

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche**  
**Scientifique**



MÉMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de Master à

**L'université 8 Mai 1945 Guelma**

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Construction Mécanique

Présenté par

**BACHTLI SARRA**

---

---

**Conception et Simulation d'un Châssis de**  
**Scooter de fabrication chinoise**

---

---

Encadreur : Pr. FATMI Louendi

2024/2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## *Remerciements*

Je rends grâce à Dieu Tout-Puissant pour Son aide et Ses bénédictions, sans lesquelles ce travail n'aurait pu voir le jour.

J'exprime ma profonde gratitude à mon directeur de mémoire, le professeur **Fatmi Louendi**, pour ses orientations précieuses, son accompagnement scientifique constant, ainsi que le temps et l'expertise qu'il m'a généreusement consacrés tout au long de l'élaboration de ce travail.

Je tiens également à remercier sincèrement le professeur **Nouredine Ouelaa** pour sa contribution significative à l'analyse expérimentale du modèle, qui a grandement enrichi ce travail.

Je tiens également à remercier sincèrement le professeur **Moustapha Lahmar** pour son aide précieuse concernant la partie des éléments finis.

Je tiens également à remercier l'ensemble des enseignants du département de mécanique pour les connaissances et les compétences qu'ils nous ont transmises durant toutes ces années.

## *Dédicace*

Je dédie le fruit de ces années d'études à :

À ma famille merveilleuse, qui m'a toujours aimée et  
soutenue.

À mon père, pour tout ce qu'il a fait pour moi, pour l'amour  
inconditionnel qu'il me porte, la confiance qu'il me témoigne  
et les précieux conseils qu'il me donne.

À ma mère, pour ses sacrifices, ses encouragements  
permanents et ses précieux conseils.

À mes frères et à leurs enfants, ainsi qu'à toute ma famille,  
pour leur affection et leur présence rassurante.

À toutes mes amies et collègues de classe, pour les moments  
partagés et le soutien mutuel.

# Résumé

Notre étude traite essentiellement l'analyse le dessin, la conception et la simulation statique et modale en calcul de structures par éléments finis avec SolidWorks d'un châssis de scooter de fabrication chinoise.

Dans un premier temps nous avons procédé par la technique de l'ingénierie inverse à déterminer les dimensions et les angles des pièces composant le châssis. La deuxième étape consistait à dessiner les différentes pièces et à concevoir le châssis en 3 dimensions. Pour étudier l'influence de la conception sur les résultats de calcul statique du châssis de scooter en conditions d'usage, nous avons réalisé deux conceptions : large et rétréci à l'arrière.

Les résultats de calcul statique ont montré que le châssis rétréci présente une meilleure rigidité et un faible déplacement, ce qui explique l'orientation des constructeurs de scooters à fabriquer leurs produits avec un arrière incliné. Le coefficient de sécurité minimal du scooter incliné dans les conditions de chargement réelles est de 1.6, cette valeur est confirmée également par le calcul du rapport de la contrainte du domaine élastique du matériau sur la contrainte maximale calculée de Von Mises. Ce résultat garantit ainsi une bonne résistance de la structure du châssis.

La troisième étape est consacrée à l'étude modale du châssis, qui avait pour but de déterminer les fréquences et les modes propres du châssis dans le cas de deux configurations de conditions aux limites : libre et appuyé-appuyé. Les résultats obtenus sont ensuite comparés à ceux de la littérature. Pour la configuration libre, les quatre premières fréquences issues de la simulation sont proches de celles obtenues par expérience. Tandis que pour la configuration appuyé-appuyé, les quatre premières fréquences expérience-simulation sont du même ordre, dans ce cas une étude approfondie est nécessaire pour déterminer avec exactitude l'appartenance de ces fréquences.

Pour vérifier l'absence de coïncidence entre les fréquences naturelles du châssis et celle du moteur tournant au ralenti, nous avons calculé la fréquence du moteur. Les résultats obtenus indiquent que les fréquences naturelles du châssis ne coïncident pas avec celle du moteur.

Les fréquences obtenues sont principalement celles des modes de flexion et de torsion, ces derniers étant plus présents.

**Mots clés :** Châssis, Simulation, Scooter, Éléments finis, SolidWorks, Analyse statique, Analyse modale.

# *Abstract*

Our study focuses on the analysis, drawing, design and static and modal FEA simulation of a Chinese-made scooter chassis using SolidWorks.

The first step was to use reverse engineering to determine the dimensions and angles of the chassis components. The second step was to draw the various parts and design the chassis in 3 dimensions. To study the influence of the design on the static calculation results of the scooter chassis under conditions of use, we produced two designs: wide and narrowed at the rear.

Static calculation results showed that the narrower chassis has better rigidity and low displacement, which explains why scooter manufacturers tend to manufacture their products with a sloping rear end. The minimum safety coefficient of the inclined scooter under actual loading conditions is 1.6, a value also confirmed by the calculation of the ratio of the material's elastic domain stress to the calculated maximum Von Mises stress. This result guarantees the strength of the chassis structure.

The third stage is devoted to the modal study of the chassis, the aim of which was to determine the frequencies and eigenmodes of the chassis in the case of two configurations of boundary conditions: free and supported-supported. The results obtained are then compared with those reported in the literature. For the free configuration, the first four frequencies derived from the simulation are close to those obtained by experiment. For the supported-supported configuration, on the other hand, the first four experiment-simulation frequencies are of the same order. In this case, an in-depth study is required to determine exactly where these frequencies belong.

To check that there is no coincidence between the natural frequencies of the chassis and the idling engine, we calculated the engine frequency. The results indicate that the natural frequencies of the chassis do not coincide with those of the engine.

The frequencies obtained are mainly those of the bending and torsion modes, the latter being more present.

