'étaient que 600 en 1997. Dans le monde, ce sont plus de 4 millions de véhicules GNV qui circulent aujourd'hui.

Chapitre III :
Rappels Généraux Sur
La Méthode Des
Éléments Finis

III.1 Introduction

La méthode des éléments finis est une méthode parmi d'autres qui permettent à l'ingénieur d'effectuer des simulations numériques de phénomènes physiques.

Le calcul occupe une place stratégique avec la CAO et les autres technologies de simulation (essais) dans le développement d'un produit complexe qui touche à différents domaines de la physique. Cela concerne les industries automobiles, navales, aéronautiques, ferroviaires, mais aussi les industries lourdes: centrales électriques, plates-formes pétrolières, et le génie civil.

Le calcul est indispensable lorsque l'on cherche à obtenir une solution optimisée pour réduire les coûts et les délais de fabrication. Grâce au calcul l'ingénieur peut tester plusieurs configurations pour optimiser le comportement d'un modèle à une prestation donnée. Cela évite de multiplier les prototypes et les essais tests réels, les supports physiques ne servent plus à chercher une solution, ils permettent de la valider.

Le calcul de conception dans les bureaux d'études, c'est sans doute le plus répandu car grâce aux outils de calcul simplifié dont disposent les logiciels de CAO modernes, la simulation numérique fait partie des outils de conception pour obtenir un comportement défini a priori qui détermine le dimensionnement, donc le dessin, des pièces mécaniques.

La méthode des éléments finis est de toutes les méthodes de discrétisation la plus utilisée car :

- ✓ Elle peut traiter des problèmes de géométrie complexe
- ✓ Elle couvre de nombreux domaines de la physique
- ✓ Les moyens informatiques actuels (puissance des calculateurs outils de visualisation) la rendent facile de mise en œuvre.
- ✓

De nombreux logiciels généraux ou dédiés sont disponibles sur le marché tel que : CATIA ; ANSYS ; ASKA ; TITUS ; SOLIDWORKS...etc.

III.2 Bref historique

L'idée fondamentale derrière la méthode des éléments finis remonte loin en arrière. Les grecs par exemple avaient reconnu que l'on peut approcher la solution d'un problème complexe en le divisant en problèmes plus simples. On peut par exemple approcher le périmètre d'un cercle en calculant le périmètre d'un polygone à n cotés, pourvu que n soit suffisamment grand. Il suffit alors de connaître la longueur d'un segment de droite, problème beaucoup plus simple que celui de la longueur d'un arc de cercle. +

L'application à la solution des équations aux dérivées partielles est évidemment plus récente et est intimement liée au développement de l'informatique. Courant [10] a introduit le concept de formulation variationnelle, qui est à la base de toute méthode d'éléments finis. Pour la méthode de Ritz [32], on part d'un problème posé dans un espace de dimension infinie.

On approche ensuite la solution du problème initial en cherchant une solution dans une suite croissante de sous-espaces de dimension finie. Ces problèmes approchés sont en général beaucoup plus faciles à résoudre. On peut de plus espérer que la solution du problème en dimension infinie peut être obtenue par un passage à la limite. Le choix des fonctions de base constituant ces espaces de dimension finie est délicat et initialement on les construisait globalement sur le domaine. C'est Courant qui eut l'idée d'introduire des fonctions à support local qui simplifient grandement leur construction.

La maturation de la méthode des éléments finis a été plus lente que son éclosion en milieu industriel. Elle tire son origine des limitations du « calcul résistance des corps solides », ces limitations qui ont orientées les évolutions de l'analyse mécanique sur deux voies parallèles :

III.2.1 La mécanique des milieux discrets

Elle consiste à formuler l'équilibre des efforts ainsi que les relations de continuité des déplacements pour un ensemble de composants déformables connectés entre eux. Ainsi, on sait déjà au début du XIX^{ème} siècle, avec l'ingénieur Claude-Louis Navier, calculer des systèmes complexes constitués de barres souples : les systèmes hyperstatiques.

Cette approche, en conduisant à résoudre des systèmes matriciels a donné naissance à des outils de plus en plus élaborés, sous l'impulsion de la construction métallique au début du XX^{ème} siècle, puis aéronautique après la seconde guerre mondiale. De nouveaux composants ont été introduits, mais ces nouveaux outils restaient par nature dédiés aux structures étudiées et la taille des systèmes restait limitée par les moyens de calcul matriciel.

III.2.2 La mécanique des milieux continus

Elle consiste à formuler l'énergie du système à partir de sa raideur de son déplacement et des efforts appliqués, puis à retenir comme solution du problème d'équilibre de déplacement assurant une énergie minimale. Cette vision unifiée de la mécanique, instruite à la fin de XVII^{ème} siècle. Enfin, le calcul approché des mathématiciens, très florissante au XIX^{ème} siècle par Boris Grigovitch Galerkin.

En 1956 les deux voies discrète et continue, se recoupent explicitement sur le concept général d'élément fini tel qu'on le connaît aujourd'hui, lorsque deux chercheurs de l'aéronautique, Turner et Clough entreprennent de décomposer un domaine surfacique continu de forme quelconque, en petit domaines triangulaires à déplacement linéaire, ces éléments étant assemblés à leurs sommets (les nœuds) pour constituer le système algébrique à résoudre. Cette idée met en œuvre pour la première fois ensemble, les approches discrètes et continues de la MEF, sous forme d'une certaine approximation de la solution cherchée sur une certaine décomposition de l'espace.

Au début des années 60, le développement des gros ordinateurs, en levant la limitation du nombre de nœuds, a ouvert un champ d'application virtuelle illimité à la MEF. D'une part des éléments de haute précision) et leur traitement se systématisait au sien des bibliothèques dans des codes de plus en plus généralistes. D'autre part, la discrétisation et la résolution des problèmes non linéaires et non stationnaires se développait, dans des domaines débordant largement la mécanique des structures, la thermique, la mécanique des fluides, et aussi l'électromagnétisme.

A la fin des années 60, la pratique de la MEF débordait des grands centres de recherche appliquée pour essaimer vers la plupart des universités et vers certains Bureaux d'études. Avec l'amélioration des matériels informatique et des langages de programmation au cours des années 80, ces outils se sont rationalisés en interne (ateliers logiciels, programmation vectorielle, puis parallèle), ils sont devenus plus

ambitieux et performants (pour traiter de très gros problèmes), en se fédérant entre eux ou en s'interfaçant pour traiter des problèmes couplés. De gros investissements ont alors été engagés pour développer des outils généraux pour le pré et post traitement graphique « apparition des terminaux couleur à la CAO » en même temps, une autre génération de codes de calcul est apparue, avec les premiers ordinateurs personnels.

Les années 90 ont marqué à la fois une relative saturation des progrès, méthodologiques dans la MEF, qui a atteint sa maturité, un regroupement des grands éditeurs de logiciels scientifiques.

La méthode des éléments finis est maintenant reconnue comme l'une des principales méthodes. Elle consiste à formuler l'équilibre des efforts ainsi que les relations de continuité des déplacements pour un ensemble de composants déformables connectés entre eux. Ainsi, on sait déjà au début du XIX^{ème} siècle, avec l'ingénieur Claude-Louis Navier, calculer des systèmes complexes constitués de barres souples : les systèmes hyperstatiques. Cette approche, en conduisant à résoudre des systèmes matriciels a donné naissance à des outils de plus en plus élaborés, sous l'impulsion de la construction métallique au début du XX^{ème} siècle, puis aéronautique après la seconde guerre mondiale. De nouveaux composants ont été introduits, mais ces nouveaux outils restaient par nature dédiés aux structures étudiées et la taille des systèmes restait limitée par les moyens de calcul matriciel. Conjoncture [8]

III.3 Applications

On retrouve les premières applications véritables de la méthode des éléments finis en 1956 en mécanique des structures. Un groupe de chercheurs (Turner, Clough, Martin et Topp [37]) de Boeing utilisent cette méthode pour calculer la voilure d'un avion.

La méthode des éléments finis est maintenant reconnue comme l'une des principales méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles (EDP) dans des géométries quelconques, que ce soit en dimension un, deux ou trois. On trouve même des méthodes d'éléments finis en dimension 4, soit en espace-temps.

Les applications sont tout aussi nombreuses et variées. Les ingénieurs de diverses disciplines utilisent les éléments finis, que ce soit en mécanique des fluides ou des solides, mais aussi pour les problèmes thermiques, électromagnétiques, chimiques, etc. On retrouve aussi des applications en physique, et notamment en

astrophysique. ... [6]

III.4 présentation générale de la Méthodes Des Éléments Finis

La méthode des éléments finis est une méthode d'approximation des solutions d'équations aux dérivées partielles qui est construite à partir d'une formulation équivalente du problème à résoudre ; cette dernière est appelée formulation variationnelle du problème et nécessite le minimum de régularité de la solution.

On a coutume de présenter la méthode des éléments finis à la frontière de trois disciplines générales bien distinctes :

III.4.1 La modélisation des problèmes physiques

Consistant à mettre en équations les phénomènes fondés sur la répartition spatiale des grandeurs physiques –les équations aux dérivées partielles – ou encore à formuler les lois d'interaction entre ces grandeurs.

III.4.1.1 L'Analyse numérique : consistant à élaborer des procédures de calcul spécifiques, ou à utiliser au mieux les algorithmes généraux existants, pour résoudre numériquement les équations des modèles physiques.

III.4.1.2 L'Informatique appliquée : consistant à développer les logiciels permettant de construire et de manipuler les données numériques, en agencant comme il faut des modules de résolution, des gestionnaires de base de données, et des interfaces homme machine. [8]

III.5 Problèmes d'élasticité linéaire

On considère un corps fait d'un matériau élastique en dimension 3 (le cas bidimensionnel ne présentant aucune difficulté particulière) et soumis à des forces externes (forces par unité de volume N/m^3) :

$$r(x) = r(x_1; x_2; x_3) = [r_1(x_1; x_2; x_3); r_2(x_1; x_2; x_3); r_3(x_1; x_2; x_3)]$$

On souhaite alors déterminer le déplacement $u(x)$ d'un point matériel $x = (x_1; x_2; x_3)$ occasionné par l'application de ces sollicitations. Pour ce type de problèmes, la notation tensorielle est utile, sinon nécessaire.

On retrouvera à l'annexe A quelques rappels sur cette notation et en particulier sur le théorème de la divergence. Introduisant le tenseur (symétrique) des contraintes de Cauchy les équations d'équilibre s'écrivent :

$$-\nabla \cdot \sigma = r.$$

Cette dernière équation est en fait un système de 3 équations :

$$\begin{aligned} - \left(\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial x_3} \right) &= r_1(x_1, x_2, x_3) \\ - \left(\frac{\partial \sigma_{21}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{23}}{\partial x_3} \right) &= r_2(x_1, x_2, x_3) \\ - \left(\frac{\partial \sigma_{31}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{32}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{33}}{\partial x_3} \right) &= r_3(x_1, x_2, x_3) \end{aligned}$$

On voit immédiatement l'intérêt d'introduire la notation tensorielle qui est beaucoup plus compacte. Introduisons maintenant deux tenseurs qui seront fort utiles par la suite. Pour un champ de déplacement u donné, on définit le tenseur gradient de déformation par :

$$\nabla u = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} & \frac{\partial u_1}{\partial x_2} & \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial u_2}{\partial x_1} & \frac{\partial u_2}{\partial x_2} & \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial u_3}{\partial x_1} & \frac{\partial u_3}{\partial x_2} & \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \end{bmatrix}$$

On définit ensuite le tenseur de déformation comme étant la partie symétrique du tenseur gradient de déformation :

$$\gamma(u) = \frac{\nabla u + (\nabla u)^T}{2} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right) & \frac{\partial u_2}{\partial x_2} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \right) & \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \end{bmatrix}$$

$$\int_{\Omega} \sigma : \nabla w \, dv - \int_{\Gamma} (\sigma \cdot n) \cdot w \, ds = \int_{\Omega} r \cdot w \, dv$$

Puisque le tenseur σ est symétrique, il est facile de montrer que $\sigma : \nabla w = \nabla w : \sigma$, de sorte que la formulation précédente devient :

$$\int_{\Omega} \sigma : \gamma(w) \, dv - \int_{\Gamma} (\sigma \cdot n) \cdot w \, ds = \int_{\Omega} r \cdot w \, dv$$

Il reste à introduire une loi dite de comportement reliant le déplacement u (ou plus précisément tenseur $\gamma(u)$) au tenseur des contraintes σ . Pour un matériau dit linéaire élastique, cette relation prend la forme générale :

$$\sigma = C : \gamma(u) \text{ ou en termes des composantes } \sigma_{ij} = C_{ijkl} (\gamma(u))_{kl} = C_{ijkl} \gamma_{kl} \quad (11 : 3)$$

Où on a utilisé la convention de somme sur les indices répétés. La relation 11 : 3 n'est qu'une généralisation de la loi de Hooke et C est le tenseur d'élasticité (du quatrième ordre). On a ainsi une relation linéaire entre les contraintes et les déformations, ce qui justifie l'appellation matériau linéaire élastique. Le tenseur d'élasticité C n'est pas tout-à-fait quelconque. On montre en effet qu'il dérive généralement d'un potentiel Φ suivant une expression de la forme :

$$C_{ijkl} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \gamma_{ij} \partial \gamma_{kl}}$$

Puisque $\gamma_{ij} = \gamma_{ji}$ et que l'on peut permuter l'ordre de dérivation, on en tire immédiatement les propriétés de symétrie de ce tenseur :

$$C_{ijkl} = C_{jikl} = C_{ijlk} = C_{klij}$$

Le tenseur C possède donc au plus 21 composantes différentes et éventuellement non nulles (au lieu des 81 composantes d'un tenseur du quatrième ordre quelconque). Il est courant (et parfois utile) d'exprimer sous forme matricielle l'expression 11.3. Cette relation matricielle est de la forme :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_{11} \\ \gamma_{22} \\ \gamma_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \end{bmatrix} \quad (11.5)$$

Dans cette relation matricielle, il y a au plus 21 coefficients différents, tout comme pour le tenseur d'élasticité C compte tenu de ses symétries. Pour passer de la formulation matricielle 11.5 à la formulation tensorielle 11.3. Il suffit de faire les correspondances suivantes. Par exemple, si $i = j = 1$ dans la relation 11.3. On a:

$$\sigma_{11} = C_{11kl\gamma_{kl}} = C_{1111}\gamma_{11} + C_{1122}\gamma_{22} + C_{1133}\gamma_{33} + 2C_{1112}\gamma_{12} + 2C_{1123}\gamma_{23} + 2C_{1113}\gamma_{13}$$

Tandis que la première équation du système matriciel 11.5 s'écrit :

$$\sigma_{11} = C_{11}\gamma_{11} + C_{12}\gamma_{22} + C_{13}\gamma_{33} + 2C_{14}\gamma_{12} + 2C_{15}\gamma_{23} + 2C_{16}\gamma_{13}$$

De sorte que:

$$C_{1111} = C_{11}, C_{1122} = C_{12}, C_{1133} = C_{13}, C_{1112} = C_{14}, C_{1123} = C_{15}, C_{1113} = C_{16}$$

De même, en prenant $i = j = 2$ dans 11.3 et la deuxième ligne de 11.5. on conclut que:

$$C_{2211} = C_{1122} = C_{12}, C_{2222} = C_{22}, C_{2233} = C_{23}, C_{2212} = C_{24}, C_{2223} = C_{25}, C_{2213} = C_{26}$$

En parcourant chaque ligne du système matriciel et l'équation correspondante 11.3. On trouve la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1112} & C_{1123} & C_{1113} \\ C_{1122} & C_{2222} & C_{2233} & C_{2212} & C_{2223} & C_{2213} \\ C_{1133} & C_{2233} & C_{3333} & C_{3312} & C_{3323} & C_{3313} \\ C_{1112} & C_{2212} & C_{3312} & C_{1212} & C_{1223} & C_{1213} \\ C_{1123} & C_{2223} & C_{1212} & C_{1223} & C_{2323} & C_{2313} \\ C_{1113} & C_{2213} & C_{1223} & C_{1213} & C_{2313} & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_{11} \\ \gamma_{22} \\ \gamma_{33} \\ 2\gamma_{12} \\ 2\gamma_{23} \\ 2\gamma_{13} \end{bmatrix} \quad (11.6)$$

Tous les autres coefficients du tenseur C sont obtenus par symétrie. Que ce soit en utilisant la notation matricielle ou tensorielle, la formulation variationnelle devient alors :

$$\int_{\Omega} (C : \gamma(u)) : \gamma(w) \, dv - \int_{\Gamma} (\sigma \cdot n) \cdot w \, ds = \int_{\Omega} r \cdot w \, dv$$

Le problème étant d'ordre 2, l'espace de base sera $(H^1(\Omega))$ ou plus précisément $(H^1(\Omega))^3$ puisque le problème est tridimensionnel. Ce système comporte donc 3 conditions aux limites essentielles à savoir l'imposition des déplacements u_i sur la frontière ou une partie de celle-ci. Les trois conditions aux limites naturelles correspondantes portent sur le vecteur $t = \sigma \cdot n$ dit de contraintes normales.

En un point donné de la frontière, on doit imposer 3 conditions aux limites. Dépendant du problème, on impose soit la composante u_i du déplacement, soit la composante t_i du vecteur des contraintes normales, mais jamais les deux en même temps. [6]

III.6 Maillage

L'opération de maillage consiste à subdiviser le domaine V en sous domaines V_e appelés mailles.

En fait le domaine est représenté par un nombre fini d'éléments de forme simple. Chaque élément est connecté à un ensemble de nœuds. Les nœuds sont les

sommets des éléments. Ces éléments assurent la couverture du domaine avec un recouvrement maximal de manière à ce que :

Les n sous domaines V_e doivent satisfaire :

Pour $i \neq j$ on aura $V_i \cap V_j = \emptyset$ et $\int V \approx \sum_1^n V_e$

Chaque élément est défini de manière unique par ses nœuds géométriques qui sont sur V_e et sur sa frontière, les nœuds géométriques peuvent éventuellement coïncider avec les nœuds d'interpolations.

III.7 Forme des éléments classiques

La Méthode des Eléments Finis a développé une série de types d'éléments finis qui, pour le début, peuvent être classifiés en :

- éléments finis unidimensionnels (généralement des barres) ;
- éléments finis bidimensionnels (plaques et mêmes volumes) ;
- éléments finis tridimensionnels (blocs massifs).

Les éléments finis sont générés par des points qui ne sont que des nœuds de la structure. Il existe des éléments ayant un degré supérieur à ceux cubiques (qui sont les plus performants) mais le plus couramment sont utilisés les éléments linéaires et paraboliques.

Certains éléments finis ont des nœuds intérieurs pour améliorer la précision, mais l'utilisateur ne travaille pas avec ces nœuds. Ils sont générés et ensuite condensés dans la phase de calcul des matrices de rigidité des éléments.