**Key words:** Chassis, Simulation, Scooter, Finite elements, SolidWorks, Static analysis, Modal analysis.

## المخلص

تركز دراستنا على تحليل ورسم وتصميم ومحاكاة ثابتة ونموذجية لهيكل سكوتر صيني الصنع باستخدام تحليل العناصر المحدودة باستخدام SolidWorks .

في البداية، استخدمنا تقنية الهندسة العكسية لتحديد أبعاد وزوايا الأجزاء المكونة للهيكل. وكانت الخطوة الثانية هي رسم الأجزاء المختلفة وتصميم الهيكل في 3 أبعاد. ولدراسة تأثير التصميم على نتائج الحسابات الساكنة لهيكل السكوتر في ظروف الاستخدام، أنتجنا تصميمين: عريض وضيق من الخلف .

أظهرت نتائج الحساب الستاتيكي أن الهيكل الأضيق يتمتع بصلابة أفضل وإزاحة أقل، وهو ما يفسر ميل مصنعي السكوتر إلى تصنيع منتجاتهم ذات الواجهة الخلفية المائلة. إن الحد الأدنى لمعامل الأمان للسكوتر المائل في ظروف التحميل الحقيقية هو 1.6، وهي قيمة أكدها أيضاً حساب نسبة الإجهاد في المجال المرن للمادة إلى أقصى إجهاد محسوب بواسطة فون ميسيس. تضمن هذه النتيجة قوة هيكل الشاسيه.

خُصت المرحلة الثالثة للدراسة النمطية للهيكل، وكان الهدف منها تحديد الترددات والأنماط الأصلية للهيكل في حالة وجود وضعين من الظروف الحدية: حرة ومدعومة مدعومة. ثم تمت مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها مع تلك الموجودة في الأدبيات. بالنسبة للتكوين الحر، فإن الترددات الأربعة الأولى التي تم الحصول عليها من المحاكاة قريبة من تلك التي تم الحصول عليها بالتجربة. ومع ذلك، بالنسبة للتكوين المدعوم المدعوم، فإن الترددات الأربعة الأولى من التجربة والمحاكاة هي من نفس الترتيب. في هذه الحالة، يلزم إجراء دراسة معمقة لتحديد مكان هذه الترددات بالضبط .

وللتحقق من عدم وجود تطابق بين الترددات الطبيعية للهيكل وترددات المحرك الذي يعمل في وضع الخمول، قمنا بحساب تردد المحرك. تشير النتائج التي تم الحصول عليها إلى أن الترددات الطبيعية للهيكل لا تتطابق مع تردد المحرك .

الترددات التي تم الحصول عليها هي أساساً ترددات أوضاع الانحناء والالتواء، حيث إن الأخيرة أكثر حضوراً.

**الكلمات المفتاحية:** هيكل، محاكاة، سكوتر، عناصر محدودة، صوليدوروكس، تحليل ثابت، تحليل نمطي.

# Table des matières

Remerciements .....	i
Dédicace .....	ii
Résumé .....	iii
Abstract .....	iv
المخلص .....	v
Table des matières .....	vi
Liste des figures .....	x
Liste des tableaux .....	xii
Introduction générale.....	1

## Chapitre I. Etude bibliographique

1. Introduction.....	4
2. Châssis d'une moto .....	4
3. Différents types de châssis .....	4
3.1 Châssis simple berceau.....	4
3.2 Châssis double berceau .....	5
3.3 Châssis poutre .....	5
3.4 Châssis ouvert .....	6
3.5 Châssis treillis .....	6
4. Méthode de réalisation des châssis .....	7
4.1 Méthodes directes.....	7
4.2 Méthode indirecte.....	8
4.2.1 Objectifs de l'ingénierie inverse .....	8
4.2.2 Avantage l'ingénierie inverse .....	8
4.2.3 Étapes du processus.....	8
5. Conclusion .....	9
6. Applications .....	9

7.	Eléments composants le châssis.....	9
7.1	Tubes ronds .....	9
7.2	Tubes carrés.....	10
7.3	Tubes rectangulaires.....	10
8.	Matériaux utilisés.....	11
8.1	Aciers .....	11
8.1.1	Aciers non alliés .....	11
8.1.2	Aciers fortement alliés .....	11
8.2	Aluminium .....	11
8.3	Matériaux composites .....	11
9.	Cintrage et calcul de longueur développée .....	12
9.1	Définition du cintrage.....	12
9.2	Les types de cintrages .....	12
9.3	Longueur du cintrage développée .....	12
10.	Soudage .....	15
10.1	Définition .....	15
10.2	Différents procédés de soudage.....	15
10.2.1	Soudage à la flamme (oxyacétylénique) .....	15
10.2.2	Soudage MIG et MAG .....	15
10.2.3	Soudage TIG (Tungsten Inert Gas) .....	16
10.2.4	Soudage au chalumeau .....	17

## **Chapitre II. Conception des châssis de scooter**

.1	Synthèse des travaux réalisés.....	19
2.	Méthodes de Modélisation d'un Châssis de Scooter .....	20
2.1	Numérisation en plans 2D .....	20
2.2	Relevé manuel des dimensions .....	20
2.3	Photogrammétrie .....	20
2.4	Scan 3D .....	20
2.5	Rétro-ingénierie CAO .....	20
3.	Génération du model CAO .....	21
3.1	Conception 3D.....	22
3.2	Dessin de définition des pièces principales.....	22

3.3	Assemblage de différentes pièces.....	26
4.	Simulation numérique du châssis avec SolidWorks .....	26
4.1	Méthode des éléments finis .....	26
4.2	Etapes de calcul par éléments finis .....	26
4.3	Théorie de l'analyse des vibrations.....	27
5.	Types d'éléments de maillage .....	27
5.1	Eléments solides 3D .....	28
5.2	Eléments coques (Shell) 2D .....	28
5.3	Eléments membranes 2D.....	28
5.4	Eléments plaques 2D.....	28
6.	Procédures de mesures des fréquences propres .....	29
6.1	Introduction .....	29
6.2	Mesures des fréquences propres.....	29
6.3	Résultats de l'analyse modale expérimentale du châssis libre.....	31
6.4	Résultats de l'analyse modale expérimentale du châssis Appuyé-Appuyé.....	31
6.5	Tableau récapitulatif des résultats .....	32

## **Chapitre III. Simulation modale et statique du châssis**

1.	Introduction.....	34
2.	Etude statique.....	34
2.1	Châssis large.....	34
2.1.1	Conception et conditions aux limites .....	34
2.1.2	Structure avant et après déformation.....	35
2.1.3	Contraintes de von mises.....	36
2.1.4	Déplacement global.....	36
2.1.5	Déformation globale.....	37
2.1.6	Coefficient de sécurité.....	37
2.2	Châssis incliné.....	38
2.2.1	Structure avant et après déformation.....	38
2.2.2	Contraintes von mises .....	38
2.2.3	Déplacement global.....	39
2.2.4	Déformation globale.....	40
2.2.5	Coefficient de sécurité.....	40

---

2.3	Etude comparative des résultats de la simulation.....	41
2.4	Conclusion.....	41
2.5	Analyse des résultats .....	42
2.5.1	Interprétation des résultats .....	42
2.5.2	Avantage du châssis incliné.....	42
3.	Etude modale .....	43
3.1	Objectif de l'analyse modale.....	43
3.2	Maillage de la structure .....	43
3.3	Cas du châssis libre .....	43
3.3.1	Fréquences et modes obtenus .....	44
3.4	Cas du châssis appuyé_appuyé .....	46
3.4.1	Fréquences et modes obtenus .....	46
3.5	Etude comparative des résultats simulation_expérimentale.....	49
3.6	Analyse et interprétation des résultats.....	49
	Conclusion générale.....	50
	Références bibliographiques .....	53

# Liste des figures

## Chapitre I. Etude bibliographique

Figure 1. Châssis simple berceau [1].....	4
Figure 2. Châssis double berceau [2] .....	5
Figure 3. Châssis poutre [1] .....	5
Figure 4. Châssis ouvert [1] .....	6
Figure 5. Croquis d'un cadre treillis BMW [1] .....	6
Figure 6. Méthode de réalisation des châssis .....	7
Figure 7. Dessin d'un tube rond .....	9
Figure 8. Dessin d'un tube carré .....	10
Figure 9. Dessin d'un tube rectangulaire.....	10
Figure 10. Tube centré.....	12
Figure 11. Préparation de tube à cintré.....	13
Figure 12. Soudage à la flamme [9] .....	15
Figure 13. Soudage MAG fil plein [9] .....	16
Figure 14. Soudage TIG [9] .....	16
Figure 15. Soudage au chalumeau.....	17

## Chapitre II. Conception des châssis de scooter

Figure 1. Photographie du châssis.....	21
Figure 2. Conception 3D du châssis étudié .....	22
Figure 3. Dessin de définition des pièces principales du scooter.....	25
Figure 4. Châssis de scooter .....	26
Figure 5. Bancs d'essais .....	30
Figure 6. Résultats du châssis libre [21] .....	31
Figure 7. Résultats du châssis appui-appui [21].....	32

## Chapitre III. Simulation modale et statique du châssis

Figure 1. Chargement et conditions limites du châssis .....	35
Figure 2. Châssis large et sa déformée .....	35
Figure 3. Contraintes de von mises en MPa.....	36
Figure 4. Déplacement (mm) .....	36
Figure 5. Déformation .....	37
Figure 6. Coefficient de sécurité .....	37
Figure 7. Châssis incliné et sa déformée .....	38
Figure 8. Contraintes von mises en MPa.....	39

Figure 9. Déplacement global .....	39
Figure 10. Déformation globale .....	40
Figure 11. Coefficient de sécurité .....	41
Figure 12. Châssis conçu et maillé .....	43
Figure 13. Fréquences et déformations modales .....	45
Figure 14. Châssis appuyé_appuyé .....	46
Figure 15. Fréquences et déformations modales .....	48

# Liste des tableaux

## **Chapitre I. Etude bibliographique**

Tableau 1. Cintrage selon les deux machines à cintré MINGORI et VIRAX [8] ..... 13

## **Chapitre II. Conception des châssis de scooter**

Tableau 1. Types d'éléments utilisés en calcul de structure par éléments finis ..... 28

Tableau 2. Tableau récapitulatif des résultats [21] ..... 32

## **Chapitre III. Simulation statique et modale du châssis**

Tableau 1. Résultats de l'analyse statique pour deux modèles de châssis ..... 41

Tableau 2. Comparative des résultats simulation\_expérimentale ..... 49

# Introduction générale

---

Ces dernières décennies, le nombre de deux-roues, et plus particulièrement les scooters, ont connu une croissance notable, grâce à leur agilité, leur faible consommation énergétique et leur adaptabilité en milieu urbain. Au cœur de ces véhicules, le châssis joue un rôle fondamental, véritable colonne vertébrale du scooter, il garantit sa robustesse, sa sécurité et son confort de conduite. Sa conception doit répondre à des exigences strictes en matière de légèreté, de rigidité et de résistance aux sollicitations mécaniques.

Face à ces exigences, les ingénieurs s'appuient sur des méthodes avancées de conception et d'analyse, telles que la modélisation 3D assistée par ordinateur et le calcul par éléments finis, afin d'évaluer et d'optimiser les performances structurelles du châssis avant sa mise en production.