Éléments à une dimension



Linéaire (2)



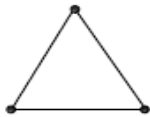
quadratique (3)



cubique (4)

Éléments à deux dimensions

- Éléments triangulaires



Linéaire (3)

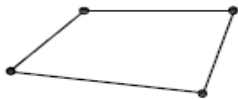


quadratique (6)



cubique (9)

- Éléments quadrilatéraux



Linéaire (4)



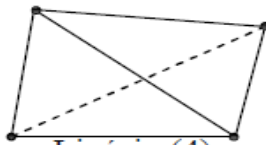
quadratique(6)



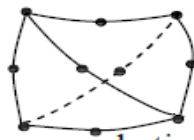
cubique (12)

Éléments à trois dimensions

- Éléments tétraédriques



Linéaire(4)

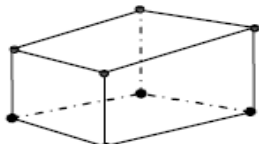


quadratique(10)

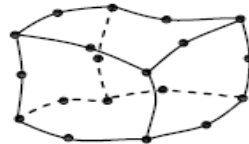


cubique(16)

- Éléments hexaédriques



Linéaire(8)

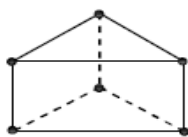


quadratique(20)



cubique(32)

- Éléments prismatiques



Linéaire(6)



quadratique(15)



cubique(24)

Figure III.1 : types d'éléments finis

III.8 Etapes d'analyse par la MEF

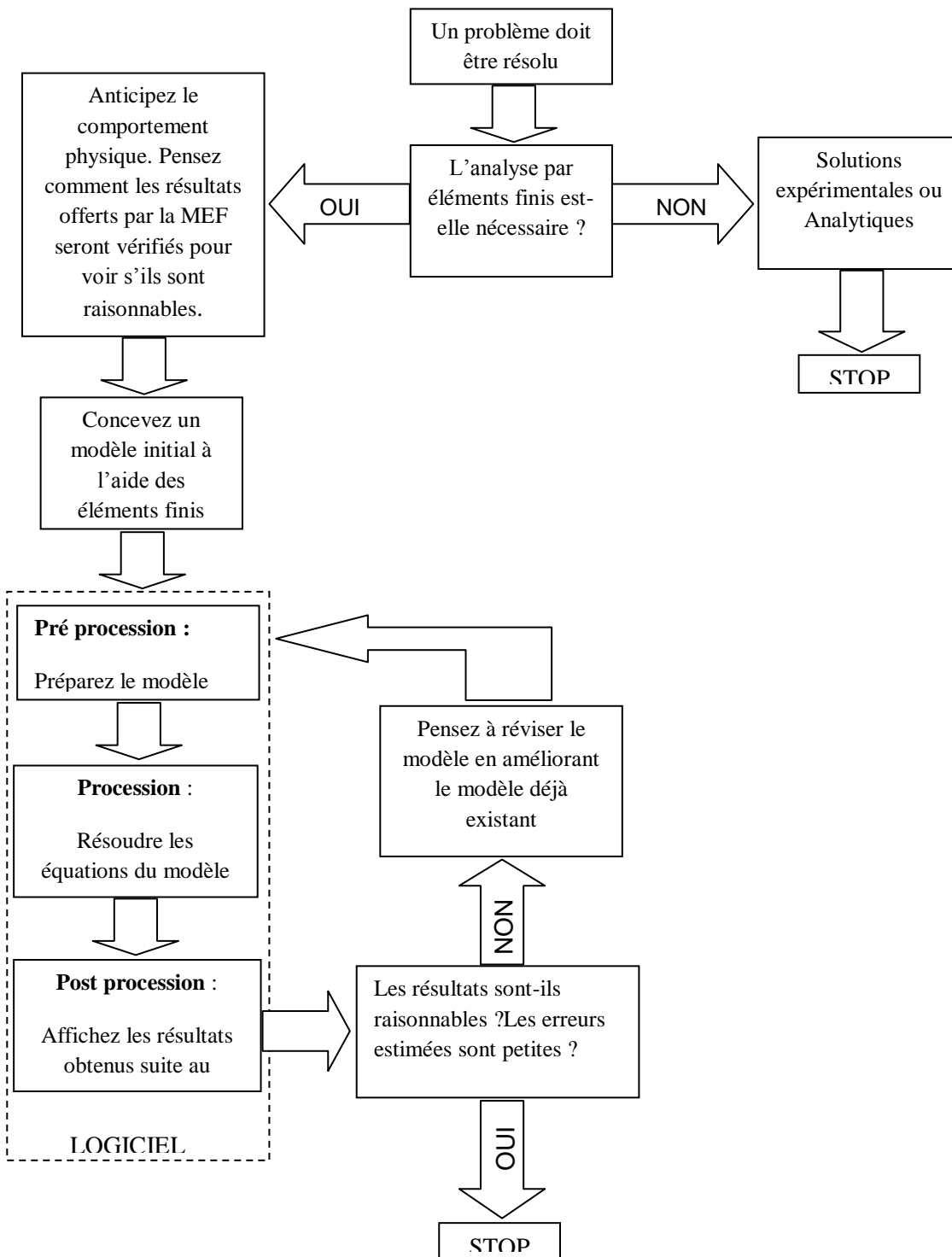


Figure.III.2: Principales étapes pour une analyse par la Méthode des Éléments Finis.

Pour faire une analyse par MEF prenez soin lorsque vous faites la modélisation. Mieux vaut prévenir que guérir. Le processus de modélisation nécessite que l'action physique du problème à être résolu doive être bien comprise afin de choisir des types d'éléments finis appropriés, convenables, qui puissent représenter de façon adéquate l'action physique réelle.

Il est souhaitable de ne pas utiliser des éléments « déformés » ou des éléments grossiers pour représenter des variations considérables d'une certaine quantité de champ. A l'autre extrême un sur-raffinage pourrait conduire à une perte de temps pour l'analyste ainsi qu'à un surchargement de la mémoire de l'ordinateur.

Cependant, même si un grand nombre d'éléments est utilisé dans la discrétisation il y a une erreur dénommée erreur de discrétisation qui existe du fait que la structure physique et le modèle mathématique ont une infinité de degrés de liberté (qui sont au fait les déplacements pour une infinité de points de la structure, tandis que le modèle avec éléments finis a un nombre fini de degrés de liberté.

Combien d'éléments sont-ils nécessaires pour une discrétisation ? Imaginons que nous réalisons deux analyses par MEF, la deuxième fois utilisant un réseau de discrétisation plus raffiné. Ce modèle aura moins d'erreurs de discrétisation par rapport au premier et représentera mieux la géométrie si l'objet physique a des surfaces courbes. Au cas où les deux analyses conduisent vers des solutions similaires, on suspecte que les résultats n'ont pas d'erreurs remarquables. Le processus itératif de discrétisation s'arrêtera au moment où les erreurs par rapport à la plus fine discrétisation sont situées au dessous de 5%.

A part les erreurs introduites par l'analyste lors de la discrétisation, l'ordinateur introduit des erreurs numériques par l'arrondissement ou par le tronquage des nombres qui sont introduits dans les matrices et qui servent à la résolution des équations.

Les logiciels d'analyse par éléments finis sont devenus sur une large échelle des instruments de calcul facile à utiliser et peuvent afficher les résultats sous une forme très attractive. Même le plus inhabile utilisateur peut offrir une réponse quelle qu'elle soit. Mais une carte joliment colorée des contraintes et des déformations peut être obtenue pour n'importe quel modèle bon ou mauvais. Il se peut que la plupart des analyses par MEF soient si défectueuses qu'elles ne peuvent pas être dignes de confiance.

Un utilisateur responsable doit comprendre suffisamment bien la nature physique du problème et le comportement des éléments finis afin de préparer un modèle convenable et de bien évaluer la qualité des résultats. La responsabilité des résultats obtenus revient à l'ingénieur qui utilise le logiciel et non pas au vendeur de ce logiciel, même si les résultats sont affectés par les erreurs du programme. [7]

III.9 Connaissances requises pour la réalisation des logiciels MEF

La MEF a un caractère pluridisciplinaire. Pour pouvoir réaliser des logiciels qui puissent résoudre certains types de problèmes dans le domaine du génie mécanique, il s'impose de maîtriser les disciplines suivantes :

- la mécanique des structures (statique, dynamique, la résistance des matériaux, les vibrations mécaniques) ;
- l'analyse numérique (procédés et algorithmes de calcul, graphique sur l'ordinateur) ;
- programmation linéaire (C++, Pascal etc.)

De la famille des grands logiciels, avec de multiples facilités, réalisés par des compagnies spécialisées qui sont généralement utilisés par des collectifs de recherche, font partie, entre autres, NASTRAN, ANSYS, SW SIMULATION (ex **COSMOS**), ALGOR, IMAGES3D etc. [7]

III.10 Connaissances nécessaires à un utilisateur MEF

Un utilisateur est mis dans la situation de résoudre un certain problème. On doit mentionner dès le début que le logiciel appliqué au problème respectif ne le résout pas. Il ne fait que résoudre un modèle créé par l'utilisateur. Les résultats peuvent être confirmés ou pas, en fonction du modèle choisi par l'utilisateur. La modélisation est une activité de simplification de la structure en l'encadrant ses différentes portions dans une des catégories suivantes : barres, plaques, blocs massifs, en tenant compte des chargements, appuis etc. La modélisation correcte (la plus

proche de la réalité) est un problème d'expérience, d'inspiration et moins de la connaissance des fondements théoriques de la méthode. [7]

III.11 ANALYSE LINEAIRE STATIQUE DES BARRES ARTICULEES ET DES POUTRES

Dans cette partie sera présenté et expliqué le sens physique des matrices de rigidité pour les éléments de barre et pour les éléments de poutre.

L'analyse statique néglige le temps comme variable indépendante et reste valable autant que les déflexions sont constantes ou varient peu. L'analyse linéaire statique sera exclue au delà de la limite d'écoulement (domaine plastique), où les déformations sont suffisamment grandes conduisant à une défaillance de la structure.

III.11.1 Déduction de la matrice de rigidité pour l'élément de barre

a) Méthode directe.

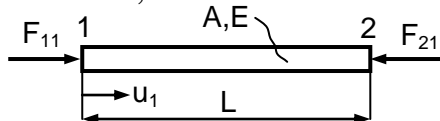
On considère un élément de barre uniforme, prismatique et élastique, de longueur L , de module élastique E et d'aire de la section transversale A . Un nœud est localisé à chacune des extrémités de la barre. Les seuls déplacements qui sont permis sont ceux axiaux.

On déplace d'abord le premier nœud, ensuite le deuxième et, dans chaque cas, on calcule les forces qui doivent être appliquées dans les nœuds pour maintenir le même état de déplacement.

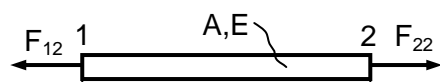
Ces forces sont faciles à déterminer à partir de la formule élémentaire de la Résistance des matériaux, $\delta = \frac{FL}{EA}$, d'où la force qui résultera sera : $F = \frac{EA}{L} \cdot \delta$.

On note avec F_{ij} la force au nœud « i » ($i = 1,2$) associée au déplacement du nœud « j » ($j = 1,2$).

Pour les deux cas, on aura :



$$F_{11} = F_{21} = \frac{EA}{L} \cdot u_1$$



$$F_{12} = F_{22} = \frac{EA}{L} \cdot u_2 \quad (1.2)$$

Figure.III.3: élément de barre

Figure.III.3 : Forces nodales associées aux déplacements nodaux pour un élément de barre

Si on écrit les relations (2.1) sous forme matricielle, on aura :

$$\begin{bmatrix} F_{11} & -F_{12} \\ -F_{21} & F_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} \quad (2.2)$$

Conformément à la convention de signes, on considère que les forces ainsi que les déplacements sont positifs dans la même direction (dans notre cas de gauche à droite). Si on remplace les forces par les expressions (2.1) on aura :

$$\begin{bmatrix} \frac{EA}{L} u_1 & -\frac{EA}{L} u_2 \\ -\frac{EA}{L} u_1 & \frac{EA}{L} u_2 \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} \Rightarrow \frac{EA}{L} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} \quad (2.3)$$

b) Procédure formelle

La méthode directe présentée ci-dessus ne peut fournir une expression de la matrice de rigidité que pour les cas très simples, là où les formules dérivées de la Résistance des matériaux fournissent des relations de calcul entre les déplacements nodaux et les forces nodales.

En généralisant, on doit trouver une formule de la matrice de rigidité [K] valable pour n'importe quel type d'élément. Cette formule générale est :

$$[K] = \int_V [B]^T \cdot [E] \cdot [B] dV \quad (2.4)$$

Où :

[B] = matrice déformation-déplacement

[E] = matrice des propriétés du matériau (matrice constitutive)

dV = incrément de l'élément de volume V .

L'équation (2.4) peut être déduite du point de vue énergétique, en affirmant que le travail L_{ext} réalisé par les forces nodales qui sont appliquées pour créer des déplacements nodaux est emmagasiné dans l'élément comme énergie de déformation élastique ($L_{\text{ext}} = U_{\text{def}}$).

Pour obtenir la matrice $[B]$ pour l'élément de barre articulée, on commence par écrire l'expression du déplacement axial « u » à un point arbitraire de la barre.

Comme on peut constater de la (figure III.4) suite à une interpolation du déplacement « u » entre les deux valeurs nodales connues, u_1 et u_2 , nous conduit à :

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \frac{L-x}{L} & \frac{x}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix}, \quad (2.5)$$

Ou bien :

$$\{\mathbf{u}\} = [\mathbf{N}] \cdot \{\mathbf{d}\} \quad (2.6)$$

$[\mathbf{N}]$ = matrice des fonctions de forme

$\{\mathbf{d}\}$ = vecteur des déplacements nodaux

Chaque fonction de forme décrit comment varie « u » avec la distance x lorsque le degré de liberté correspondant u_i est égal à 1 tandis que l'autre est égal à 0, c'est-à-dire :

- pour $x = 0$, $\frac{L-x}{L} = 1$ et $\frac{x}{L} = 0$;
- pour $x = L$, $\frac{L-x}{L} = 0$ et $\frac{x}{L} = 1$.

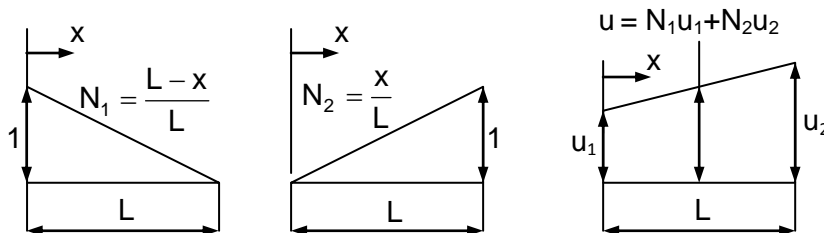


Figure.III.4 : Les fonctions de forme pour un élément de barre à deux nœuds

La déformation axiale $\epsilon_x = \frac{du}{dx} = \left[\frac{d}{dx} \mathbf{N} \right] \cdot \{d\} = [\mathbf{B}] \cdot \{d\} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \cdot \{d\}$ (2.7)

Donc, en appliquant la relation (2.4) on obtient :

$$[\mathbf{K}] = \int_V [\mathbf{B}]^T \cdot [\mathbf{E}] \cdot [\mathbf{B}] dV = \int_0^L \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} \cdot E \cdot \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \cdot A dx = \frac{EA}{L} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

III.11.2 Déduction de la matrice de rigidité pour l'élément de poutre

a) Méthode directe

La figure .III.5 montre un élément de poutre dans le plan. L'élément est prismatique, ayant un module d'élasticité longitudinal E, de moment d'inertie I pour la section axiale. L'axe qui passe par les centres de chaque section a un déplacement latéral $v = v(x)$. Conformément à la théorie des poutres la fonction $v = v(x)$ est un polynôme cubique en x pour une poutre uniforme prismatique chargée à ses extrémités.

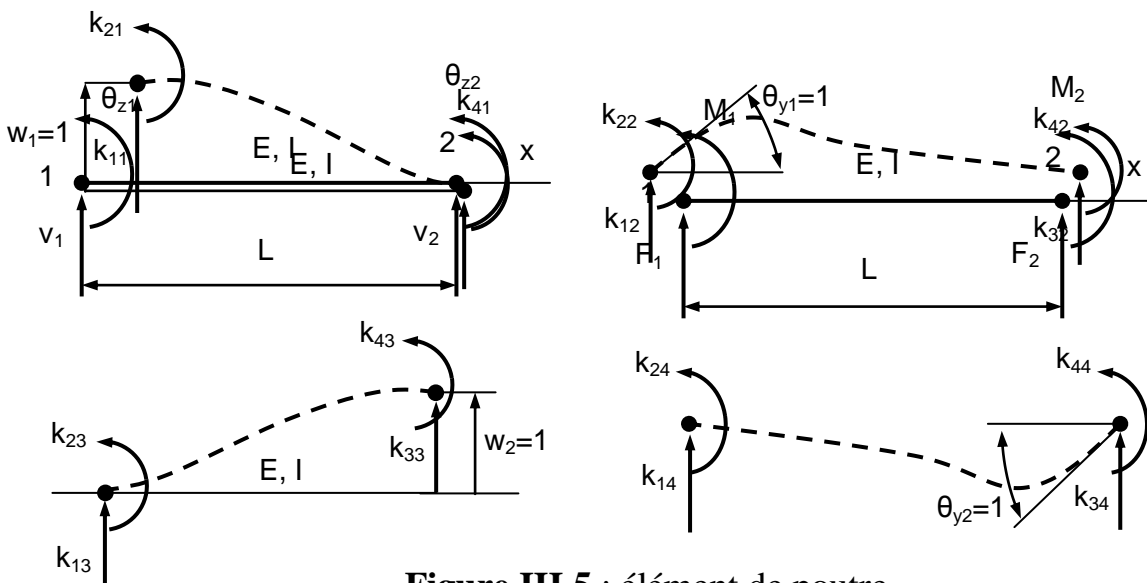


Figure.III.5 : élément de poutre

Les fonctions de forme associées par l'activation de l'un des quatre degrés de liberté sont présentées dans le Tableau.III.1.

Activation du degré de liberté	Fonction de forme correspondante
Déplacement du nœud 1	$N_1 = 1 - \frac{3x^2}{L^2} + \frac{2x^3}{L^3}$
Rotation du nœud 1	$N_2 = x - \frac{2x^2}{L} + \frac{x^3}{L^2}$
Déplacement du nœud 2	$N_3 = \frac{3x^2}{L^2} - \frac{2x^3}{L^3}$
Rotation du nœud 2	$N_4 = -\frac{x^2}{L^2} + \frac{x^3}{L^2}$

Tableau.III.1: Les fonctions de forme

Les sens des déplacements sont considérés positifs de bas vers le haut tandis que les sens positifs des rotations correspondent au sens anti-horaire.

Pour trouver les composantes de la première colonne de la matrice de rigidité $[K]$ correspondant à l'élément de poutre, respectivement $[k_{11} \ k_{21} \ k_{31} \ k_{41}]^T$ on a utilisé les conditions suivantes :

- $w_1 = 1$ dans le nœud 1, ce qui conduit à : $\frac{k_{11}L^3}{3EI} - \frac{k_{21}L^2}{2EI} = 1$ (2.9)

- $\theta_{z1} = 0$ dans le nœud 1, ce qui conduit à : $-\frac{k_{11}L^2}{2EI} + \frac{k_{21}L}{EI} = 0$ (2.10)

A part ces deux équations, les équations d'équilibre de la statique seront ajoutées pour déterminer les deux autres composantes, respectivement k_{31} et k_{41} :

$$\begin{aligned} \sum F = 0 &\Rightarrow k_{11} + k_{31} = 0 \\ \sum M_{(2)} = 0 &\Rightarrow k_{21} + k_{41} - k_{11} \cdot L = 0 \end{aligned} \quad (2.11)$$

De façon similaire, on aura pour chacun des trois états de déformation restés un set de quatre équations. En ce cas, chacun de ces trois états complètera les trois colonnes restées inachevées de la matrice de rigidité.

La matrice de rigidité $[K]$ opère sur le vecteur des degrés de liberté associés à chaque nœud, $[\delta] = [w_1 \ \theta_{y1} \ w_2 \ \theta_{y2}]^T$.

Le résultat de ce processus sera donc :

$$[K] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12 EI}{L^3} & \frac{6 EI}{L^2} & -\frac{12 EI}{L^3} & \frac{6 EI}{L^2} \\ \frac{6 EI}{L^2} & \frac{4 EI}{L} & -\frac{6 EI}{L^2} & \frac{2 EI}{L} \\ -\frac{12 EI}{L^3} & -\frac{6 EI}{L^2} & \frac{12 EI}{L^3} & -\frac{6 EI}{L^2} \\ \frac{6 EI}{L^2} & \frac{2 EI}{L} & -\frac{6 EI}{L^2} & \frac{4 EI}{L} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

a) Procédure formelle

La forme spéciale de l'équation (2.4) sera dans ce cas :

$$[K] = \int_0^L [B]^T \cdot EI \cdot [B] dx \quad (2.13)$$

où $[B]$ est maintenant la matrice qui donne l'expression de la courbure de l'élément de poutre à partir du produit $[B] \cdot \{\delta\}$:

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = \left[\frac{d^2}{dx^2} N \right] \cdot \{\delta\} = [B] \cdot \{\delta\} \quad (2.14)$$

En terme de coordonnées généralisées β_i le déplacement latéral $w = w(x)$ pour un élément de poutre sera sous la forme d'un polynôme cubique :

$$w = \beta_1 + \beta_2 x + \beta_3 x^2 + \beta_4 x^3 \quad (2.15)$$

Les termes β_i ($i = 1...4$) peuvent être déterminés en fonction des degrés de liberté associés à chaque nœud. Par exemple :

- à $x = 0$, $w = w_1$ et $\theta_y = \theta_{y1}$, où $\theta = \frac{dw}{dx}$
- à $x = L$, $w = w_2$ et $\theta_y = \theta_{y2}$

$$\text{Dans ces conditions, } \{w\} = [N_1 \quad N_2 \quad N_3 \quad N_4] \cdot \begin{Bmatrix} w_1 \\ \theta_{y1} \\ w_2 \\ \theta_{y2} \end{Bmatrix} = [N] \cdot \{\delta\} \quad (2.16)$$

Après avoir résolu le système, on obtient pour la matrice [B] la forme suivante :

$$[B] = \left[-\frac{6}{L^2} + \frac{12x}{L^3} \quad ; \quad -\frac{4}{L} + \frac{6x}{L^2} \quad ; \quad \frac{6}{L^2} - \frac{12x}{L^3} \quad ; \quad -\frac{2}{L} + \frac{6x}{L^2} \right] \quad (2.17)$$

Exemple :

$$k_{11} = \int_0^L \left[-\frac{6}{L^2} + \frac{12x}{L^3} \quad ; \quad -\frac{4}{L} + \frac{6x}{L^2} \quad ; \quad \frac{6}{L^2} - \frac{12x}{L^3} \quad ; \quad -\frac{2}{L} + \frac{6x}{L^2} \right] \cdot EI \cdot \begin{Bmatrix} -\frac{6}{L^2} + \frac{12x}{L^3} \\ -\frac{4}{L} + \frac{6x}{L^2} \\ \frac{6}{L^2} - \frac{12x}{L^3} \\ -\frac{2}{L} + \frac{6x}{L^2} \end{Bmatrix} \cdot dx \Rightarrow$$

$$k_{11} = \int_0^L \left(-\frac{6}{L^2} + \frac{12x}{L^3} \right)^2 + \left(-\frac{4}{L} + \frac{6x}{L^2} \right)^2 + \left(\frac{6}{L^2} - \frac{12x}{L^3} \right)^2 + \left(-\frac{2}{L} + \frac{6x}{L^2} \right)^2 dx = \frac{12 EI}{L^3} \text{ etc.}$$

En ce qui concerne le calcul des contraintes, on sait du cours de Résistance des matériaux que dans le cas d'une poutre soumise à la flexion,

$$\sigma_x = \frac{M}{I} \cdot z \quad \text{où} \quad M = EI \frac{d^2w}{dx^2} = EI \cdot [B] \cdot \{\delta\} \quad (2.18)$$

Pour l'élément de poutre 2D (bidimensionnel), celui ci est la combinaison entre un élément de barre et un élément de poutre. Dans ce cas, la matrice de rigidité [K] sera : [7]

$$[K] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

III.12 Transformation des coordonnées du système local en système global

Dans la figure 3.1 est représenté un exemple typique de barre articulée ainsi que les deux repères de coordonnées, local xOz et global XOZ. Les déplacements dans le système local sont u_1 et u_2 et dans le système global U_1 , W_1 et U_2 , W_2 . L'angle θ est considéré l'angle entre l'axe X et la direction positive de la barre articulée 1-2.

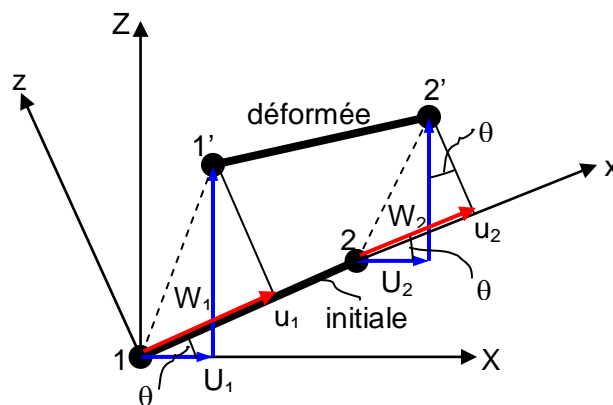


Figure.III.6: Système local et global de coordonnées

Les déplacements dans le système local xOy peut être exprimé en fonction des déplacements globaux.

$$\begin{aligned} u_1 &= U_1 \cos\theta + W_1 \sin\theta \\ u_2 &= U_2 \cos\theta + W_2 \sin\theta \end{aligned} \quad (3.1)$$

Ou sous forme matricielle :

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\theta & \sin\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} U_1 \\ W_1 \\ U_2 \\ W_2 \end{Bmatrix} \Rightarrow \{u\} = [T] \cdot [U] \quad (3.2)$$

Ou $[T]$ s'appelle matrice de transformation du système local dans celui global et :

$$\cos\theta = \frac{X_2 - X_1}{L}, \quad \sin\theta = \frac{Z_2 - Z_1}{L} \quad \text{et} \quad L = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2},$$

L représentant la longueur de l'élément de barre articulée.

III.12.1 Transformation des forces du système local en système global

On considère la barre articulée de la figure.III.6 soumise dans le système local par les forces f_1 et f_2 appliquées dans les nœuds 1 et 2 dans le système local d'axes de coordonnées. Les composantes de ces forces dans le système global seront :

$$\begin{aligned} F_{x1} &= f_1 \cos\theta ; & F_{z1} &= f_2 \cos\theta \\ F_{x2} &= f_1 \sin\theta ; & F_{z2} &= f_2 \sin\theta \end{aligned} \quad (3.3)$$

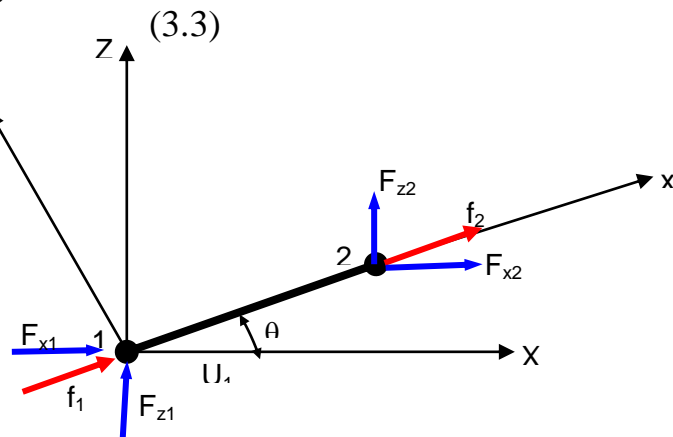


Figure.III.6: Forces nodales dans le système local et global d'axes de coordonnées

Sous forme matricielle, les relations 3.3 peuvent être écrites sous la forme :

$$\begin{Bmatrix} F_{x1} \\ F_{z1} \\ F_{x2} \\ F_{z2} \end{Bmatrix}_e = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & \cos\theta \\ 0 & \sin\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix}_e \quad (3.4)$$

Ou bien :

$$\{F^e\} = [T^e]^T \cdot \{f^e\} \quad (3.5)$$

III.12.2 Déduction de la matrice de rigidité d'un élément de barre dans le système global d'axes

En partant de l'équation (3.5) on aura, pour le système global d'axes :

$$\{F^e\} = [T^e]^T \cdot \{f^e\} = [T^e]^T \cdot [k^e] \cdot \{u^e\} = \underbrace{[T^e]^T \cdot [k^e] \cdot [T]}_{[K^e]} \cdot \{U^e\} = [K^e] \cdot \{U^e\} \quad (3.6)$$

Où :

- $\{F^e\}$ = vecteur des forces nodales dans le système global d'axes ;
- $\{f^e\}$ = vecteur des forces nodales dans le système local d'axes ;
- $[K^e]$ = matrice de rigidité dans le système global d'axes ;
- $[k^e]$ = matrice de rigidité dans le système local d'axes ;
- $\{U^e\}$ = vecteur des déplacements nodaux dans le système global d'axes ;
- $\{u^e\}$ = vecteur des déplacements nodaux dans le système local d'axes.

$$[K^e] = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & \cos\theta \\ 0 & \sin\theta \end{bmatrix} \cdot \frac{EA}{L} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\theta & \sin\theta \end{bmatrix} = \frac{EA}{L} \cdot \begin{bmatrix} c^2 & cs & -c^2 & -cs \\ cs & s^2 & -cs & -s^2 \\ -c^2 & -cs & c^2 & cs \\ -cs & -s^2 & cs & s^2 \end{bmatrix}$$

(3.7) Où $c = \cos\theta$ et $s = \sin\theta$.

La matrice de rigidité dans le système global d'axes est symétrique, singulière et, comme on peut facilement remarquer, les éléments de la diagonale principale sont positifs. [7]

III.13 Application

Pour le système de barres articulées de la figure.III.7 ci-dessous déterminez :

- les efforts et les contraintes dans chaque barre ;
- les déplacements nodaux.

On considère connues E, F, ℓ et A. Application numérique :

$$E = 2 \cdot 10^5 \text{ MPa}, \quad A = 200 \text{ mm}^2, \quad \ell = 1 \text{ m et } F = 10 \text{ KN.}$$

- Premier pas : numérotation des nœuds et des éléments
- Deuxième pas : application des forces nodales et des déplacements nodaux.

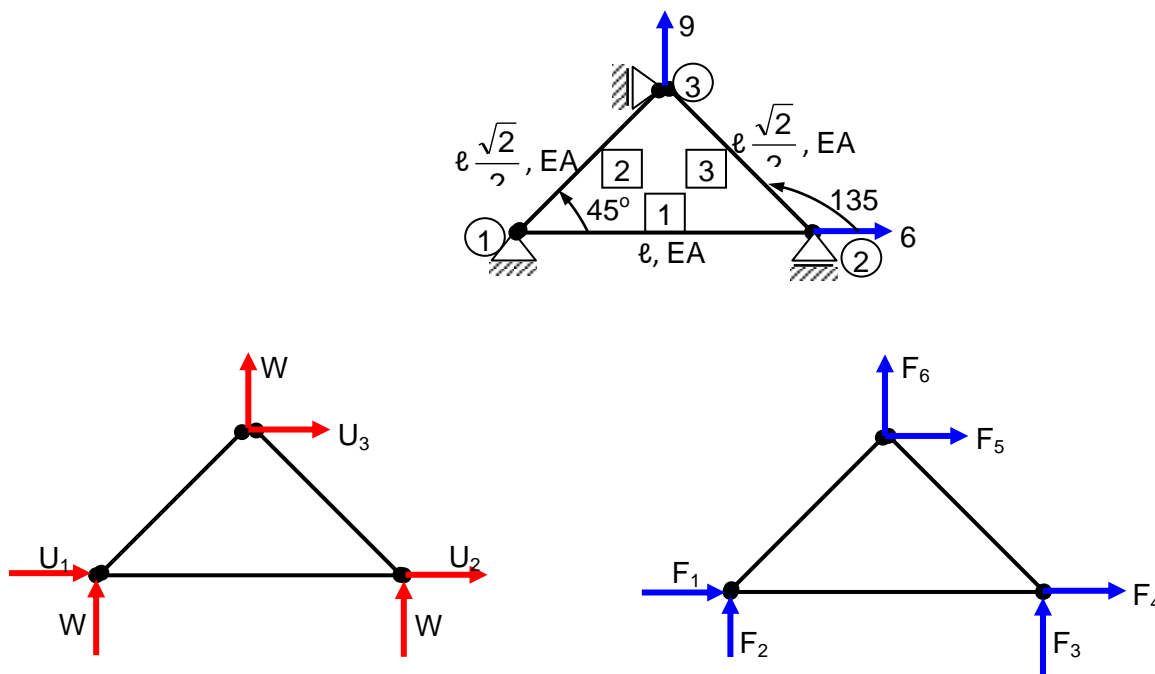


Figure.III.7: système de barres articulées

- Troisième pas : complètement du tableau

Barre	Nœuds		θ_e [°]	$\cos \theta_e$	$\sin \theta_e$	c^2	s^2	cs	ℓ_e	EA_e	$\frac{EA_e}{\ell_e}$
	i	j									
1	1	2	0	1	0	1	0	0	ℓ	EA	$\frac{EA}{\ell}$
2	1	3	45	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\ell \frac{\sqrt{2}}{2}$	EA $\sqrt{2}$	$\frac{2EA}{\sqrt{2}}$
3	2	3	135	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$\ell \frac{\sqrt{2}}{2}$	EA $\sqrt{2}$	$\frac{2EA}{\sqrt{2}}$

Tableau.III.2: tableau des résultats

- Quatrième pas : écriture de la matrice de rigidité pour chaque élément de barre séparément.

$$[K^1] = \frac{EA}{\ell} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} ; \quad [K^2] = \frac{2EA}{\ell} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & -1 \\ 2 & 2 & -2 & -2 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \\ -2 & -2 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & -2 & -2 \end{bmatrix} ;$$

$$[K^3] = \frac{2EA}{l} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} .$$

- Cinquième pas : Emplacement des trois matrices dans une matrice globale [K] (6 lignes x 6 colonnes).

$$[K^1] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{EA}{l} & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{EA}{l} & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad [K^2] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & -\frac{EA}{l} \\ \frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & -\frac{EA}{l} \\ \frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & -\frac{EA}{l} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} \\ \frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} \\ -\frac{EA}{l} & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & -\frac{EA}{l} \end{bmatrix}$$

$$[K^3] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{EA}{l} & -\frac{EA}{l} & -\frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} \\ 0 & 0 & \frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} & -\frac{EA}{l} \\ 0 & 0 & \frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} & -\frac{EA}{l} \\ 0 & 0 & \frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} & -\frac{EA}{l} \\ 0 & 0 & \frac{EA}{l} & -\frac{EA}{l} & -\frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} \end{bmatrix}$$

- Sixième pas : Assemblage des matrices de rigidité [Kⁱ] dans la matrice globale de rigidité

$$[K] = \begin{bmatrix} \frac{2EA}{l} & \frac{EA}{l} & -\frac{EA}{l} & 0 & -\frac{EA}{l} & -\frac{EA}{l} \\ \frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & -\frac{EA}{l} \\ \frac{EA}{l} & 0 & \frac{2EA}{l} & \frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} \\ -\frac{EA}{l} & 0 & \frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} & -\frac{EA}{l} \\ 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} & -\frac{EA}{l} \\ \frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} & \frac{2EA}{l} & 0 \\ -\frac{EA}{l} & -\frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} & 0 \\ \frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} & 0 & \frac{2EA}{l} \\ -\frac{EA}{l} & -\frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} & -\frac{EA}{l} & 0 & \frac{2EA}{l} \end{bmatrix} = \frac{EA}{l} \cdot \begin{bmatrix} 2 & 1 & -1 & 0 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ -1 & 0 & 2 & -1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 1 & 2 & 0 \\ -1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

- **Septième pas** : écriture de la relation fondamentale de la MEF, $\{F\} = [K] \cdot \{\delta\}$ et détermination des déplacements nodaux et des forces nodales :

$$\begin{cases} F_1 = ? \\ F_2 = ? \\ F_3 = 6F \\ F_4 = ? \\ F_5 = ? \\ F_6 = 9F \end{cases} = \frac{EA}{l} \cdot \begin{bmatrix} 2 & 1 & -1 & 0 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ -1 & 0 & 2 & -1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 1 & 2 & 0 \\ -1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} U_1 = 0 \\ W_1 = 0 \\ U_2 = ? \\ W_2 = 0 \\ U_3 = 0 \\ W_3 = ? \end{cases}$$

On peut facilement remarquer que là où on connaît les forces nodales on ne connaît pas les déplacements nodaux et inversement, là où on connaît les déplacements nodaux, les forces nodales sont inconnues. En choisissant les lignes 3 et 6 on peut facilement calculer les déplacements nodaux :

$$\begin{cases} 2\frac{EA}{l}U_2 + \frac{EA}{l}W_3 = 6F \\ \frac{EA}{l}U_2 + 2\frac{EA}{l}W_3 = 9F \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} U_2 = \frac{F\ell}{EA} = \frac{10^4 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^5 \cdot 200} = 0,25 \text{ mm} \\ W_3 = \frac{4F\ell}{EA} = \frac{4 \cdot 10^4 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^5 \cdot 200} = 1 \text{ mm} \end{cases}$$

En ce qui concerne les forces nodales on prend comme équations les lignes 1, 2, 4 et 5. On aura dans ce cas :

$$\begin{cases} F_1 \\ F_2 \\ F_4 \\ F_5 \end{cases} = \frac{EA}{l} \cdot \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 0 & -1 \\ -1 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} U_2 \\ W_3 \end{cases} = \begin{cases} -5F \\ -4F \\ -5F \\ -F \end{cases}$$

L'allongement $\Delta\ell$ pour un élément quelconque $i - j$ se calcule avec la formule :

$$\Delta l_{ij} = (U_j - U_i) \cos\theta - (W_j - W_i) \sin\theta \quad (3.8)$$

- Huitième pas : calcul des efforts dans chaque élément de barre.

Les efforts dans un élément de barre articulée $i - j$ se calculent avec la formule :

$$N_{ij}^e = \frac{EA^e}{l^e} \cdot \Delta l_{ij}^e = \frac{EA^e}{l^e} \cdot \begin{Bmatrix} -c & -s & c & s \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} U_i \\ W_i \\ U_j \\ W_j \end{Bmatrix}_e \quad (3.9)$$

En appliquant la relation (3.9) on aura donc les efforts dans les barres 1-2, 1-3 et 2-3.

Les contraintes dans chaque élément de barre se calculent avec la formule:

$$\sigma_{ij}^e = \frac{N_{ij}^e}{A_e}$$

donc :

$$\sigma_{12}^1 = \frac{N_{12}^1}{A_1} = \frac{10000}{200} = 50 [MPa]$$

$$\sigma_{13}^2 = \frac{N_{13}^2}{A_2} = \frac{56568,54}{200\sqrt{2}} = 200 [MPa]$$

$$\sigma_{23}^3 = \frac{N_{23}^3}{A_3} = \frac{70710,67}{200\sqrt{2}} = 250 [MPa]$$

III.14 Conclusion

Une étape primordiale dans la conception et l'optimisation des structures complexes est l'établissement d'un modèle numérique de base, affiné successivement par des essais expérimentaux pour être finalement validé. Cette phase de modélisation essentielle pour une compréhension future du comportement du système sous différentes sollicitations, suppose le recours à un outil d'analyse numérique performant et maîtrisable, s'appuyant généralement sur la méthode des éléments finis.

Chapitre IV :

***Analyse De l'Ossature
d'Autobus 100L6***

IV.1 Introduction

La vérification manuelle par la méthode des éléments finis d'une structure aussi importante que celle d'autobus 100L6 est vraiment fastidieuse, c'est pourquoi on a fait appel au logiciel de conception et de calcul solidworks, qui nous aide à faire cette vérification avec une grande précision et dans un temps très court.

Et pour cela d'un point de vu de logiciel chaque application de l'analyse par éléments finis passe par les trois étapes suivantes :

- Prétraitement : le type d'analyse (par exemple statique, thermique ou de fréquence...etc.) , les propriétés de matériau, les charges et les déplacements imposés sont définis, puis le modèles est fractionné en élément finis.
- Solution : calcul des résultats souhaités
- Post-traitement : analyse des résultats.

Nous effectuons ces trois étapes chaque fois que nous utiliserons solidworks simulation.

IV.2 Les unités de calcul

Système d'unités:	SI (MKS)
Longueur/Déplacement	mm
Température	Kelvin
Vitesse angulaire	Rad/sec
Pression/Contrainte	N/m ²

Tableau. IV.01 : unités de calcul utilisées

IV.3 Propriétés du matériau utilisé

Pour tout les pièces de la structure autoportante d'autobus la SNVI utilisé un acier appelé E24 dans l'ancienne désignation, qui est le S235 dans la nouvelle désignation, le tableau **IV.02** contient toutes les propriétés de cet acier.

Nom	1.0037 (S235JR)
type de modèle	Linéaire élastique isotopique
Critère de ruine par défaut	Contrainte de von Mises max.
Limite d'élasticité	2.35e+008 N/m ²
Limite de traction	3.6e+008 N/m ²
Module d'élasticité	2.1e+011 N/m ²
Coefficient de poisson	0.28
Masse volumique	7800 kg/m ³
Module de cisaillement	7.9e+010 N/m ²
Coefficient de dilatation thermique	1.1e-005 /Kelvin

Tableau. IV.02 : propriété de matériau utilisé

IV.4 La géométrie de l'ossature d'autobus 100L6



Figure. IV.1 : la structure autoportante d'autobus 100L6

IV.4.1 La face latérale gauche

Longueur	10830mm
Hauteur	2597mm
matériaux	S235

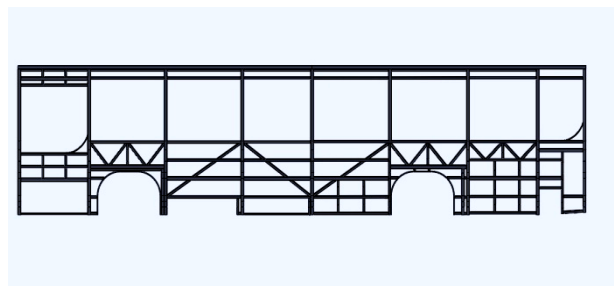


Figure. IV.2 : la face latérale gauche

IV.4.2 La face latérale droite

Longueur	10830mm
Hauteur	2597mm
matériaux	S235

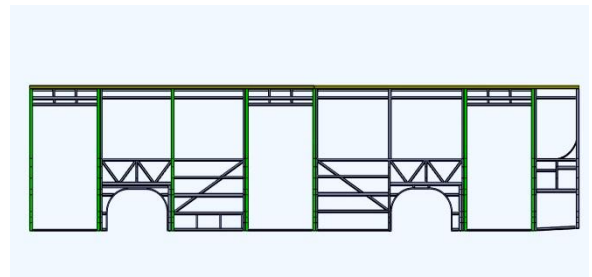


Figure. IV.3 : la face latérale droite

IV.4.3 L'ossature de pavillon

Longueur	10830mm
La largeur	2306mm
matériaux	S235

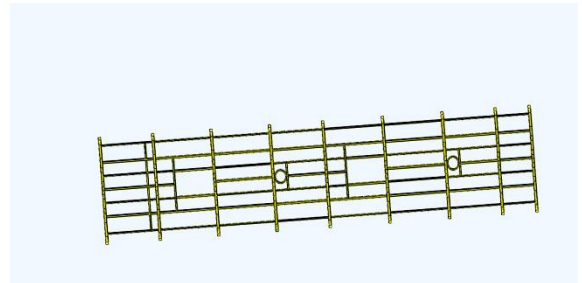


Figure. IV.4 : L'ossature pavillon

IV.5 Implantation de kit de bouteille de GNC

IV.5.1 Les différents éléments de réservoir de gaz GNC

1) Les bouteilles de GNC

C'est un produit acheté, fabriqué avec un matériau composite, notre réservoir contient 04 bouteilles équipées de 02 tuyauteries; une pour le remplissage et une pour le transport de gaz vers le moteur.