Dans cette perspective, notre travail porte essentiellement sur l'étude, le dessin, la conception et l'évaluation des performances structurelles statiques et modales d'un châssis de scooter de fabrication chinoise, en calcul de structures par éléments finis sous SolidWorks 2016. Les résultats de la simulation modale sont ensuite comparés à ceux obtenus dans des travaux antérieurs.

Pour évaluer l'influence de la conception sur le comportement mécanique, deux variantes de châssis large et incliné sont étudiées en termes de contraintes, de déformations, de déplacements et de coefficient de sécurité.

Pour compléter cette dernière partie une étude modale est réalisée pour déterminer les fréquences et les modes propres de la structure avec deux conditions aux limites libre et appuyé-appuyé.

Le mémoire est structuré en trois chapitres. Le premier est d'ordre bibliographique et aborde les différents types de châssis, les méthodes de réalisation, les éléments qui les composent, les matériaux utilisés et les procédés de soudage.

Le deuxième chapitre est une synthèse des travaux réalisés dans le domaine de la conception des châssis de scooters, ainsi que des méthodes de modélisation et de génération du modèle de CAO. Il présente également le dessin et la conception du châssis étudié. Nous présentons aussi un aperçu de la formulation de base de la méthode des éléments finis traitant les aspects statique et modale. Cette partie est conclue par une présentation de la procédure expérimentale de détermination des fréquences propres du châssis pour deux configurations de conditions aux limites libres et appuyé\_appuyé.

Le troisième chapitre traite de l'influence de la conception sur le comportement mécanique de la structure du châssis pour les deux configurations « large » et « rétrécie à l'arrière ». Un calcul de simulation du comportement mécanique est présenté et analysé. Ce chapitre est couronné par une étude modale du châssis pour les deux conditions aux limites considérées. Les fréquences de simulation sont ensuite comparées aux fréquences expérimentales obtenues dans des travaux antérieurs. La fréquence calculée du moteur au ralenti et comparée à celles du châssis.

# Chapitre I

## Etude bibliographique

## 1. Introduction

Le châssis est la structure interne qui soutient un véhicule, jouant un rôle similaire à celui du squelette dans un organisme vivant. Dans le cas des motos, il assure la liaison entre le moteur, la transmission, la suspension et les roues. Il doit être rigide tout en étant léger pour optimiser les performances.

L'optimisation du châssis passe par la réduction du poids et l'atténuation des vibrations. Pour cela, cette étude utilise l'analyse par éléments finis et l'analyse expérimentale pour valider un modèle de châssis plus performant.

## 2. Châssis d'une moto

Élément central de la partie cycle, le cadre d'une moto est généralement conçu en acier ou en alliage de chrome-molybdène. Sur les motos sportives, il est souvent fabriqué en aluminium pour gagner en légèreté, tandis que les modèles de compétition peuvent adopter des matériaux encore plus performants comme la fibre de carbone. Sa structure peut varier selon le type de moto et les performances recherchées.

Le cadre doit être suffisamment résistant pour supporter les déformations sans casser. Mais il doit aussi autoriser le mouvement des éléments suspendus : les trains avant et arrière.

Une moto doit conserver, en toutes circonstances, l'alignement de ses roues dans le même plan longitudinal. C'est la rigidité du cadre qui garantit cet alignement.

## 3. Différents types de châssis

### 3.1 Châssis simple berceau

Le cadre simple berceau figure 1 se compose d'un seul tube reliant la colonne de direction au support du bras oscillant, en passant sous le moteur. On parle de cadre interrompu lorsque ce tube est fixé directement sur le moteur, et de cadre dédoublé lorsqu'il se divise en deux sous le moteur, ce type de cadre équipe généralement les petites et moyennes cylindrées.



Figure 1. Châssis simple berceau [1]

### 3.2 Châssis double berceau

Le cadre double berceau est composé de deux tubes qui relient la colonne de direction au support du bras oscillant, entourant le moteur de part et d'autre figure 2. On trouve ce type de cadre sur certains petits roadsters, customs, routières.



Figure 2. Châssis double berceau [2]

### 3.3 Châssis poutre

Le cadre poutre est formé d'un tube, rond ou rectangulaire, de grande section, qui relie la colonne de direction au bras oscillant en passant au-dessus du moteur figure 3. Ce type de cadre est utilisé sur certains roadsters, trials.

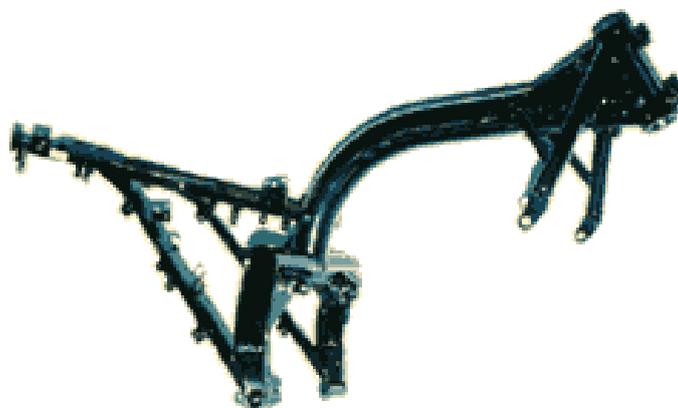


Figure 3. Châssis poutre [1]

### 3.4 Châssis ouvert

Le cadre ouvert se caractérise par l'absence de tube supérieur. Principalement utilisé sur les scooters, il permet un accès facile à l'engin sans nécessiter de l'enjamber. Il est généralement réalisé en tôle emboutie pour les faibles cylindrées, et en treillis tubulaire pour les cylindrées plus importantes figure 4. Ce type de cadre équipe généralement les scooters de petites et moyennes cylindrées.

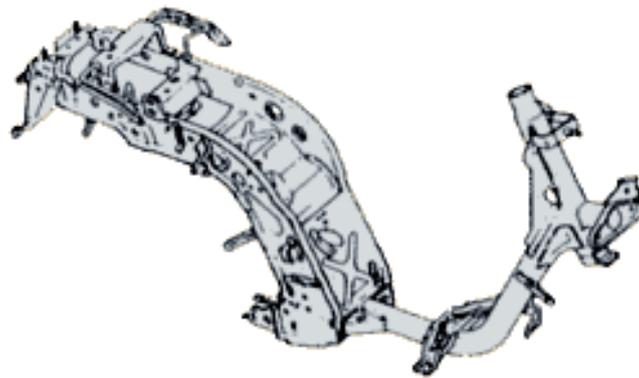


Figure 4. Châssis ouvert [1]

### 3.5 Châssis treillis

Le cadre en treillis tubulaire est constitué de multiples tubes assemblés par soudure, formant une structure triangulée. Grâce à la stabilité géométrique du triangle, qui est une forme quasi indéformable, ce type de cadre offre une rigidité structurelle élevée figure 5. Ce type de cadre est réservé essentiellement sur les Décatis de la production actuelle, mais également MV Agusta, BMW.



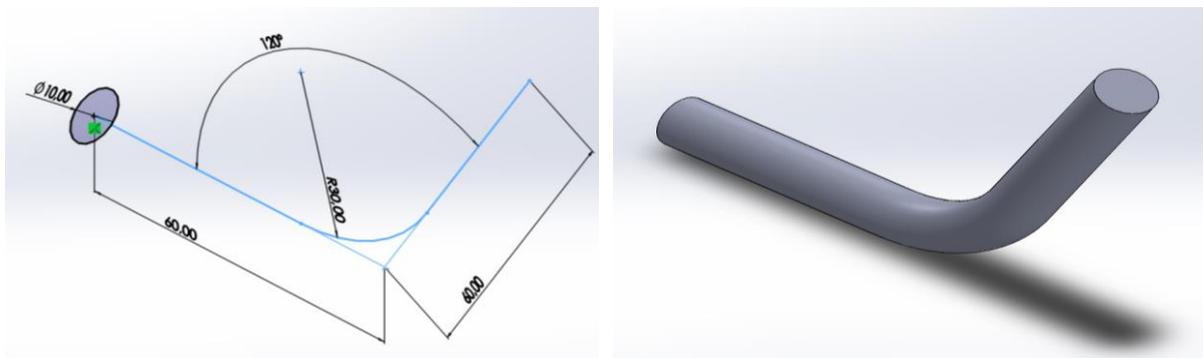
Figure 5. Croquis d'un cadre treillis BMW [1]

#### 4. Méthode de réalisation des châssis

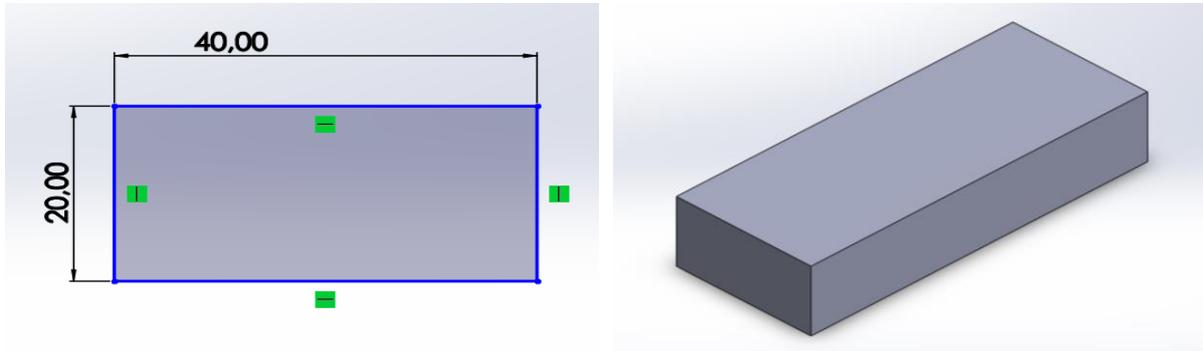
Pour Réalisé un châssis soit on fait notre conception soit on récupère un cadre existant et on lui applique la méthode de l'ingénierie inverse.

##### 4.1 Méthodes directes

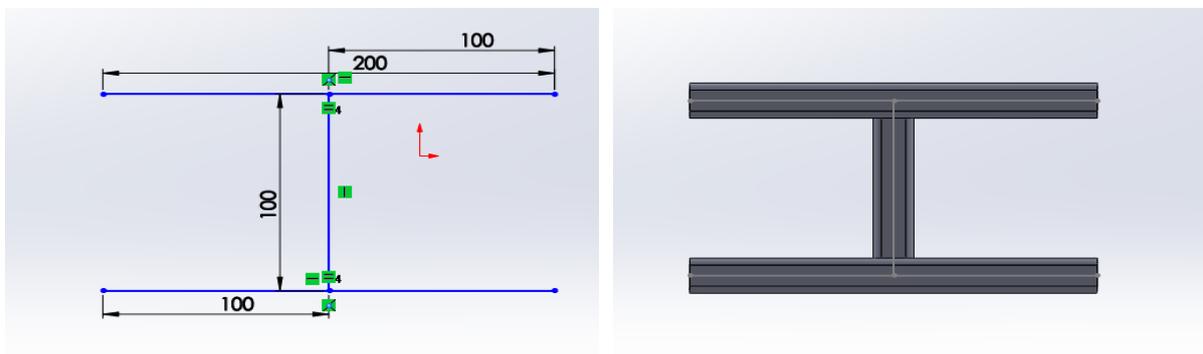
A l'aide d'un logiciel de dessin on procède à la conception du châssis en dessinant son esquisse puis on procède aux choix du type de section, puis à la réalisation des composant par : balayage (a), extrusion d'une section (b) ou à l'aide d'éléments mécano-soudé (c), comme le montre la figure 6.



a) Balayage



b) Bossage extrusion



c) Mécanos soudés

Figure 6. Méthode de réalisation des châssis

---

## 4.2 Méthode indirecte

L'ingénierie inverse (ou rétro-ingénierie) est un processus technologique qui consiste à partir d'un objet physique en crée une version numérique en 3D grâce à un scanner et logiciels spécialisés. Contrairement à la conception assistée par ordinateur (CAO) classique – où l'on conçoit d'abord le modèle virtuel avant de le produire – la rétro-ingénierie fait le chemin inverse : elle commence par l'objet existant pour reconstituer le modèle numérique et la documentation technique.