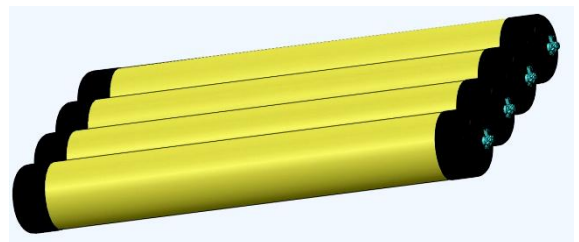


Figure. IV.5 : réservoir de gaz GNC

Chaque une de ces bouteilles pèse près de 200kg remplie.

2) Le berceau

C'est une solution proposé et conçu par la SNVI pour porter les bouteilles de GNC.

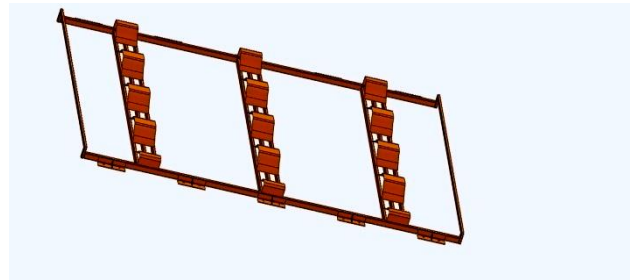


Fig.IV.6 : le berceau pour le réservoir

3) Le cache de réservoir

Il est conçu et fabriqué par la SNVI pour couvrir et protéger le réservoir, il contient 04 portières qui nous permettent d'entretenir du réservoir.

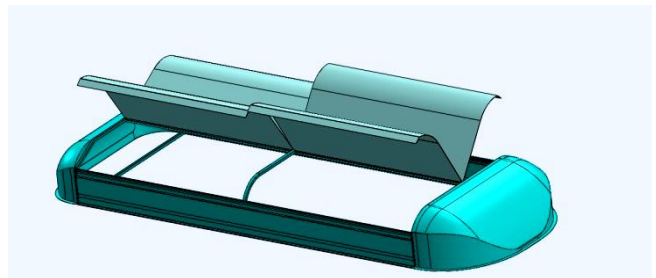


Figure. IV.7 : le cache de réservoir enveloppé

L'assemblage de l'ensemble réservoir, berceau et cache se fait à l'aide de 40 boulons hexagonales H M12 x50x30 de classe HR 10.9.

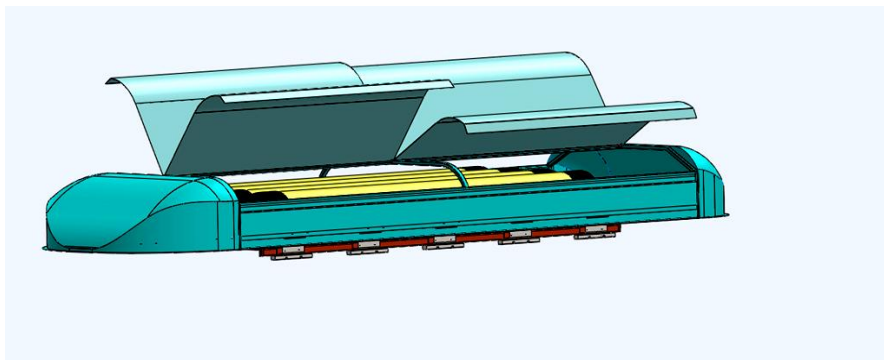


Figure. IV.8 : assemblage réservoir, berceau et cache

IV.5.2 Solutionne d'implantation de kit et de distribution de charge sur la structure

On a apporté des modifications sur la structure autoportante de bus, afin de pouvoir installer notre kit, alors on a ajouté 06 éléments poutres de section de forme U au niveau de la structure pavillon sur lesquelles on a fixé 10 cales qui vont recevoir la charge de kit et de réservoir .la figure ci-dessous montre cette implantation.

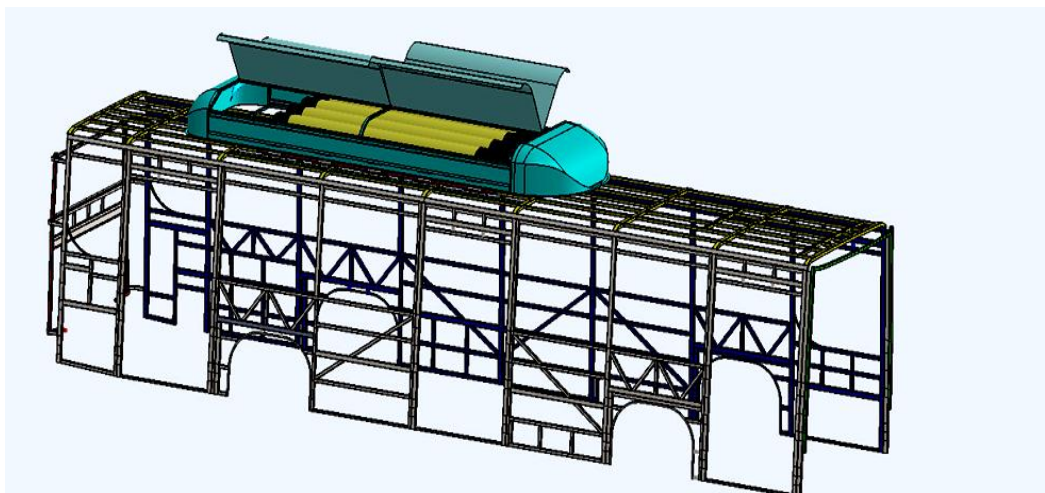


Figure.VI.9 : Assemblage de kit sur la structure

IV.6 Maillage et analyse de la structure

IV.6.1 Le but de l'analyse

Notre objectif de cette analyse, c'est de voir toutes les déformations et déplacements des composants de l'ossature de bus, après avoir exercé la charge de l'ensemble (réservoir, cache et berceau) sur l'ossature et de connaître la valeur des contraintes de Von mises générée par cette charge en tout point de l'ossature.

En effet, pour faire l'analyse pour toute la structure assemblée c'est très délicat par rapport au matériel dont on dispose et vu que les parties les plus sollicitées dans la structure sont : l'ossature de pavillon et les deux faces latérales gauche et droite alors, on a pensé de procéder ainsi :

- Analyser l'ossature pavillon
- Extraire les charges appliquées par le pavillon sur les faces latérales qui sont exprimées comme des réactions aux 18 points de contact entre le pavillon ces deux faces dans la 1^{ère} analyse.
- Appliquer ces charges sur les faces latérales dans les deux autres analyses

IV.6.2 Le maillage

Au cours de cette étape la géométrie de la structure d'autobus 100L6 est divisée en éléments finis par un mailleur automatique qui va se charger de la partie la plus fastidieuse du problème et qui dispose d'un contrôleur de maillage permettant de piloter la taille et la qualité de maillage.

Pour cette structure on a utilisé un maillage mixte, pour la plupart des composants on a fait un maillage volumique tétraédrique de haute qualité basé sur la courbure et grossier, et pour quelques un on a opté pour l'utilisation d'un maillage coque triangulaire.

IV.6.3 Analyse de l'ossature pavillon

Avant d'exécuter l'analyse de l'ossature pavillon on doit :

- effectuer un choix de matériaux **S235** ;
- chercher automatiquement toutes les surfaces en contact dans l'ossature, puis appliquer un contact solidaire entre eux ;
- Imposer des géométries fixes (encastrement) sur tout les bouts des arceaux de l'ossature ;
- Appliquer la charge de réservoir comme une charge répartie qui vaut **9810N** sur l'ossature ;
- Appliquer un contrôle de maillage sur les arceaux et toutes les pièces courbées de l'ossature ;
- Appliquer un maillage coque sur les deux anneaux de référence **1 179579**.

IV.6.3.2 Application des charges et les déplacements imposés

Après avoir recherché les surfaces de contact, on les rend solidaire puis, on impose une géométrie fixe sur les bouts de tout les arceaux de l'ossature pavillon et on applique une charge répartie sur les pièces de pavillon et on lance l'analyse.

IV.6.3.3 Résultats de l'analyse

Les résultats donnés par solidworks simulation sont sous forme de figure colorée du modèle qu'on veut analyser, où chaque couleur représente une valeur de contrainte, de déplacement ou bien de déformation, par exemple le bleu pour la valeur minimale et le rouge pour la valeur maximale, et on peut trouver les valeurs que représente chaque couleur dans une barre de couleur à coté de la figure du modèle, donc, en lisant sur la barre des couleurs on peut voir la partie la plus sollicitée de la structure et connaître la valeur de la contrainte, de déplacement ou de la déformation dans n'importe quel point de la structure.

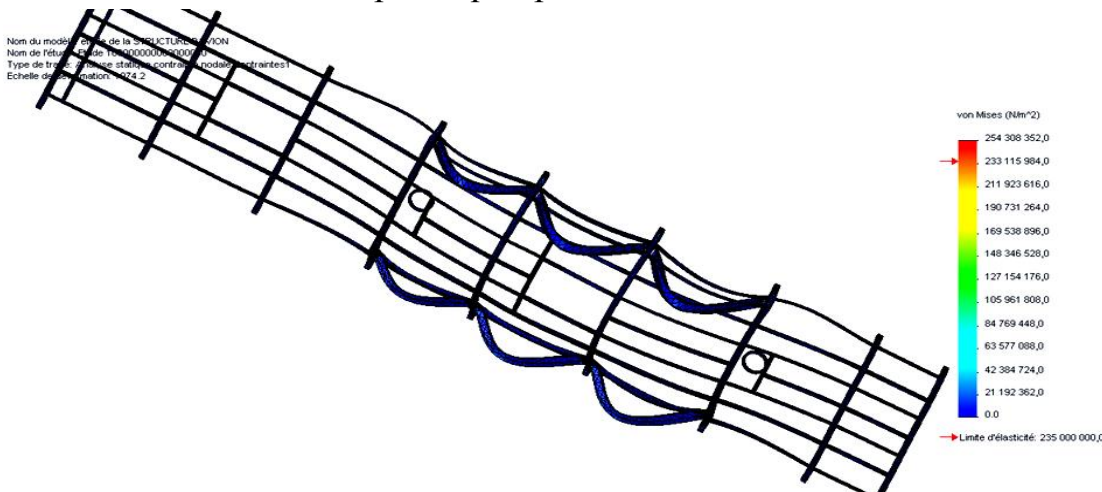


Figure. IV.11 : Le champ de contrainte dans l'ossature pavillon

Sur la figure **Fig. IV.11**, on remarque que la couleur qui domine cette structure est la couleur bleu, alors la plupart des contraintes dans le pavillon sont entre 0 et 42.384724 Mpa, et la valeur de la contrainte maximale dans l'ossature pavillon est 254.308352 Mpa.

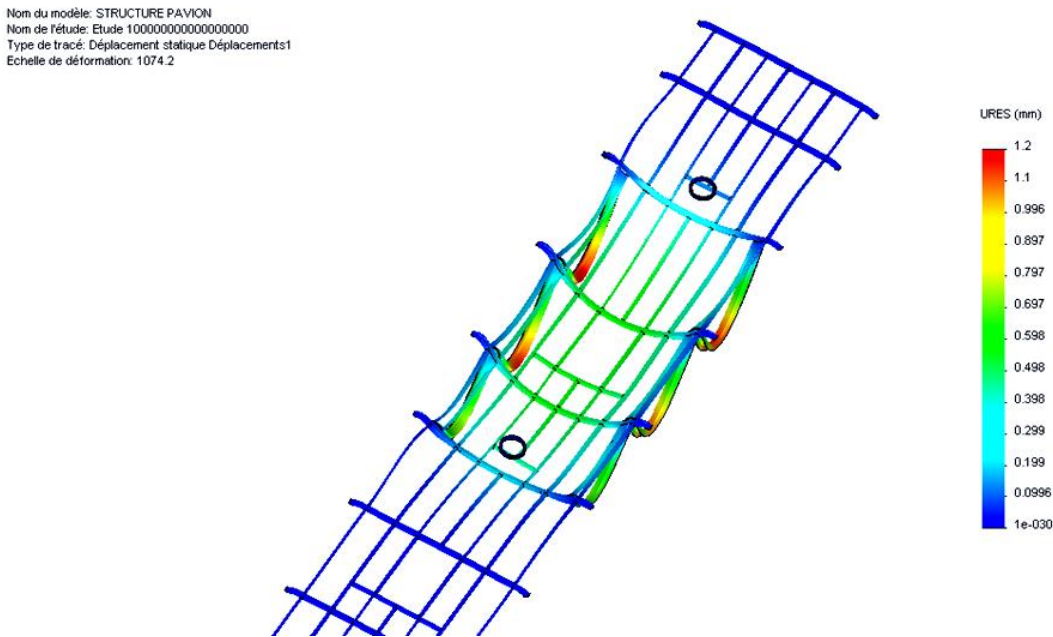


Figure.IV.12 :le champ de déplacements dans l'ossature pavillon

La figure **Fig.IV.12** nous montre que les composants qui subissent un grand déplacement sont les pièces 7x04 et ça on le voit sur la figure, représenté par la couleur rouge dont la valeur maximale de déplacement vaut 1.2mm.

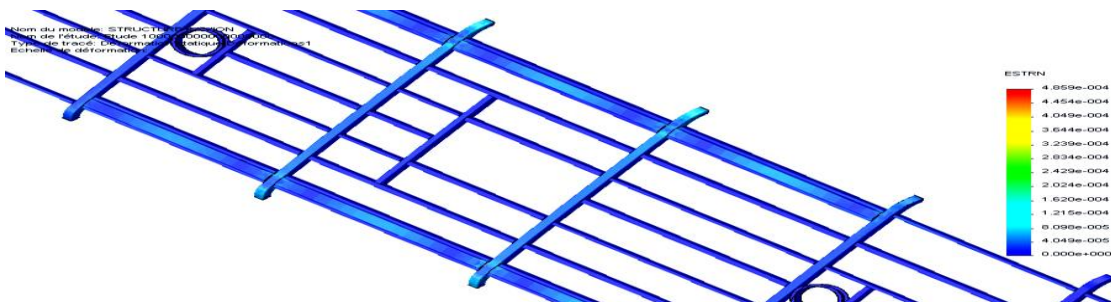


Figure.IV.13 : Le champs de déformation dans l'ossature pavillon

A partir de cette figure on peut dire que les pièces qui subissent des grandes déformations sont les arceaux de milieu, de référence 1 168730(4) et 1 171238(2) et ça se situe dans leurs extrémités et aux points de contact avec les pièces 7x04 et aussi ces dernières vont subir des déformations importantes au milieu et la valeur maximale de la déformation vaut 4.86×10^{-4} se trouve à l'extrémité de l'arceau 1 168 730.

IV.6.4 Analyse de la face latérale gauche

IV.6.4.1 Information sur le maillage

Type de maillage	Maillage mixte
Mailleur utilisé:	Maillage basé sur la courbure
Points de Jacobien	4 Points
Vérification du Jacobien pour la coque	Activé(e)
Taille d'élément maximum	23.8869 cm
Taille d'élément minimum	4.77737 cm
Qualité de maillage	Haute
Remailler les pièces en échec avec un maillage incompatible	Activé(e)
Informations sur le maillage – Détails	
Nombre total de noeuds	595142
Nombre total d'éléments	299423
Durée de création du maillage (hh:mm:ss)	00:01:25
Informations sur le contrôle de maillage	Entités: 11 composant(s) Unités: cm Taille: 1.05183 Ratio: 1.5

Tableau. IV.4 : les paramètres de maillage de la face gauche

IV.6.4.2 Application de charges et déplacements imposés

Les charges appliquées sur la face latérale gauche sont extraies de l'analyse de pavillon car dans cette analyse sont sous forme des reactions aux points d'encastrement, alors on les a appliqué sur les 09 faces de contact de pavillon et la face gauche et leurs valeur sont calculé automatiquement par le logiciel solidworks.

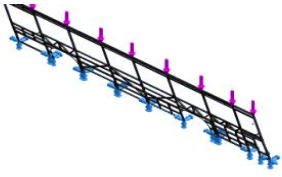
Nom du déplacement imposé	Image du déplacement impose	Détails du déplacement imposé
Fixe-2		1 arête(s), 22 Entités: face(s) Type: Géométrie fixe

Tableau. IV.5 : les déplacements imposés sur la face gauche

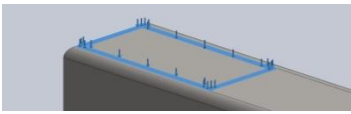
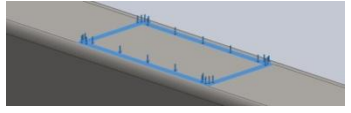
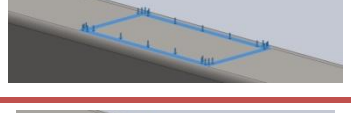
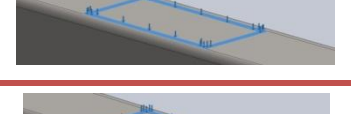
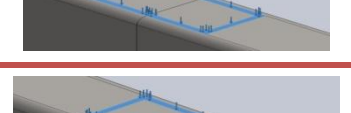
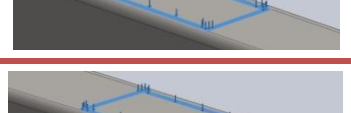
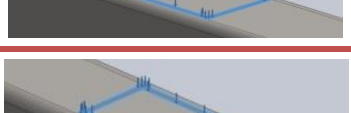

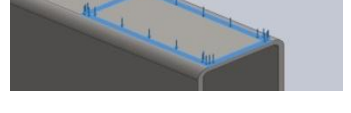
Nom du chargement	Image du chargement	Détails du chargement
Force-1		Entités: 1 face(s) Type: Force normale Valeur: 25.7644 N
Force-2		Entités: 1 face(s) Type: Force normale Valeur: 42.6828 N
Force-3		Entités: 1 face(s) Type: Force normale Valeur: 114.881 N
Force-4		Entités: 1 face(s) Type: Force normale Valeur: 1369.28 N
Force-5		Entités: 2 face(s) Type: Force normale Valeur: 2857.27 N
Force-6		Entités: 1 face(s) Type: Force normale Valeur: 3053.06 N
Force-7		Entités: 1 face(s) Type: Force normale Valeur: 1552.01 N
Force-8		Entités: 1 face(s) Type: Force normale Valeur: 129.626 N
Force-9		Entités: 1 face(s) Type: Force normale Valeur: 73.2969 N

Tableau. IV.6 : les charges appliquées sur la face gauche

IV.6.4.3 Résultats de l'analyse

Nom	Type	Min	Max
Déplacements1	URES: Déplacement résultant Tracé pour la déformée modale: 1(Facteur de chargement = 5.46849)	0 mm Noeud: 28861	14.4723 mm Noeud: 489570

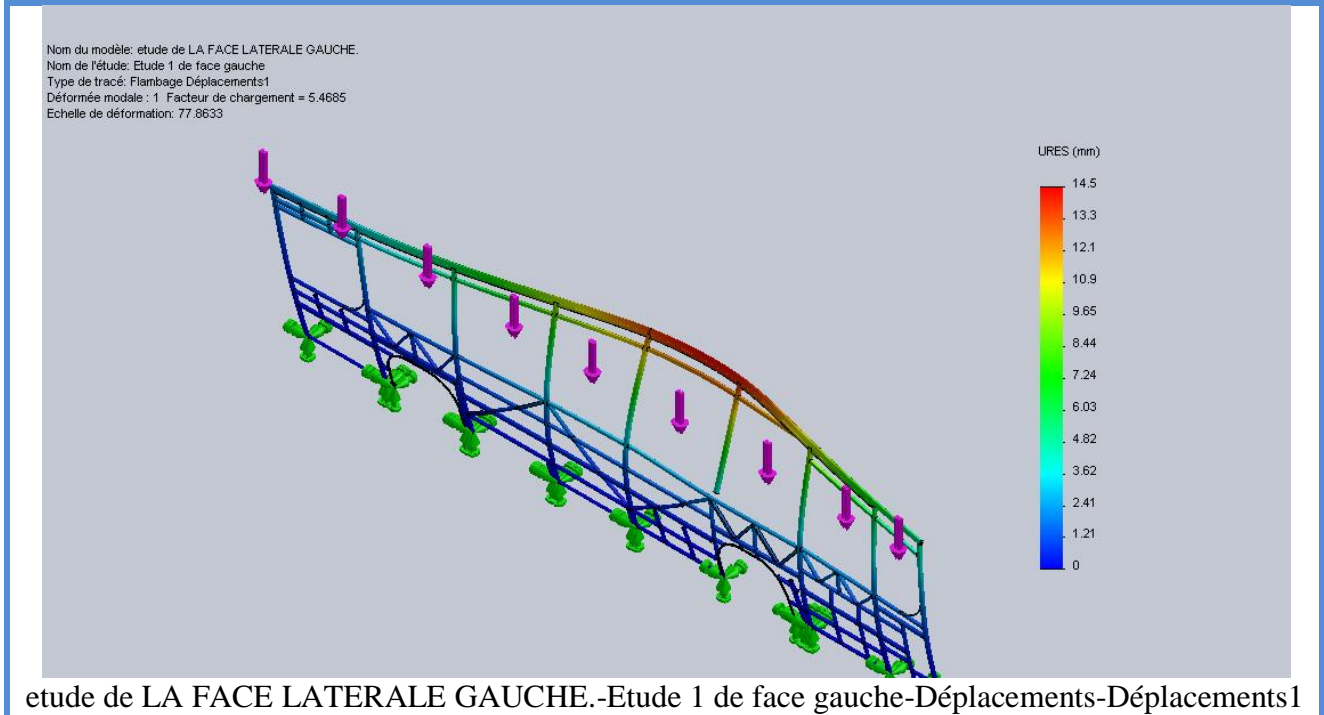


Figure. IV.14: Le champ des déplacements dans la face latérale

On peut voir les éléments qui subissent des grands déplacements à partir de cette figure et la valeur maximale de ce déplacement est 14,5mm.