Cette méthode permet de numériser un objet réel [3], d'analyser les caractéristiques fonctionnelles et dimensionnelles, d'optimiser le model et de le reproduire ou de le faire évoluer.

### 4.2.1 Objectifs de l'ingénierie inverse

Initialement associée à l'espionnage industriel durant la guerre froide, la rétro-ingénierie est aujourd'hui largement utilisée dans l'industrie pour :

- Reproduire des objets sans documentation technique (pièces de voitures anciennes) ;
- Moderniser ou améliorer des produits existants ;
- Contrôler la qualité de production ;
- Créer de nouveaux produits inspirés de produits existants ;
- Réduire les coûts et les délais de conception.

### 4.2.2 Avantage l'ingénierie inverse

Nous citons quelques avantages :

- Précision des formes via la numérisation 3D ;
- Réduction des erreurs et des retouches coûteuses ;
- Rapidité de conception de variantes d'un même produit ;
- Possibilités d'innovation à partir de données réelles.

### 4.2.3 Étapes du processus

- Acquisition consiste à numériser l'objet physique en 3D ;
- Traitement c'est la conception avec des logiciels de CAO ;
- Vérification traite la comparaison avec l'objet initial, l'ajustement ou l'optimisation ;
- Transfert vers un logiciel de FAO pour fabrication.

## 5. Conclusion

L'ingénierie inverse est une solution puissante et polyvalente pour répondre à des défis industriels modernes. Elle permet de passer rapidement d'un objet réel à une solution numérique, puis à une production optimisée, en combinant efficacité, personnalisation et innovation.

## 6. Applications

Ces méthodes sont appliquées dans divers secteurs [3] :

- Automobile : pour concevoir des emballages sur mesure à partir de pièces physiques, notamment en PSE ou polypropylène expansé ;
- Cycles et motocycle : Nous créons des emballages sur mesure pour les pièces de cycles et motocycles aux formes complexes (carénages, cadres spécifiques, réservoirs), afin de garantir leur protection et leur sécurité lors du transport et du stockage ;
- Imprimerie : pour créer des emballages protecteurs adaptés à des cartouches sans fichiers CAO disponibles ;
- Emballage industriel : pour développer des contenants spécifiques aux formes complexes.

## 7. Eléments composants le châssis

On utilise les tubes (ronds, carrés et rectangulaires creux et pleins)

### 7.1 Tubes ronds

Les tubes ronds en acier soudé de la figure 7 sont des profilés creux obtenus à partir de larges bandes d'acier refendues. Celles-ci sont d'abord cintrées en forme de tube rond à l'aide de galets, puis soudées longitudinalement par induction. Ce procédé laisse un cordon de soudure visible à l'intérieur, tandis que l'excédent de métal est éliminé pour obtenir une surface lisse.

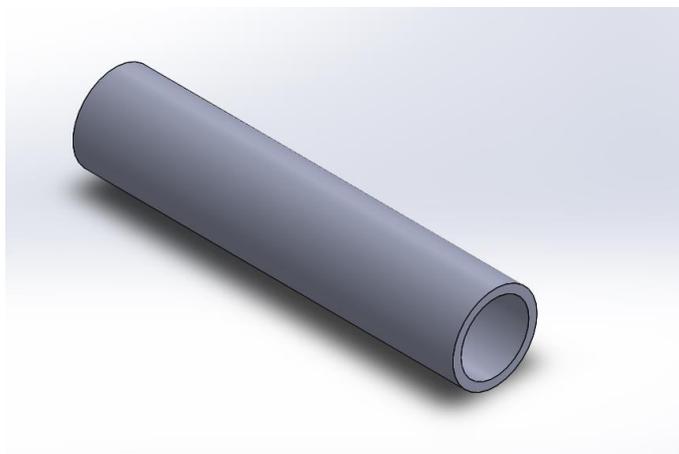
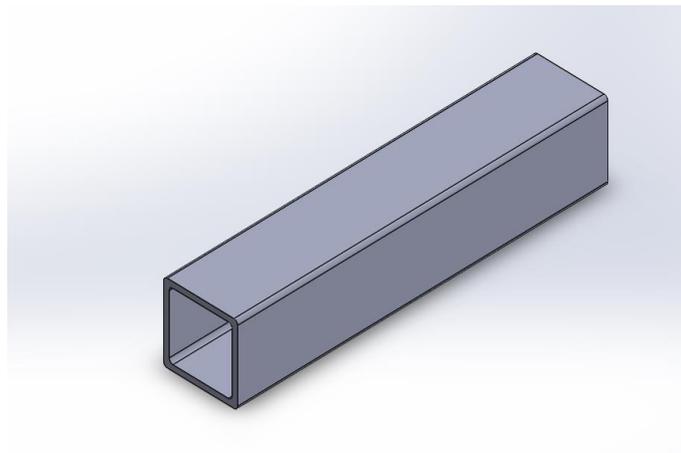


Figure 7. Dessin d'un tube rond

### 7.2 Tubes carrés

Les tubes carrés en acier brut figure 8, également appelés tubes de construction, sont fabriqués selon les normes NF EN 10210 (fini à chaud) ou NF EN 10219 (fini à froid).