IV.6.5 Analyse de la face droite

IV.6.5.1 Information sur le maillage

Type de maillage	Maillage mixte
Mailleur utilisé:	Maillage basé sur la courbure
Points de Jacobien	4 Points
Vérification du Jacobien pour la coque	Activé(e)
Taille d'élément maximum	46.5216 cm
Taille d'élément minimum	9.30431 cm
Qualité de maillage	Haute
Remailler les pièces en échec avec un maillage incompatible	Activé(e)
Informations sur le maillage - Détails	
Nombre total de noeuds	437390
Nombre total d'éléments	220308
Durée de création du maillage (hh;mm;ss):	00:02:45
Informations sur le contrôle de maillage:	Entités: composant(s) Unité: cm Taille: 1.05183 Ratio: 1.5

Tableau. IV.7 : les paramètres de maillage de la face droite

IV.6.5.2 Application des charges et déplacements imposés

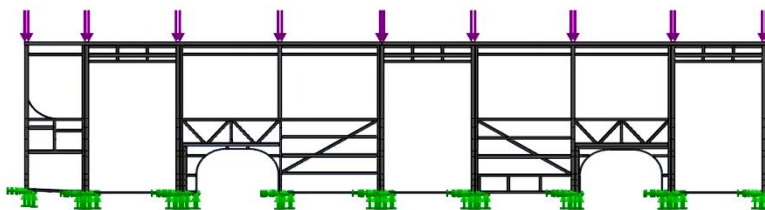


Figure. IV.15: la face droite sous un chargement

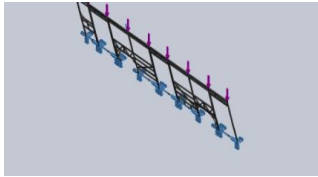
Nom du déplacement imposé	Image du déplacement imposé	Détails du déplacement imposé
Fixe-1		Entités: 1 sommet(s), 28 face(s) Type Géométrie fixe

Tableau. IV.8 : les déplacements imposés sur la face droite

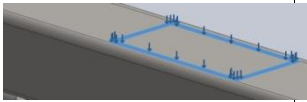
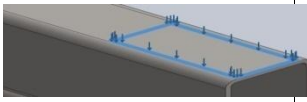
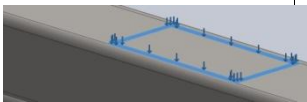
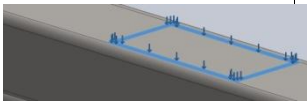
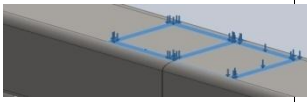
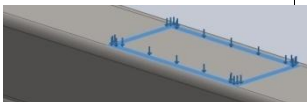
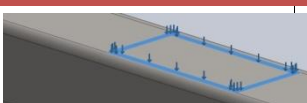
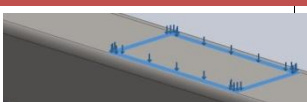
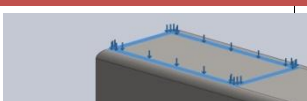
Nom du chargement	Image du chargement	Détails du chargement
Force-4		Entités: 1 face(s) Type: Force normale Valeur: 45.2578 N
Force-5		Entités: 1 face(s) Type: Force normale Valeur: 27.4015 N
Force-6		Entités: 1 face(s) Type: Force normale Valeur: 118.238 N
Force-7		Entités: 1 face(s) Type: Force normale Valeur: 1330.54 N
Force-8		Entités: 2 face(s) Type: Force normale Valeur: 2836.6 N
Force-9		Entité: 1 face(s) Type: Force normale Valeur: 3038.8 N
Force-10		Entités: 1 face(s) Type: Force normale Valeur: 1484.36 N
Force-11		Entités: 1 face(s) Type: Force normale Valeur: 136.69 N
Force-12		Entités: 1 face(s) Type: Force normale Valeur: 78.2706 N

Tableau. IV.9: Les charges appliquées sur la face droite

Les charges appliquées sur la face latérale droite sont aussi extraites de l'analyse de pavillon et dans cette analyse sont sous forme des reactions aux points d'encastrement de pavillon, alors on les a appliqué sur les 09 faces de contact de pavillon et la face droite et leurs valeur sont calculées automatiquement par le logiciel solidworks.

IV.6.5.3 Résultats de l'analyse

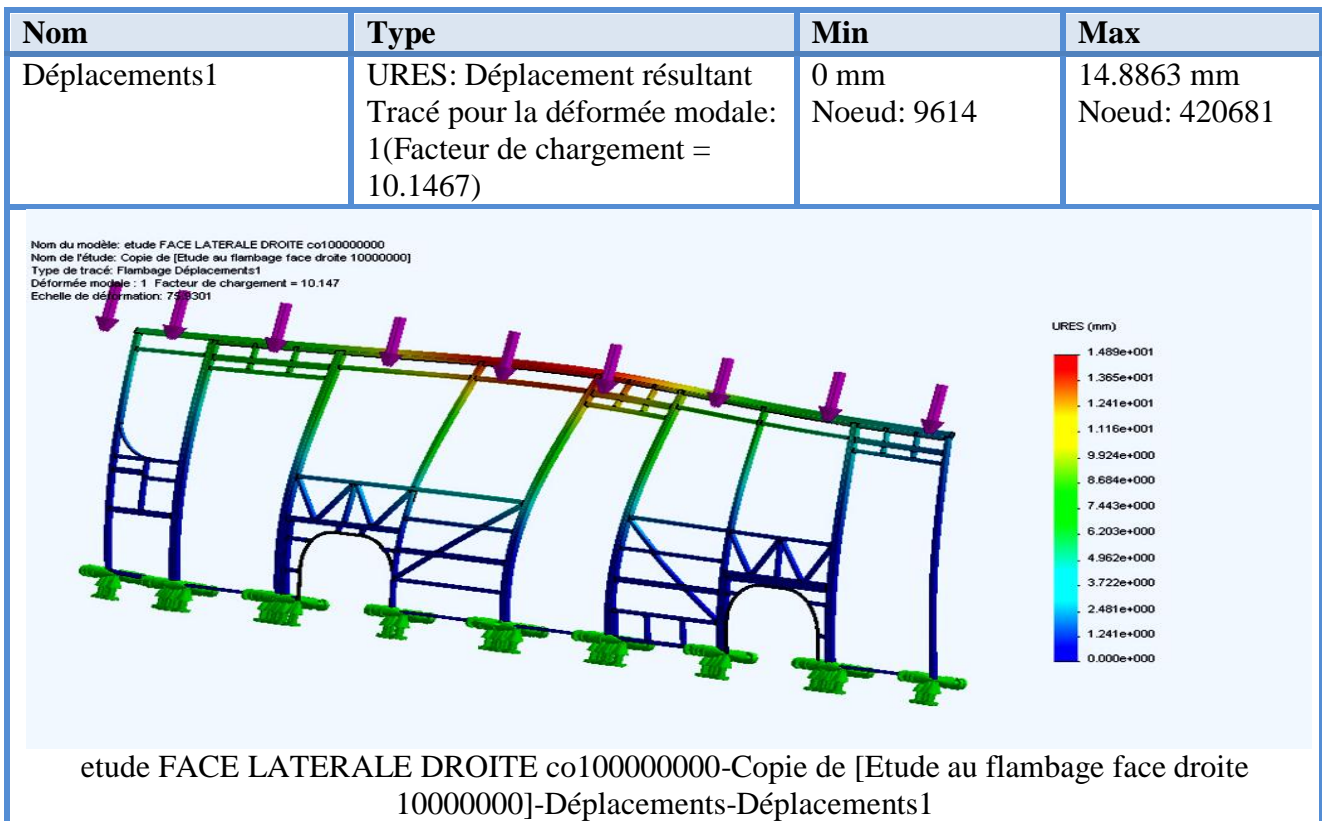


Figure. IV.16 Le champ des déplacements dans la face droite

On peut voir les éléments qui subissent des grands déplacements à partir de cette figure et la valeur maximale de ce déplacement est 14,8863mm.

IV.7 Interprétation de tous les résultats

A partir des résultats qu'on a eu dans les analyses précédents sur la structure d'autobus 100L6 on constate que :

Dans l'étude statique qu'on a faite pour l'ossature pavillon, ce dernier subit des déformations dans la partie où on a implanté le kit de réservoir au niveau des pièces 7x04 et les 02 arceaux de milieu qui porte ce kit.

Dans les deux autres études en flambage faites sur les 02 faces latérales on constate depuis les champs des déplacements que la zone la plus sollicitée, est celle du milieu où on a implanté le kit, on constate un flambement des montants de référence 1 171194, 1 168 786 et 1 168700 et la flexion des pièces de référence 1 171143 et 1 171142.

Alors on est sensé de porter des modifications ou des renforcements dans ces parties de la structure afin de remédier à ces déformations.

IV.8 Conclusion

cette analyse qu'on a faite avec le logiciel solidworks basée sur la méthode des éléments finis nous a permis de déterminer la distribution des contraintes et des déformations dans la structure d'autobus 100L6 générés par la charge de la réserve du gaz GNC et du kit qui porte cette réserve qu'on vient d'implanter sur cette structure.

En prenant en considération les résultats de cette analyse, on peut proposer des solutions qui vont diminuer ces déformations et rendent notre structure plus résistante au chargement qu'on a lui imposé.

Chapitre V :

Proposition De La

Solution

V.1 Introduction

La résistance des matériaux est un outil indispensable à toute modélisation en calcul des structures. Même si d'autres méthodes (par exemple les éléments finis) sont en général utilisées, un calcul rapide de RDM permet de vérifier les ordres de grandeur et de juger de l'opportunité d'utiliser d'autres méthodes plus complexes.

Dans ce chapitre, à l'aide de la RDM nous allons calculer les éléments les plus sollicités de la structure et nous essayons d'expliquer leur comportement, afin d'apporter des modifications dans ces zones dangereuses de la structure et d'améliorer la résistance de cette dernière et de fixer les conditions d'assemblage de la structure, puis nous allons exposer la solution proposée par la SNVI et les améliorations faites sur l'ossature de bus 100L6.

V.2 L'explication du problème en vu de la RDM

V.2.1 Modélisation de l'arceau le plus sollicité en flexion

Depuis l'analyse qu'on a faite sur l'ossature pavillon dans le chapitre précédent l'arceau le plus sollicité est soumis à un chargement d'une valeur de 3053.6N appliqué à chaque extrémité de l'arceau et exprimé sous forme d'une réaction des deux faces latérales sur le pavillon.

À l'aide de logiciel de modélisation RDM 6 on va essayer de faire une modélisation de l'arceau en le considérant comme une poutre droite et avoir plus d'explication sur notre problème.

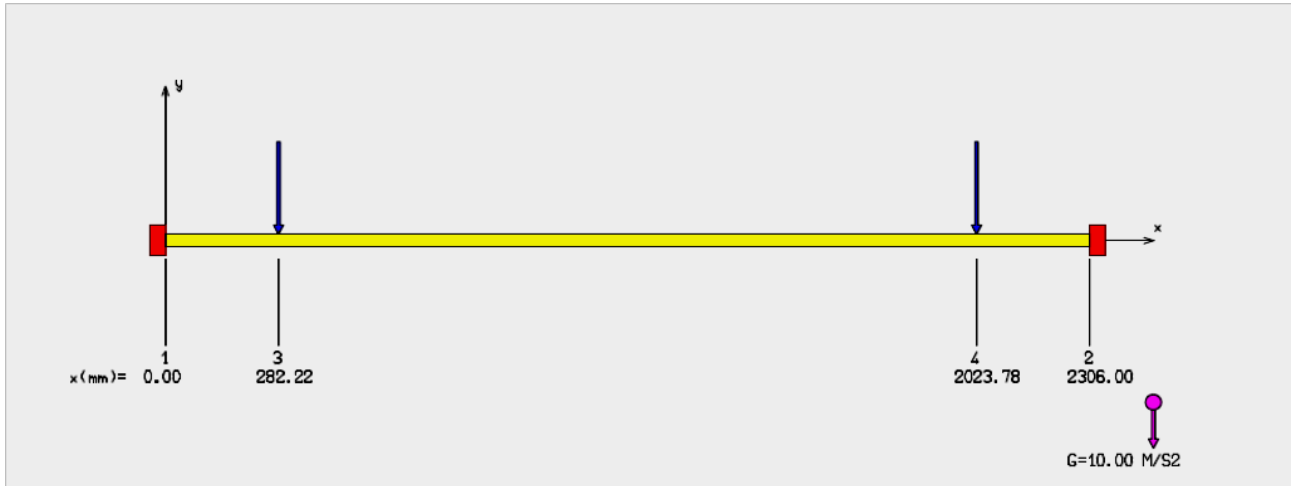


Figure.V.01.la chargement de l'arceau

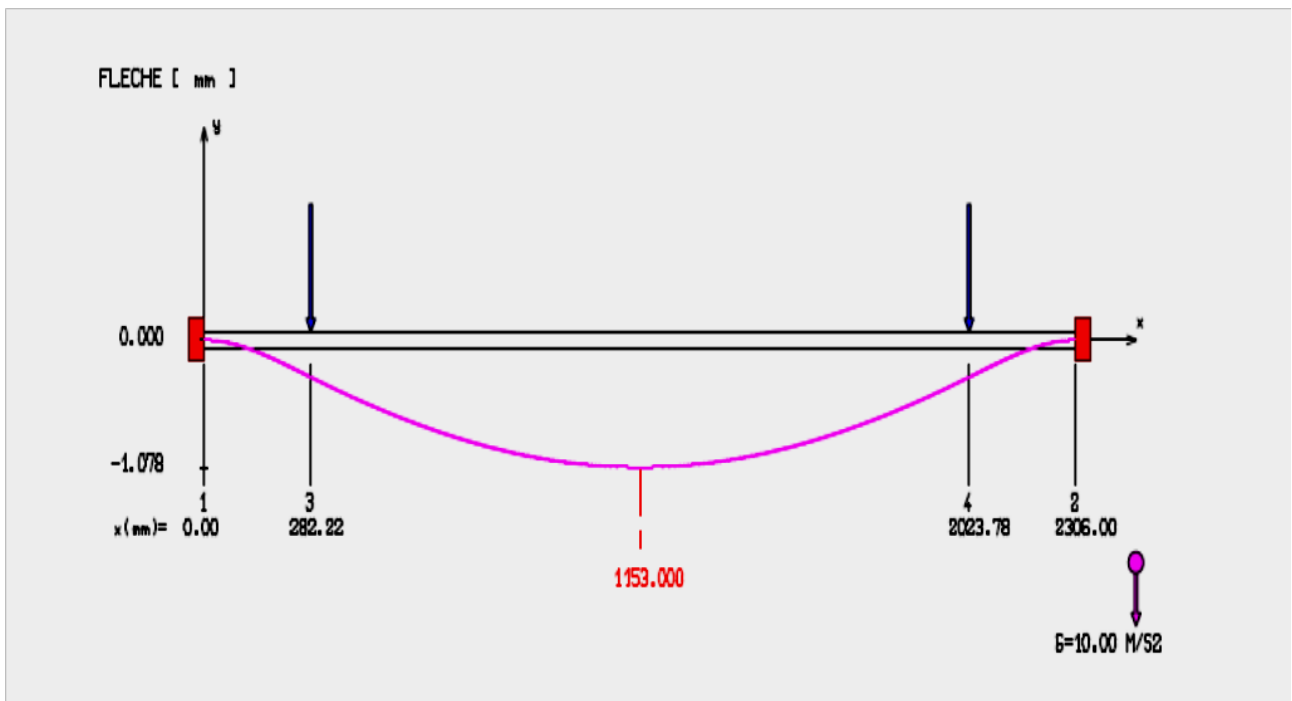


Figure.V.02.la flèche maximale que subit l'arceau

La valeur de la flèche maximale de l'arceau vaut 0.1052mm, ce résultat confirme le résultat obtenu dans l'analyse qu'on a fait sur solidworks dans le chapitre VI dont la valeur maximale vaut 0.6mm.



Figure. V.03.le moment fléchissant

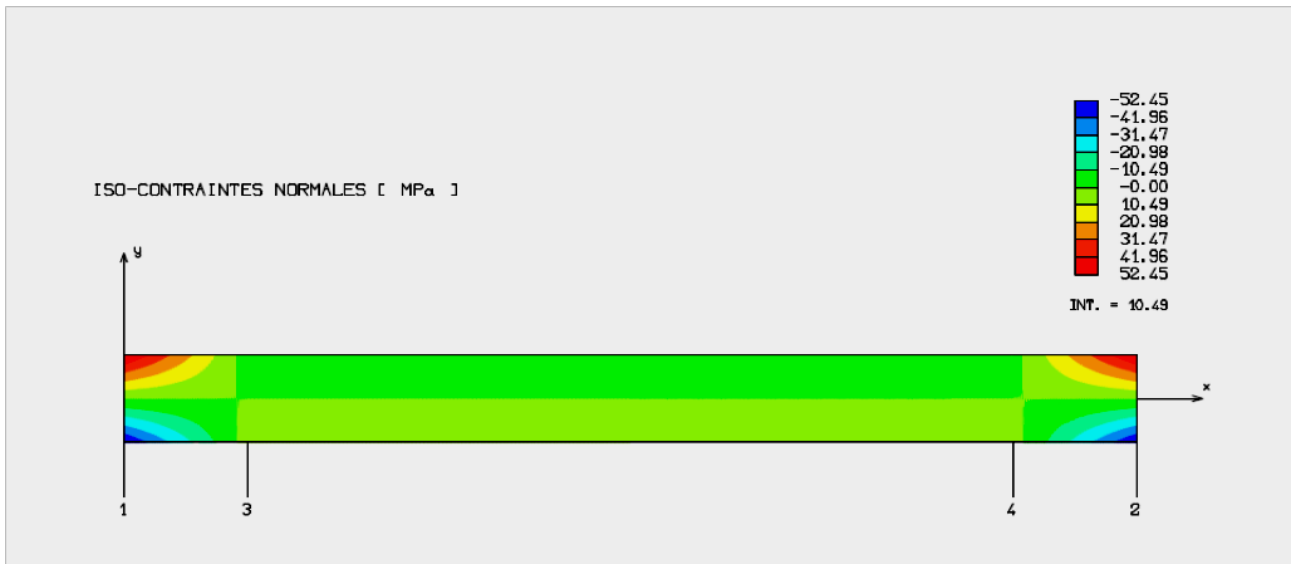


Figure.V.04.la contrainte normale que subit l'arceau

Dans le chapitre précédent on a vu que pour la majorité des composants la valeur de la contrainte de Von mises est incluse entre 0 et 42.384724Mpa, et sur la figure **Fig.V.04** on constate que la contrainte maximale que subit l'arceau est 52.45Mpa ce qui confirme le résultat de la 1^{er} analyse et aussi ces deux contraintes obtenues dans les deux analyses sont inferieures à 235Mpa qui est la limite élastique

de matériau donc on a bien fait de choisir l'acier S235 pour la construction de la structure .

V.3 la solution proposée par la SNVI

Pour minimiser les déformations que subit la structure et la rendre plus résistante aux contraintes générées par la charge de réservoir de gaz, l'équipe qui travaille sur ce projet au niveau de la SNVI a proposé des solutions de renforcement de la structure dans les zones dangereuses détecté dans la simulation qu'on a fait.

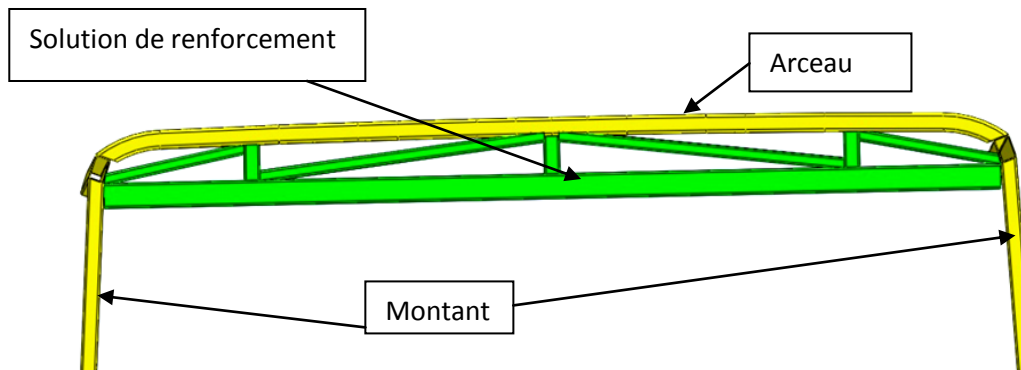


Figure. V.05.Solution de renforcement de l'arceau

A partir de la figure. V.05 on remarque que cette solution renforce pas uniquement l'arceau mais aussi les montants des faces latérale qui sont sollicités en flambement et subissent un chargement de 3053.06N.

On a effectué aussi des modifications au niveau des faces latérales en ajoutant des éléments qui renforcent la structure.

V.4 Etudes des éléments qui portent le berceau et calcul de cordon de soudure

L'assemblage de tous les éléments de notre structure s'est fait par soudage à l'arc électrique, qui est un procédé qui permet la liaison intime de la matière obtenu par la fusion ou par plastification.

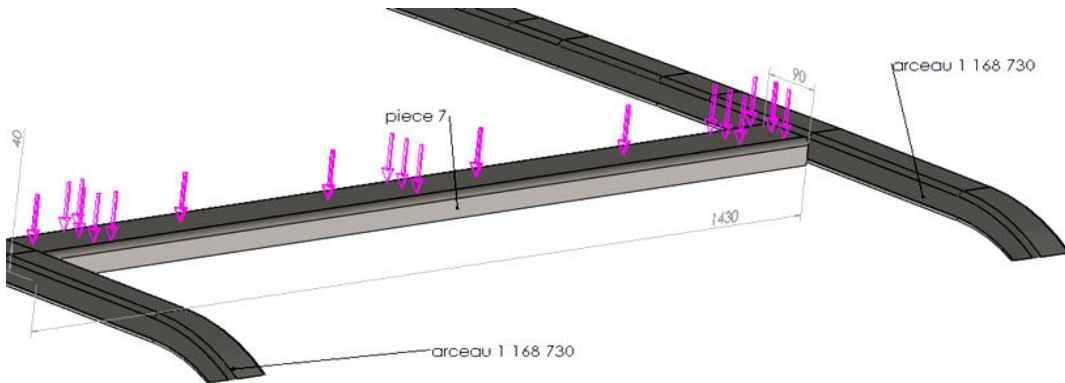


Figure. V.06. La poutre la plus sollicitée en flexion

La pièce 7 qui porte le berceau de réservoir est sollicitée en flexion alors le cordon de soudure qui la relie avec les deux arceaux est soumis à :

- Une flexion par le moment M_f .
- Un cisaillement par la force F .

Nous sommes appelé à faire un calcul de soudage pour l'assemblage de la pièce 7 la plus sollicitée dans la structure sur laquelle on a fixé le berceau qui porte les bouteilles et les deux arceaux de référence 1168730, et de déterminer l'épaisseur « e » de ce cordon de soudure.

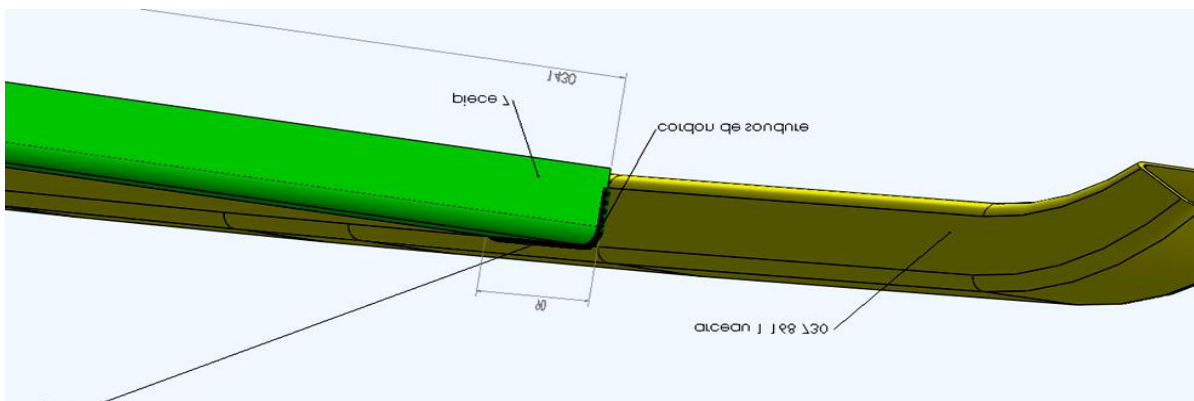


Figure. V.07. Représentation de cordon de soudure

V.4.1 Calcul de la charge appliquée sur la pièce 7

La masse de l'ensemble bouteilles pleines +les berceaux+le cache de réservoir est égale à 1000Kg.

La force générée par cette masse est :

$$F = m \times G \Rightarrow F = 1000 \times 9.81 \Rightarrow F = 9810N.$$

La force F est répartie sur les faces des pièces 7 et 08 de la même valeur de chaque côté gauche et droite respectivement et qui est égale à :

$$F' = \frac{F}{2} = \frac{9810}{2} = 4905N$$

La charge F' est aussi répartie sous forme de charge linéaire q sur la longueur L=4.260m.

- Calcul de la charge linéaire q :

$$q = \frac{F'}{L} = \frac{4905}{4.26} = 1151.4 \text{ N/m} .$$

- Calcul de la charge concentrée N :

$$N = q * \frac{L}{2} \Rightarrow N = 1151,4 * \frac{4.26}{2} \Rightarrow N = 2452.5N.$$

La charge concentrée N se trouve sur la pièce 7 à une distance de 640mm et de 790mm.

- Condition de résistance

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_f^2 + \tau_{cis}^2} \leq [\sigma]^s$$

$[\sigma]^s$: Contrainte admissible du cordon de soudure

$$[\sigma]^s = \frac{\sigma_e}{S} * v$$

σ_e : La limite élastique des matériaux des éléments assemblés $\sigma_e = 235\text{Mpa}$.

s : le coefficient de sécurité pour une charge statique $s = 1.5$ à 2 .

v : le coefficient de qualité du joint, pour notre assemblage qui est sollicité en flexion $v = 0.8$.

AN :

$$[\sigma]^s = \frac{235}{2} * 0.8 \quad \Rightarrow [\sigma]^s = 94\text{Mpa}.$$

- **La contrainte de flexion**

$$\sigma_f = \frac{M_f}{w_f}$$

- Le moment de flexion M_f

$$M_f = N * 790 \quad \Rightarrow \quad M_f = 2452.5 * 790$$

$$\Rightarrow M_f = 1937475 \text{ N.mm}$$

- Le module de flexion de cordon w_f

$$w_f = \frac{I_z}{v_{max}}$$

$$I_z = I_{uz} * e$$

Pour notre type de cordon on a :

$$I_{uz} = \frac{2d^3}{3} - 2d^2 * y_G + (b + 2d) * y_G^2$$

$$y_G = \frac{d^2}{2d+b} = \frac{40^2}{2*40+60} \quad \Rightarrow \quad y_G = 11.43\text{mm}$$

Donc

$$I_{uz} = \frac{2 * 40^3}{3} - 2 * 40^2 * 11.43 + (60 + 2 * 40) * 11.43^2$$

$$I_{uz} = 24380.95 \text{ mm}^3$$

Donc

$$I_z = 24380.95 * e$$

La fibre la plus éloignée $v_{max} = \frac{d}{2} = \frac{40}{2}$

Alors

$$w_f = \frac{I_z}{v_{max}} = \frac{24380.95 * e}{20} = 12190.475 * e.$$

$$\sigma_f = \frac{M_f}{w_f} = \frac{1937475}{12190.475 * e} = 158.933 \frac{1}{e}$$

- **La contrainte de cisaillement**

$$\tau_{cis} = \frac{F}{S} = \frac{F}{2(d*e) + e*b} = \frac{F}{(2*d+b)*e} .$$

$$\tau_{cis} = \frac{2452.5}{(2*40+60)*e} = 17.52 * \frac{1}{e} .$$

Donc

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\left(158.933 \frac{1}{e}\right)^2 + \left(17.52 \frac{1}{e}\right)^2} \leq 94 \text{ Mpa} .$$

$$\sigma_{eq} = \frac{159.895}{e} \leq 94 \text{ Mpa}.$$

$$\Rightarrow e \geq 1.70 \text{ mm}.$$

Le cordon de soudure doit y avoir une épaisseur $e \geq 1.70 \text{ mm}$.

V.5 Dimensionnement des boulons

Pour l'implantation de berceau sur le pavillon on a opté pour l'utilisation de 20 boulons de vis hexagonale H M12 x50x30 de classe HR 10.9.

Ces vis sont soumis à la traction alors on est sensés de calculer la charge maximale pondérée N_{\max} que peut supporter l'assemblage puis on doit la comparer avec la charge appliquée par l'ensemble réservoir, cache et berceau qui a une valeur de $F=m*g=1000 *9.81. \Rightarrow F= 9810N$, pour vérifier la résistance de ces boulons.

De la classe 10.9 on extrait f_{ub} et f_{yb} :

$$\frac{f_{ub}}{100} = 10 \Rightarrow f_{ub} = 10 \times 100 = 1000 \text{Mpa.}$$

$$\text{Et } \frac{f_{yb}}{f_{ub}} * 10 = 9 \Rightarrow f_{yb} = \frac{9*f_{ub}}{10} = 900 \text{Mpa.}$$

Les caractéristiques de la vis choisie sont :

La classe	Le diamètre (mm)	La longueur (mm)	La longueur de la partie filetée (mm)	As (mm ²)	f_{ub} (Mpa)	f_{yb} (Mpa)	Γ_{mb}
HR10.9	12	50	30	69.36	1000	900	1.5

Tableau. V.1 : les caractéristiques de la vis

As : aire de la section résistante de la partie filetée de boulon.

f_{ub} : la résistance maximale a la traction.

f_{yb} : la limite élastique.

Γ_{mb} : le coefficient partiel de sécurité.

n : le nombre de boulons utilisés.

La condition de résistance est :

$$N \leq F_T * n$$

Dont la résistance d'un boulon à la traction vaut $F_T = 0.9 * f_{ub} * \frac{As}{\Gamma_{mb}}$

$$F_T = 0.9 * 1000 * \frac{69.36}{1.5} \Rightarrow F_T = 41616 \text{ N}$$

$$N_{\max} = F_T * n \Rightarrow N_{\max} = F_T * 20$$

$$\Rightarrow N_{\max} = 832.320 \text{ KN.}$$

La charge appliquée $F < N_{\max}$ donc, on peut dire que les boulons qu'on a choisis peuvent résister à cette charge.

V.6 Conclusion

les résultats qu'on a obtenu de l'analyse par solideworks simulation de la structure d'autobus 100L6 nous ont permis de localiser les zones dangereuses dans la structure et pour mieux comprendre les déformations dans ces zones la résistance des matériaux nous a offert plus d'explication ,et à base de tout ces résultat on a pu apporter des modification sur notre structure afin qu'elle puisse résister plus a la charge qu'on a lui imposée

Conclusion

Générale

Conclusion Générale

Une analyse par éléments finis en utilisant le logiciel de conception et d'analyse des Structures solideworks a été effectuée sur la structure autoportante d'autobus 100L6, les résultats obtenus ont montrés les endroits des déformations maximales et à base des théories de la résistance des matériaux, on a essayé dans ce travail de donner une explication de ces déformations générée par la charge de la réserve de gaz GNC.

En effet, les parties qui subissent le chargement imposé ou les plus sollicitées dans la structure d'autobus 100L6 ont été complètement modélisées et analysées par la méthode des éléments finis.

C'est désolant qu'on n'a pas pu faire l'analyse pour toute la structure afin de s'approcher des valeurs plus exactes des déformations de la structure, car une analyse pareille nécessite un matériel informatique de grande capacité mémoire ou bien une station de calcul pour avoir des résultats plus précis et dans un temps très court.

En fin et compte tenu du matériel mis à notre disposition la solution a été subdivisée en parties de simulation pour aboutir à un résultat dans notre travail, et tenant compte de ce résultat de simulation avec solideworks on peut dire que la solution proposée par la SNVI peut remédier à ces déformations ou aux moins les réduire mais ça reste toujours dans le cas statique car après la mise en marche de produit ,ce dernier va subir des vibrations qui vont multiplier la charges de la réserve de gaz GNC et dans ce cas on devra faire une nouvelle analyse de type analyse dynamique en prenant en considération ces vibrations, la vitesse, l'accélération d'autobus.






Ce projet nous a permis de faire nos premiers pas dans la conception, dans le sens où nous avons étudié la structure d'un véhicule de la SNVI qui est l'autobus 100L6.

Annexes





Annexe A :








Quelques fonctions de
logiciel solidworks

Quelques fonctions d'esquisse

	Base/Bossage extrudé : Pour créer une base, une surface ou un bossage extrudé.
	Enlèvement de matière extrudé : Pour créer un enlèvement de matière par extrusion.
	Révolution : Révolution crée une base, un bossage, un enlèvement de matière ou une surface en faisant tourner une esquisse autour d'une ligne de construction.
	Balayage : Balayage crée une base, un bossage, un enlèvement de matière ou une surface en déplaçant un profil(section) le long d'une trajectoire.
	Lissage : Lissage crée une fonction en reliant des profils. Un lissage peut être une base, un bossage, un enlèvement de matière ou une surface.

Quelques fonctions appliquées

	Congés et arrondis : Congé/arrondis crée une arête arrondie interne ou externe sur la pièce. Vous pouvez ajouter des congés à toutes les arêtes d'une face, d'un ensemble de faces sélectionnées, à des arêtes sélectionnées ou à des boucles d'arêtes.
	Chanfrein : Chanfrein crée un biseau sur les arête et ou les faces sélectionnées..
	Dépouille : Dépouille crée une dépouille en utilisant un angle spécifié, sur des faces du modèle, pour faciliter le démoulage d'une pièce moulée. Vous pouvez ajouter une dépouille sur une pièce existante ou dépouiller simultanément pendant l'extrusion d'une fonction. Vous pouvez dépouiller en utilisant soit un plan neutre ,soit un ligne neutre.
	Perçage : Perçage permet de créer différentes fonctions de perçages dans le modèle. Vous placez un trou sur une surface plane puis spécifiez sa position en le contraignant

	<p>ultérieurement.</p> <p>Perçage simple place un perçage circulaire de la profondeur que vous spécifiez.</p> <p>Assistance pour le perçage crée des perçages complexes, tels que chambrage à fond plat ou fraisé.</p>
	<p>Coque : Coque creuse la pièce en laissant ouvertes les faces que vous sélectionnez et en laissant des parois minces sur les faces restantes. Si vous projetez d'ajouter des congés à la pièce vous devez le faire avant de transformer la pièce en coque.</p>
	<p>Répétition linéaire : Vous pouvez utiliser une répétition linéaire pour créer rapidement plusieurs copies d'une ou de plusieurs fonctions dans une ou deux directions.</p>
	<p>Répétition circulaire : Vous utilisez une répétition circulaire pour créer plusieurs copies d'une fonction ou plus en effectuant une rotation autour d'un axe.</p>
	<p>Fonction de symétrie : La fonction de symétrie crée une copie d'une ou plusieurs fonctions, symétriquement par rapport à un plan ou une face plane. Vous pouvez utiliser un plan existant ou en créer un nouveau. Si vous modifiez la fonction d'origine, la copie symétrique est mise à jour avec les changements effectués.</p>
	<p>Nervure : Nervure est un type spécial de fonction extrudée, créée à partir d'un contour d'esquisse ouverte. Elle ajoute du matériau, d'une épaisseur spécifiée, dans une direction donnée entre le contour et la pièce existante.</p>
	<p>Dôme : Vous pouvez ajouter une fonction Dôme à toute face plate d'un modèle.</p>
	<p>Déformation : Déformation crée une surface déformée à partir d'une face sur un modèle. Une surface déformée est flexible comme une membrane. Elle peut être étendue, contrainte et réduite à l'aide de défileurs de l'onglet contrôle de la boîte de dialogue fonction de déformation.</p>

Annexe B :

**Fiche technique de bus
100L6**



AUTOBUS : 100 L6



DIMENSIONS (mm)

<i>Empattement</i>	5 600
<i>Porte-à- faux Avant</i>	2 562
<i>Porte-à- faux Arrière</i>	3 360
<i>Longueur hors tout</i>	11 522
<i>Largeur hors tout</i>	2 500
<i>Hauteur à vide</i>	2 920
<i>Porte Avant</i>	1 424
<i>Porte Arrière</i>	1 430
<i>Garde au sol Avant</i>	189
<i>Garde au sol Arrière</i>	247
<i>Voie Avant</i>	2 063
<i>Voie Arrière</i>	1 888
<i>Angle d'attaque</i>	8°
<i>Angle de fuite</i>	8°

POIDS (kg)

<i>Poids Total en Charge</i>	16 000	
<i>Charge maxi. admissible sur</i>	<i>Essieu AV.</i>	6 000
	<i>Essieu AR.</i>	10 000
<i>Poids du véhicule en ordre de marche</i>	9 260	
<i>Répartition de ce poids sur :</i>	<i>Essieu AV.</i>	2 730
	<i>Essieu AR.</i>	6 530

Capacité : 100 personnes dont 24 assises
2 portes louvoyantes : Avant et milieu
Boite de vitesses automatique
Suspension : pneumatique et mécanique

FICHE DESCRIPTIVE

100L6

MOTORIZATION CUMMINS

MOTEUR

Type :	CUMMINS C300-20
Nbre de cylindres :	6 en ligne
Injection :	Directe
Alésage/course (mm):	114/135
Cylindrée:	8,3 L
Taux de compression:	16,5/1
Carburant:	Gasoil
Puissance maxi:	296ch (221kW) à 2200 tr/mn
Couple maxi:	1125 Nm à 1400 tr/mn
Aspiration:	turbocompressée
Refroidissement :	à eau
Capacité d'huile :	23,6 L

EMBAYAGE

Sans

BOITE DE VITESSES

ZF 5 HP 592 à commande automatique
5 rapports AV Synchronisés + 1 m AR.
Rapports extrêmes: 3.43-.83
Convertisseur 2,2 : 1

PONT ARRIERE

SNVI P1021X
couple conique à dentures hypoides et réducteurs dans les moyeux.
Couple: 12x41x1/2 (réduction totale :6.83)
Ou
Couple: 10x41x1/2 (réduction totale :8.2)
ESSIEU
Type : RI6A à roues indépendantes

DIRECTION

SNVI ZF 8098 à assistance hydraulique intégrée

SIEGES VOYAGEURS

En polyester avec revêtement mousse et tissu.
Bâti en tube acier

SIEGE CONDUCTEUR

Dossier inclinable et assise réglable en hauteur et en longueur.
Revêtement en tissu plastique

PORTES

3 portes louvoyantes à 2 vantaux, grande glace en deux parties sur chaque vantail, poignées et rambardes.

Commande électropneumatique des portes avant, centrale et arrière par le conducteur.

BAIES

Glace de grande surface en verre sécurit.
Pare-brise panoramique.

SUSPENSION

AVANT : 2 ressorts hélicoïdaux + 2 amortisseurs télescopiques et 2 coussins d'air.

ARRIERE : 2 ressorts à lames + 2 amortisseurs télescopiques et 4 coussins d'air.
Barre de torsion à l'Av et l'AR.

FREINAGE ABS

-Frein principal (service):

Frein à pied, à air comprimé agissant sur l'ensemble des roues. Freins à tambours ou à disques sur roues AV. et AR. avec ABS
Circuits avant et arrière indépendants

- Frein de secours :

Indépendant, commandé par robinet et agissant sur les roues AR.

- Frein de stationnement :

Dispositif à verrou à blocage mécanique agissant sur les roues AR.

- Ralentisseur Intégré sur boîte

EQUIPEMENT ELECTRIQUE

Tension : 24 V

2 accumulateurs de 12 volts chacun Capacité : 200 AH.

Alternateur de 125 A.