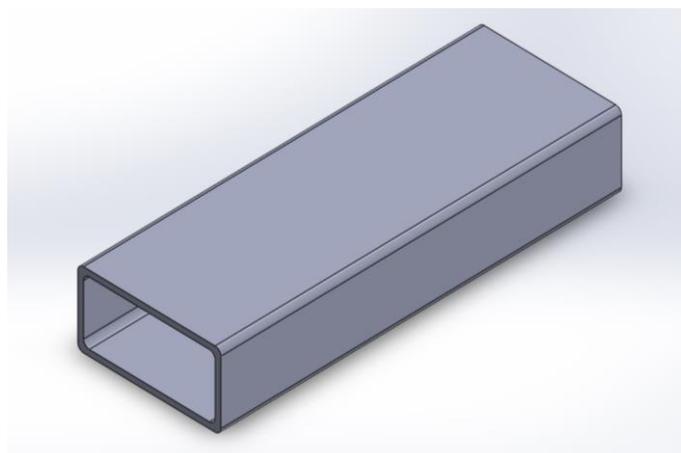
Ils sont produits à partir de larges bandes d'acier refendues, d'abord cintrées en forme ronde à l'aide de galets, puis transformées en section carrée. Les bords sont ensuite soudés longitudinalement par induction, créant un cordon de soudure visible à l'intérieur. L'excédent de métal est retiré à l'extérieur pour obtenir une surface plane [4].



**Figure 8. Dessin d'un tube carré**

### 7.3 Tubes rectangulaires

Le tube de fer rectangulaire figure 9 est un profilé creux en forme de rectangle, idéal pour de multiples applications [5].



**Figure 9. Dessin d'un tube rectangulaire**

## 8. Matériaux utilisés

Les matériaux généralement utilisés pour la construction des châssis et des cadres de véhicules sont les aciers au carbone, mais des alliages d'aluminium sont parfois employés pour alléger les structures.

### 8.1 Aciers

L'acier est largement utilisé pour la fabrication des châssis de scooter, en raison de ses bonnes propriétés d'usinabilité, de solidité et de faible coût. Ces aciers nécessitent une protection contre la corrosion, car ils ne sont pas naturellement inoxydables.

#### 8.1.1 Aciers non alliés

Ils sont destinés à la construction soudée, à l'usinage et au pliage. Le type E est utilisé dans la construction mécanique. La désignation de ces aciers comprend la lettre indiquant le type d'acier, suivie de la valeur de la limite élastique ( $R_e$ ) exprimée en (MPa). Pour l'acier moulé, la désignation est précédée de la lettre G. La désignation peut être complétée par des indications supplémentaires (pureté, application, dédiée...etc.), exemples de désignation :

- S185 (anciennement A33),  $R_e = 185$  MPa ;
- S235 (anciennement A37, E24),  $R_e = 235$  MPa ;
- E295 (anciennement A50),  $R_e = 295$  MPa ;
- GE295, acier moulé,  $R_e = 295$  MPa ;
- S355 J2 WP (anciennement A52, E36),  $R_e = 355$  MPa.

S'il s'agit d'un acier moulé, la désignation Est précédée de la lettre G, GC 25

#### 8.1.2 Aciers fortement alliés

Pour les aciers alliés il y a au moins un élément d'addition dépassant les 5% en masse. Ils sont destinés à des usages bien spécifiques, on y trouve des aciers à outils, aciers réfractaires, aciers de très haute résistance.

### 8.2 Aluminium

Grâce à sa légèreté, sa robustesse et sa résistance intrinsèque à la rouille, l'aluminium se révèle pertinent pour les structures de scooters visant une performance et une consommation d'énergie optimales. Néanmoins, sa rigidité moindre comparée à l'acier et son prix plus conséquent limitent son emploi à des modèles bien précis.

### 8.3 Matériaux composites

Les matériaux composites, comme la fibre de carbone époxy ou la fibre de verre, sont appréciés pour leur légèreté et leur grande résistance, ce qui les rend adaptés à la construction de châssis de scooters, notamment pour les modèles sportifs ou haute de gamme. Cependant, leur coût élevé et les difficultés liées au recyclage limitent leur utilisation à des applications spécialisées.

## 9. Cintrage et calcul de longueur développée

### 9.1 Définition du cintrage

Le cintrage est un procédé mécanique qui consiste à déformer un tube, une barre ou plus généralement, un profilé (creux ou non) selon un rayon et un angle défini. Il s'effectue à l'aide d'une cintrreuse. Il existe plusieurs techniques, par enroulement, par poussée, par roulage et par emboutissage.

La difficulté du cintrage dépend de plusieurs facteurs :

- Le rayon de cintrage : plus ce dernier est important pour un tube donné, plus l'opération est ardue ;
- Le rapport épaisseur/diamètre.

La figure 10 ci-dessous illustre un exemple de tube cintré :



Figure 10. Tube cintré

### 9.2 Les types de cintrages

Il existe différents types de cintrage des profilés :

- Cintrage à chaud ;
- Cintrage à froid ;
- Cintrage à froid par poussée ;
- Cintrage par galets ;
- Cintrage par enroulement.

### 9.3 Longueur du cintrage développée

La longueur à débiter pour cintrer est la somme des parties droites et des parties courbes, calculées à la fibre neutre.