PNEUMATIQUES

Dimension : 11 R 22,5 tubeless

AV : simples, AR : jumelées

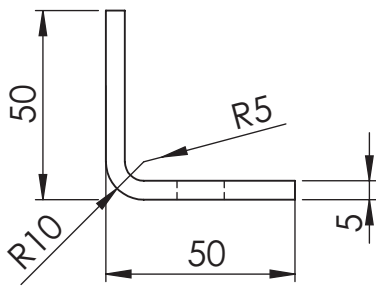
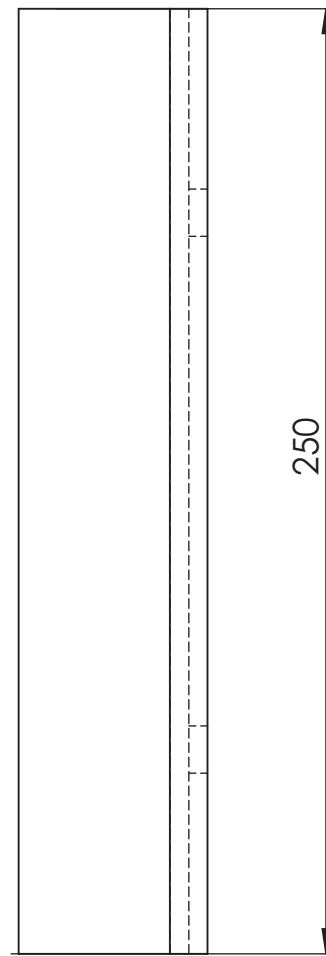
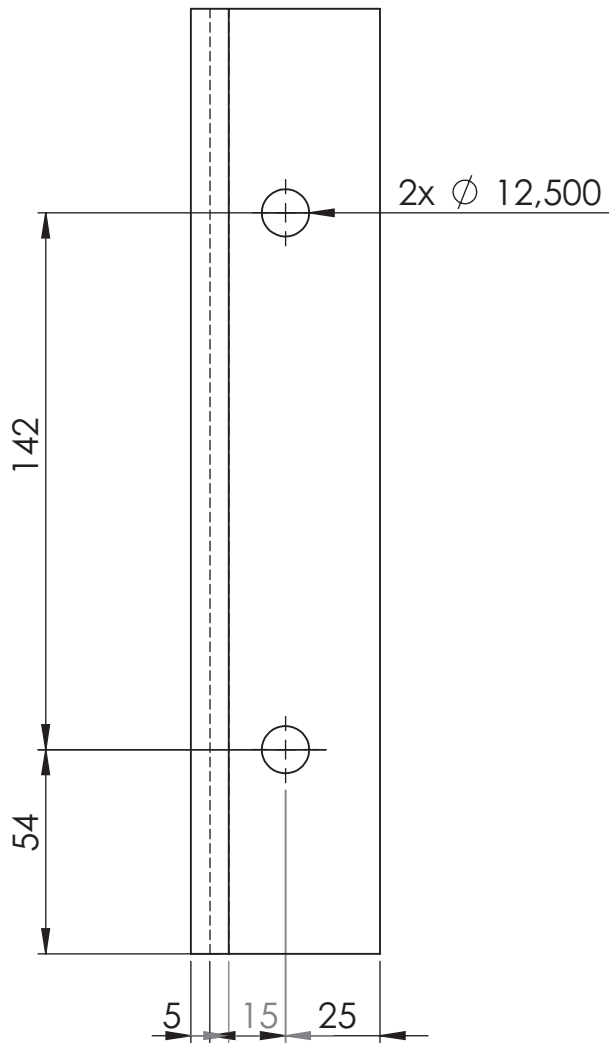
RESERVOIR DE CARBURANT


Capacité : 1 réservoir aluminium 250 L

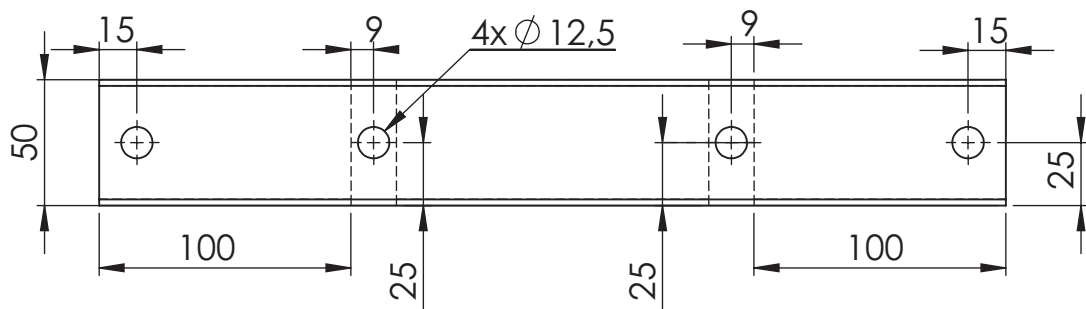
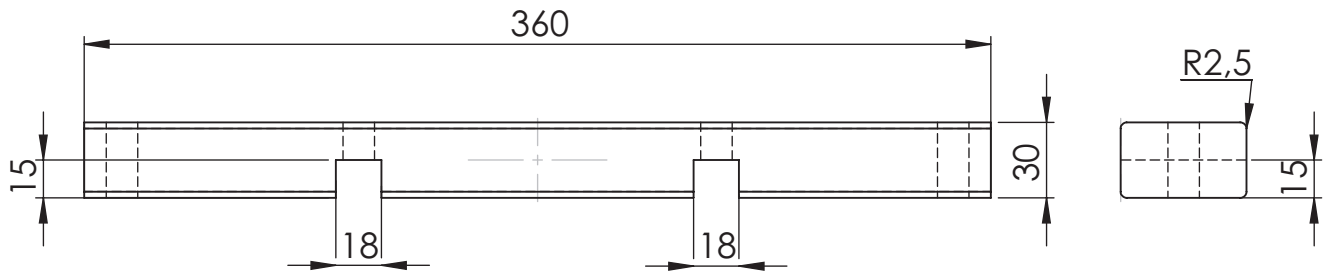
PERFORMANCES


Tableaux des vitesses en km/h au régime maxi.

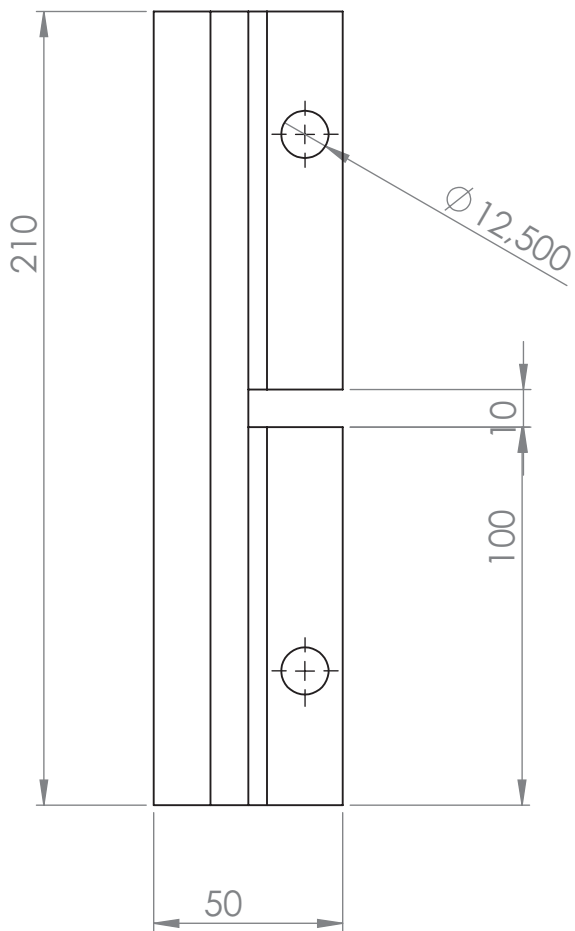
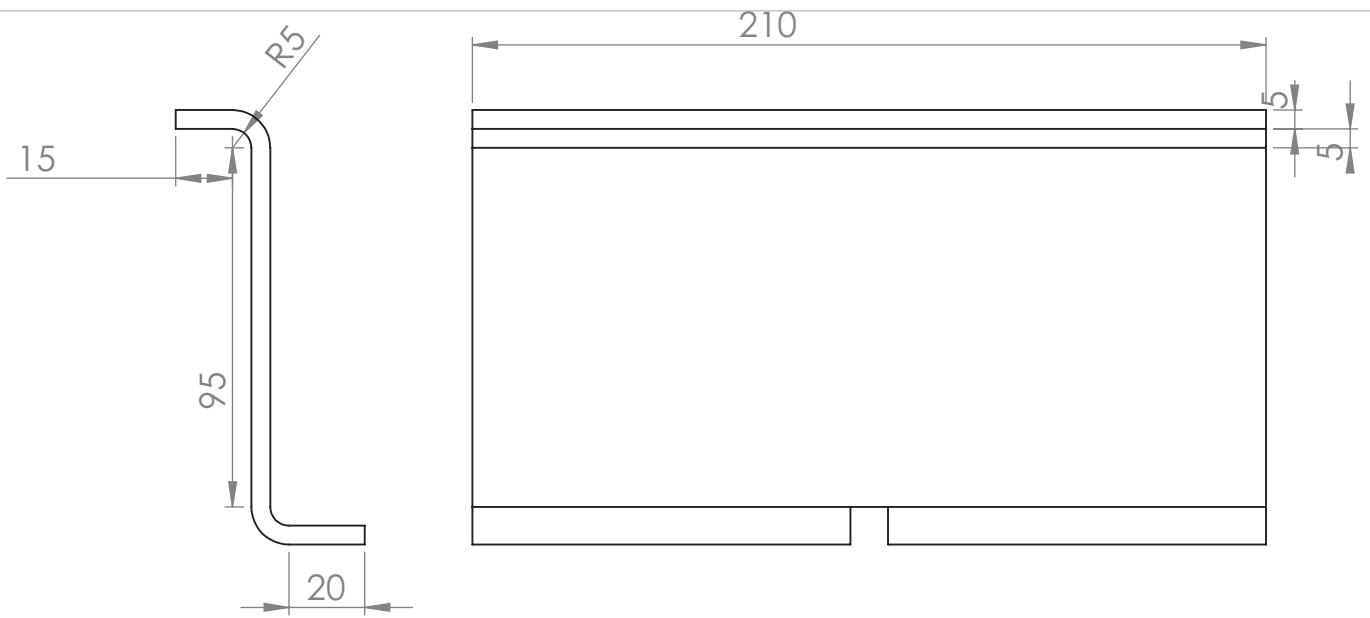
VITESSES	1ère	2ème	3ème	4ème	5ème
RAPPORT B.V	3.43	2.01	1.42	1.00.001. 00	0.83
Avec 12x41	19	32	45	64	82
Avec 10x41	16	27	38	53	65




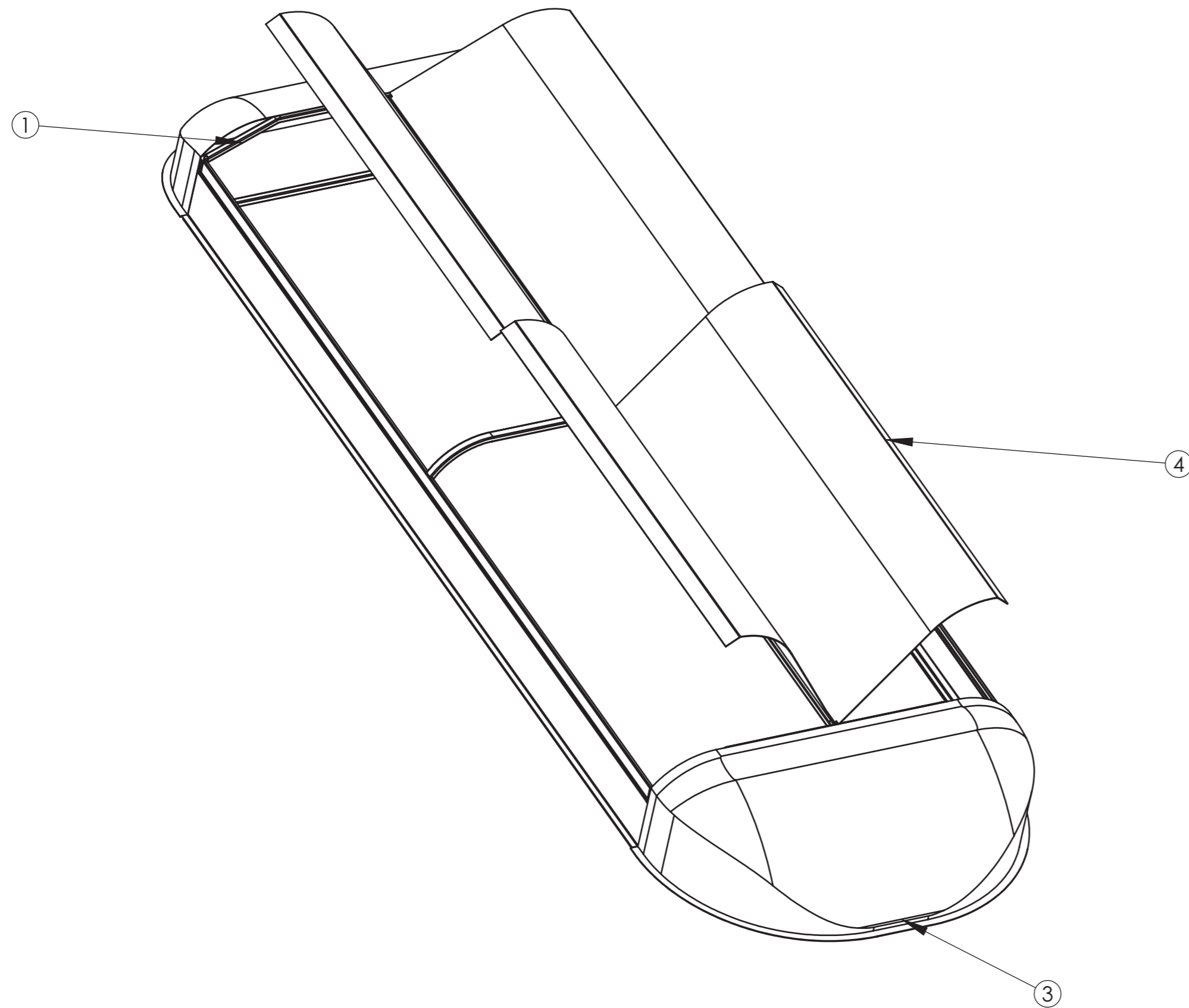
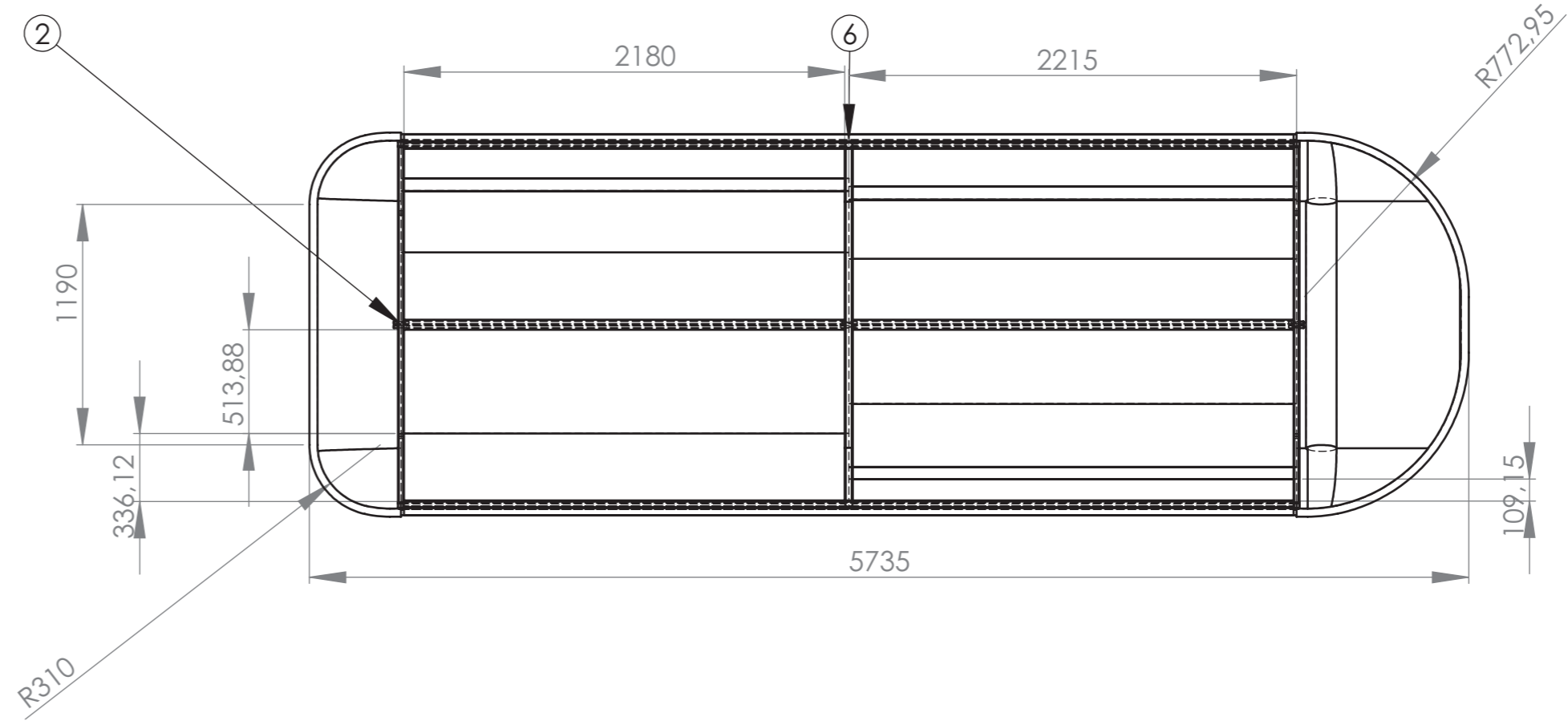
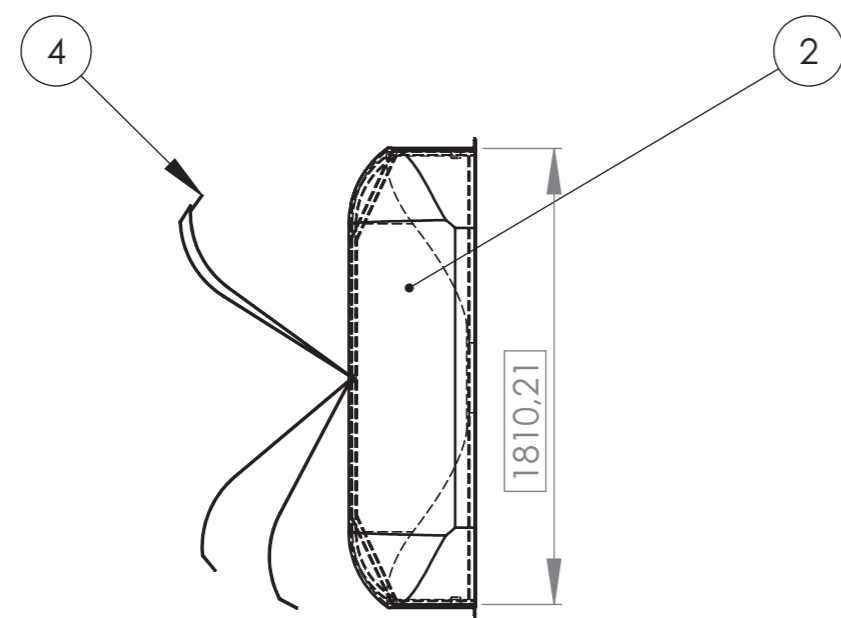
01	10		Acier S235	
Rep	Nbr	Désignation	Matière	observation
Echelle: 1:2		PIECE 11		Réaliser par: DJAMEL IDDOU
				promotion2013
A4		UMMTO-TIZI OUZU		01-11-2013



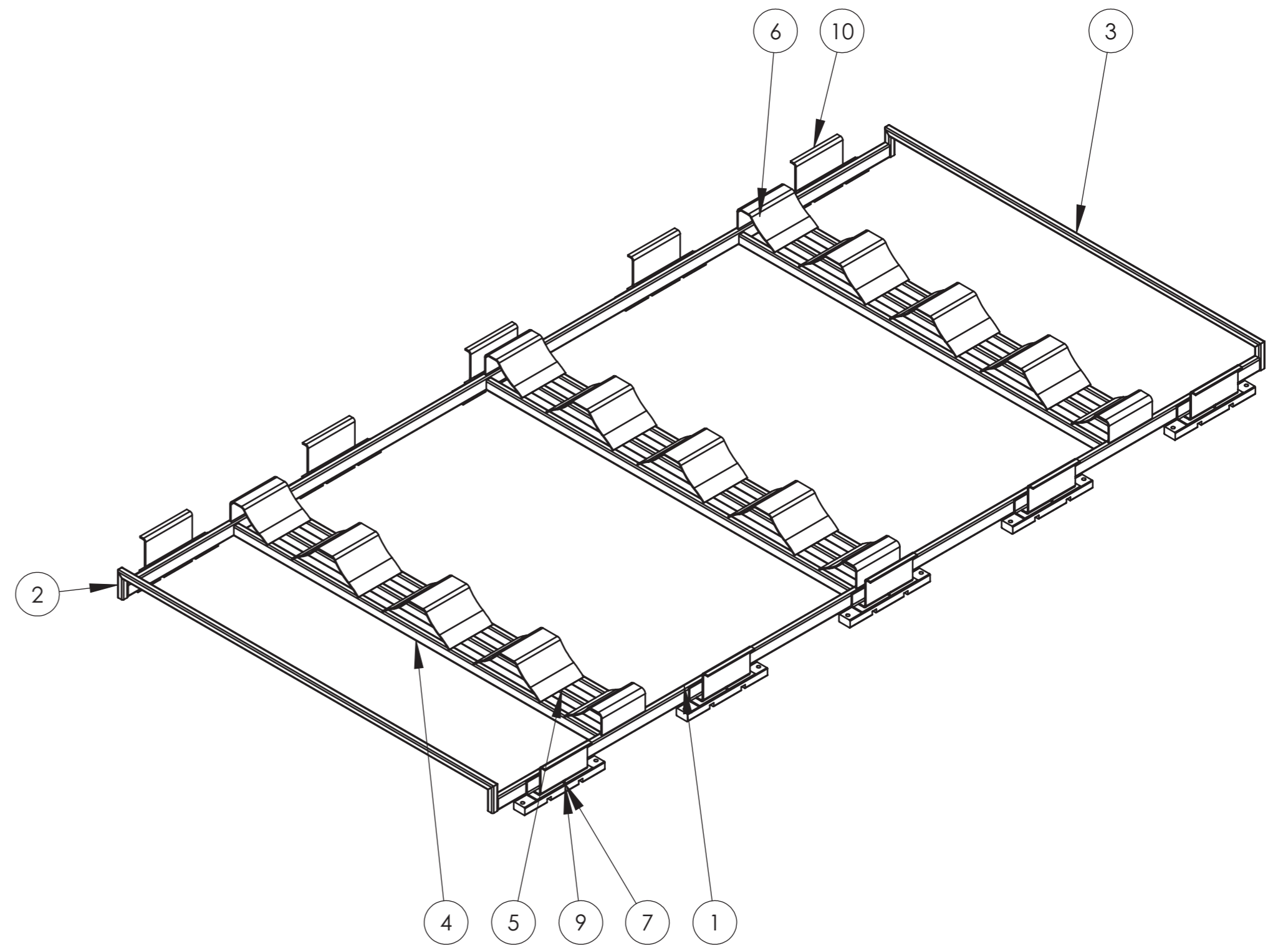
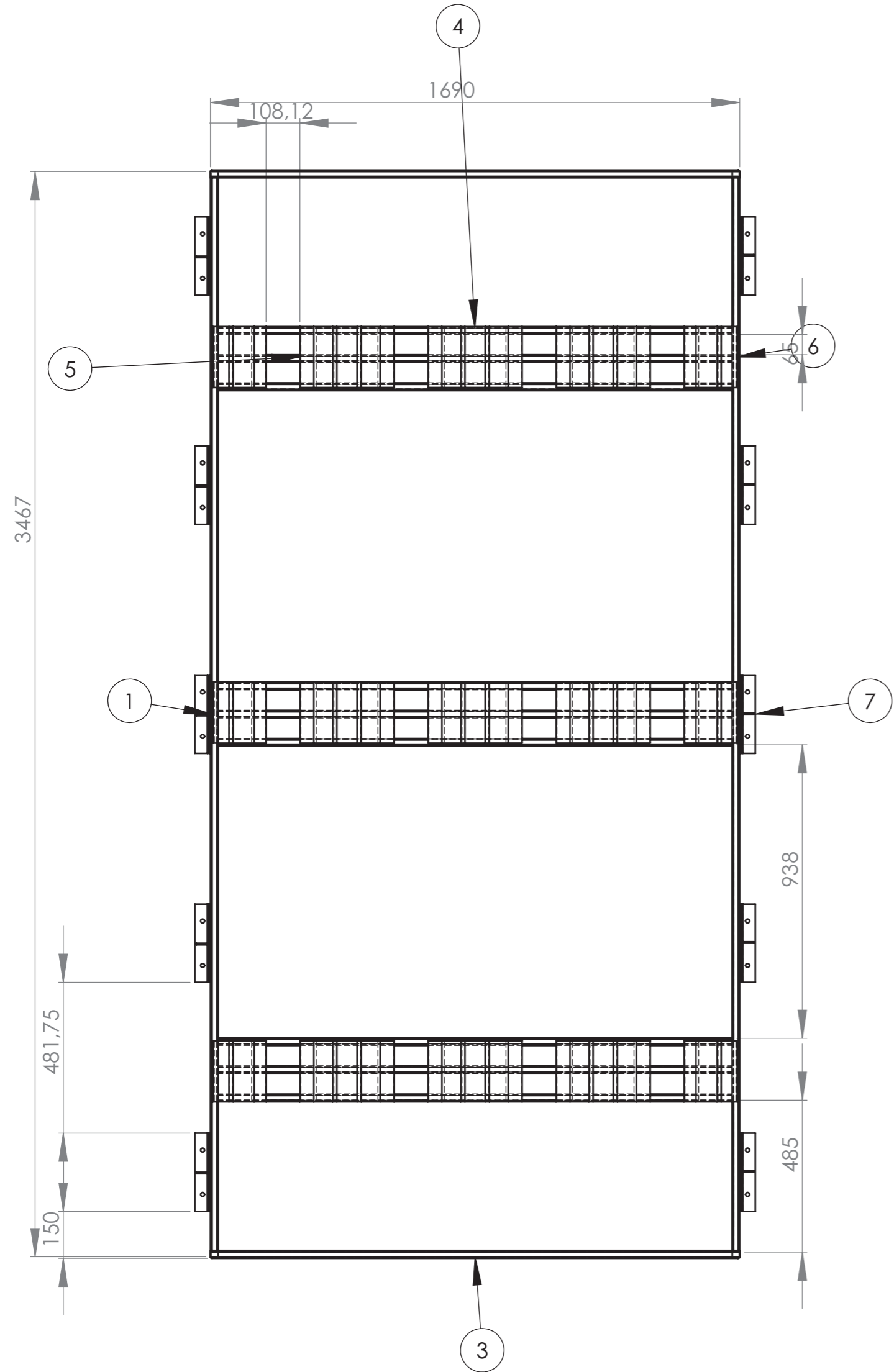
02	10		Acier S235	
Rep	Nbr	Désignation	Matière	observation
Echelle: 1:3		CALE POR LE BERCEAU	Réaliser par: DJAMEL IDDOU	
			Promotion 2013	
A4		UMMTO-TIZI OUZU	01-11-2013	



03	10		Acier S235	
Rep	Nbr	Désignation	Matière	observation
Echelle: 1:1		Piece 113	Réaliser par: TEKLAL.F IDDOU.D	
			promotion 2013	
A4		UMMTO-TIZI OUZU	01-11-2013	



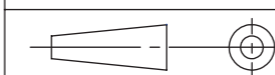
ITEM NO.	PART NUMBER	QTY.
1	LE CACHE DE RESERVOIRE	1
2	Part0002	1
3	Pièce002	1
4	Pièce 00008	4
5	Pièce111	6
6	Pièce 009X02	2
ECHELLE 1:20	CACHE DE RESRVOIR ENVELOPE	
	FGC - GM - UMMTO	2012-2013
A3	D.IDDOU F.TEKELAL	MASTER:02



ITEM NO.	PART NUMBER	QTY.
1	Pièce1 X02	2
2	Pièce4 X04	4
3	Pièce2 X02	2
4	Pièce3 X09	9
5	Pièce5 X09	9
6	Pièce6 X06	6
7	Pièce 11X10	10
8	Pièce112X10	10
9	Pièce9 X06	10
10	Pièce113X10	10

**ECHELLE
1:15**

LE BERCEAU DE RESERVOIRE



FGC - GM - UMMTO

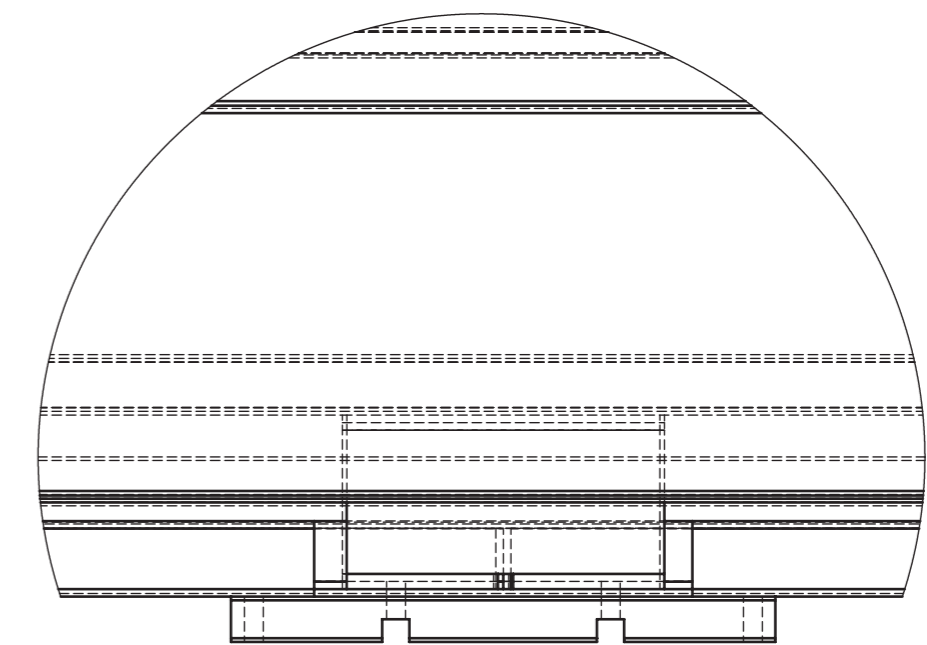
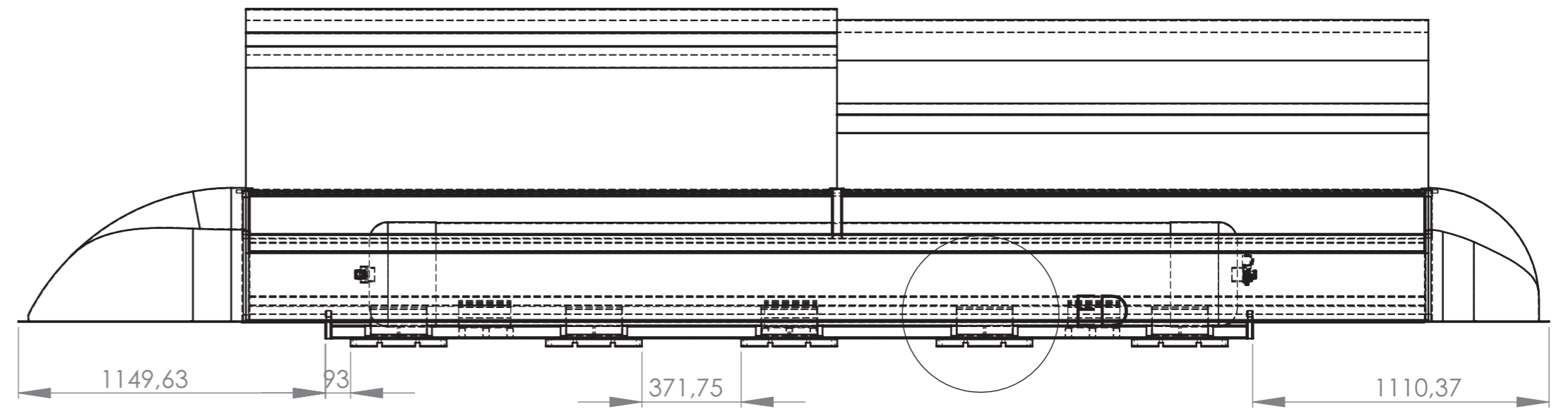
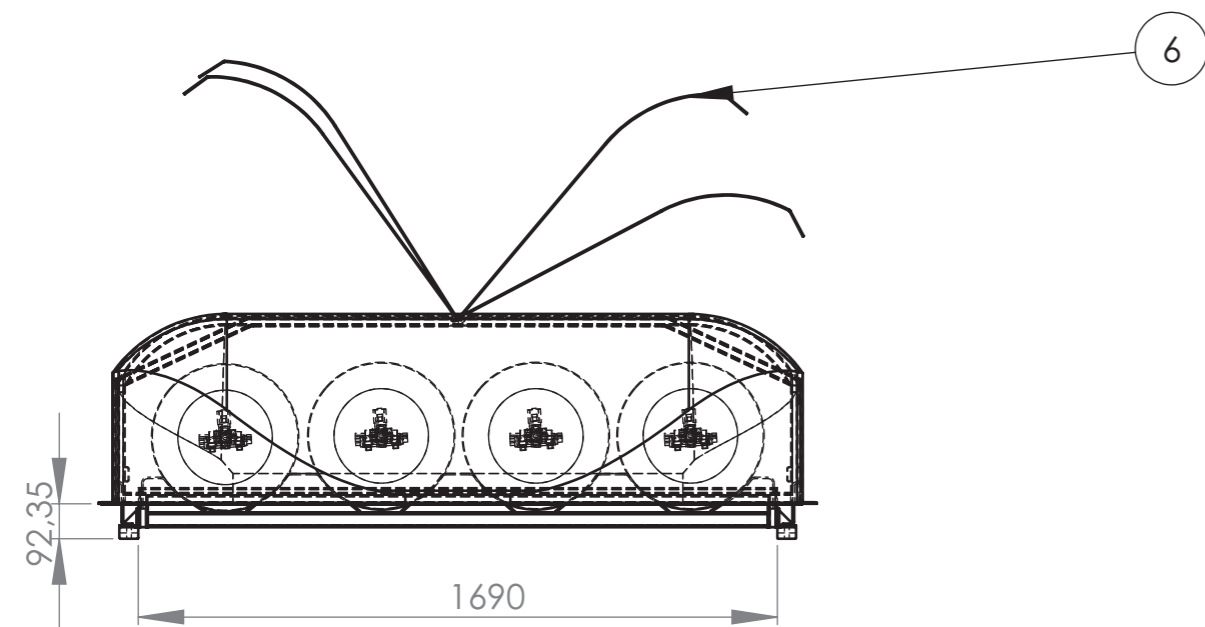
2012-2013

A3

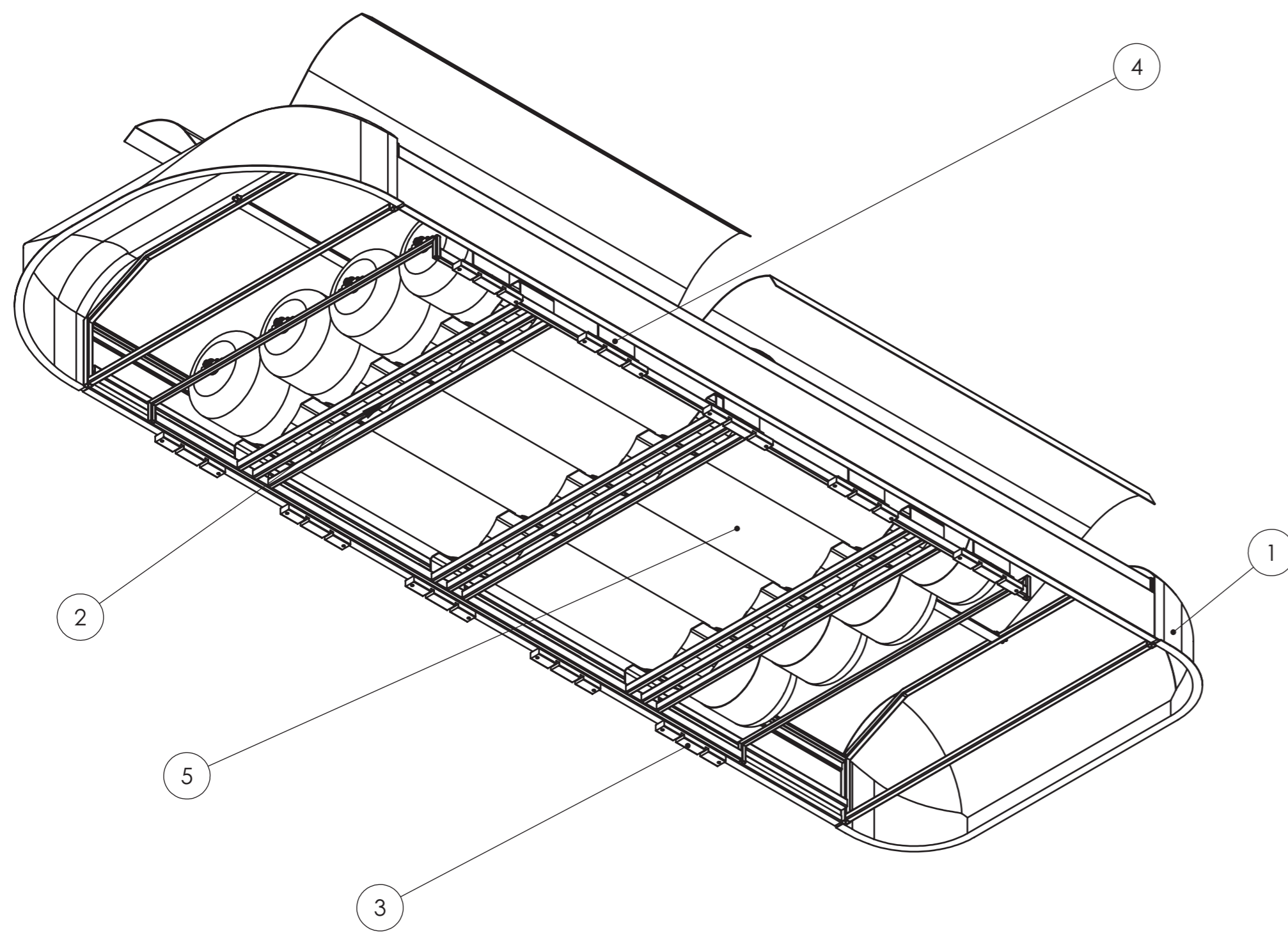
D.IDDOU

F.TEKELAL

MASTER02

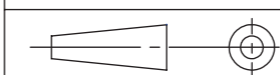


DÉTAIL ED
ECHELLE 1 : 5



N°	Nombre	DESCRIPTION
1	1	cache envelopé
2	1	berceau
3	10	cale
4	10	pièce 113X10
5	4	bouteilles de gaz
6	4	portierre

ECHELLE 1:20 **assemblage berceau, cache et reservoir**



FGC - GM - UMMTO

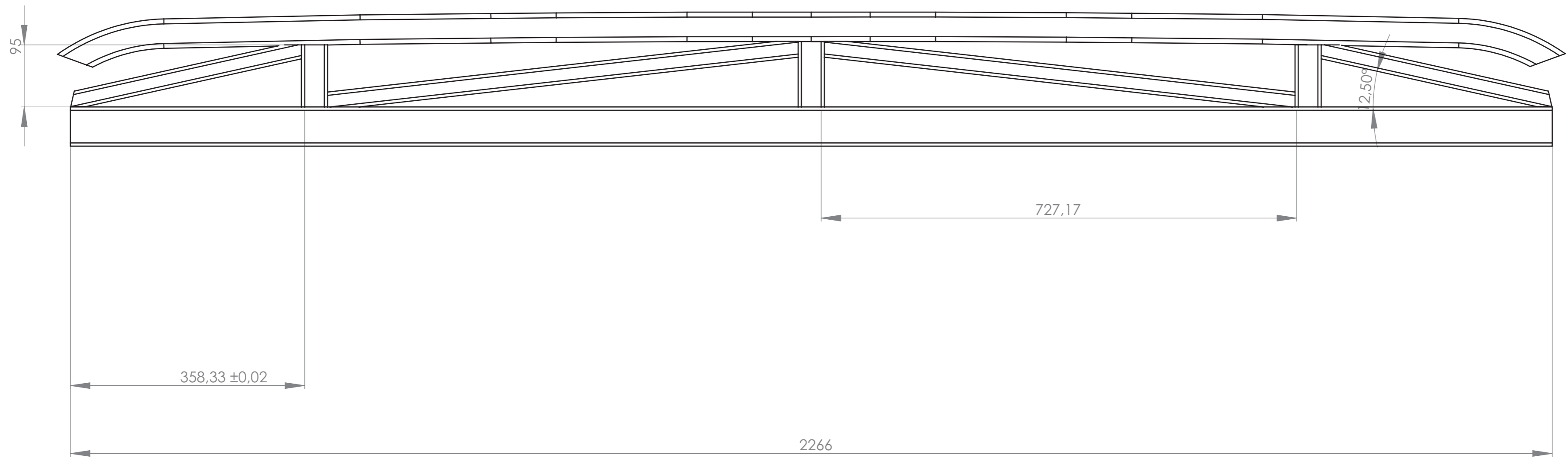
2012-2013

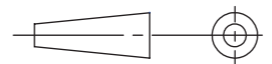
A3

D.IDDOU

F.TEKELAL

MASTER:02



ECHELLE 1:5	ARCEAU MODIFIE		
	FGC - GM - UMMTO	2012-2013	
A3	D.IDDOU	F.TEKELAL	MASTER:02

Références

Bibliographique

Références Bibliographique

- [1] : COLLECTIF SNVI, DOCUMENTS FOURNIS PAR L'UNITE D'ETUDES ET DE RECHERCHE DE LA SOCIETE NATIONALE DES VEHICULES INDUSTRIELS.2009 ;
- [2]: COLLECTIF IVECO, Publication Edited by: IVECO S.p.A.Technical Application Strada delle CASC nette, 424/3410156 Torino (TO) - Italy
www.iveco.com. Edition 2010 ;
- [3] : Gaz naturel canadien, www.gaznaturelcanadien.ca . 2012 ;
- [4] : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, www.ademe.fr;
- [5] : gaz de bordeaux, www.gazdebordeaux.fr ;
- [6] : Les éléments finis : de la théorie à la pratique, par Andre Fortin Professeur titulaire Département de mathématiques et de statistique Université Laval et Andre Garon Professeur titulaire Département de génie mécanique
Ecole Polytechnique de Montréal.1997-2011 ;
- [7] : Mr H.SEDJEL.la méthode des éléments finis ;
- [8] : Mr M.ZIDANE. Étude et conception de l'ossature du véhicule SNVI de type 25L4 pour la résolution des cassures localisées.
Mémoire d'ingénieur .2009/2010 ;
- [9] : Mr H.ZIANI. Cours de charpente métallique (L3) licence ;
- [10] : Mr S.DJEBALI. Cours de construction mécanique(M1).