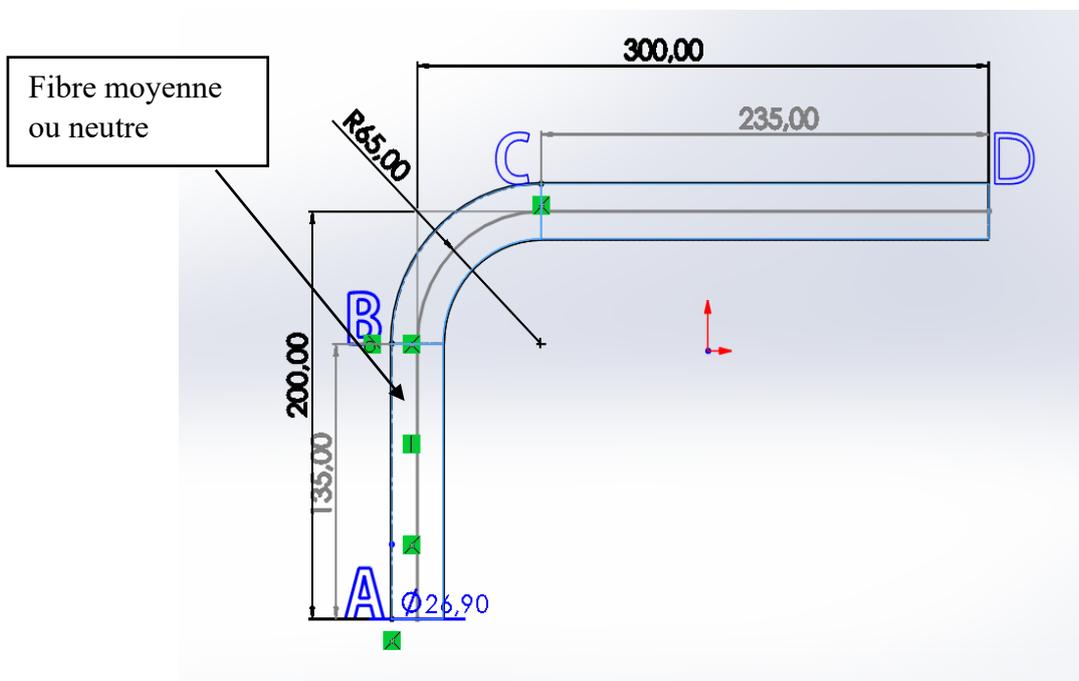
#### Première méthode :

Nous souhaitons cintrer un tube de diamètre extérieur 26.9 mm, d'épaisseur 2.3 mm, figure 11 sur une cintrreuse de type VIRAX. Ce type de cintrreuse impose un rayon de cintrage de 65mm. Voir tableau 1.

**Tableau 1. Cintrage selon les deux machines à cintré MINGORI et VIRAX [8]**

Diamètre US (Pouce)	Diamètre (mm)	Ep. (mm)	Forme de cintrage	Rayon cintrage VIRAX	Rayon cintrage MINGOR	Cote à retrancher VIRAX	Cote à retrancher MINGORI
3/8 "	17.2	2	12 / 17	40	46.5	8.5	10
1/2 "	21.3	2.3	15 / 21	50	55.5	11	12
3/4 "	26.9	2.3	20 / 27	65	71	14	15
1"	33.7	2.9	26 / 34	115	94	25	20
1 1/4 "	42.4	2.9	33 / 42	165	150	35.5	32
1 1/2 "	48.3	2.9	40 / 49	180	163	39	35
2"	60	3.2	50 / 60	240	220	51.5	47

$$\text{Longueur développée} = \sum \text{Parties droites} + \sum \text{Parties courbes} \quad (1)$$



**Figure 11. Préparation de tube à cintré**

$$Ld = (AB + CD) + BC$$

Calcul de la partie courbée (BC), le périmètre d'un cercle est égal à  $2 * \pi * R$ , cette longueur représente un arc de  $360^\circ$ . Pour un arc d'angle  $a$  quelconque, la longueur de cet arc sera égale à :

$$la\ partie\ courbée = \frac{2 * \pi * R * a}{360} \quad (2)$$

Pour les angles à  $90^\circ$  cette formule se simplifie en :

$$la\ partie\ courbée = \frac{\pi * R}{2}, \quad \text{avec } \pi = 3.1416$$

Pour le cas ci-dessus :

$$AB = 135, CD = 235, BC = \frac{\pi * 65}{2} = 102, Ld = 135 + 235 + 102 = 472mm$$

### Deuxième méthode :

Méthode par retranchement de cote d'abaque :

La deuxième méthode consiste à retrancher deux fois une cote d'abaque à la somme des dimensions à la fibre neutre. Pour ce faire, nous disposons de l'abaque construit pour les angles à  $90^\circ$  tableau 1.

$$\text{Longueur développée} = \sum \text{Parties extérieures} - 2 \times \text{Parties courbées} \quad (3)$$

Les cotes extérieures à la fibre neutre sont :

Cote1 : 200 mm

Cote2 : 300 mm

La cote à retrancher est de 14 mm, pour un tube de diamètre 26.9 mm et une épaisseur de 2.3 mm cas de la cintreuse VIRAX

$$Ld = 200 + 300 - 2 \times 14 = 472mm$$

## 10. Soudage

### 10.1 Définition

Le soudage permet d'assembler deux pièces métalliques en fusionnant leurs bords à l'aide d'un métal d'apport. Il peut être homogène ou hétérogène. On distingue deux grandes catégories selon la source d'énergie utilisée : externe (flamme, arc électrique, faisceau laser, plasma...) ou interne (résistance électrique, friction, diffusion, explosion, ultrasons...). Le soudage à l'arc électrique est le plus courant avec électrode enrobée, le MIG/MAG (fil-électrode fusible) et le TIG (électrode infusible).

### 10.2 Différents procédés de soudage

#### 10.2.1 Soudage à la flamme (oxyacétylénique)

Le soudage à la flamme figure 12, repose sur la combustion de l'oxygène avec un gaz combustible (acétylène, propane, hydrogène, etc.), permettant d'atteindre des températures élevées pour chauffer et assembler les pièces métalliques. Le choix du gaz influe sur la température de la flamme.

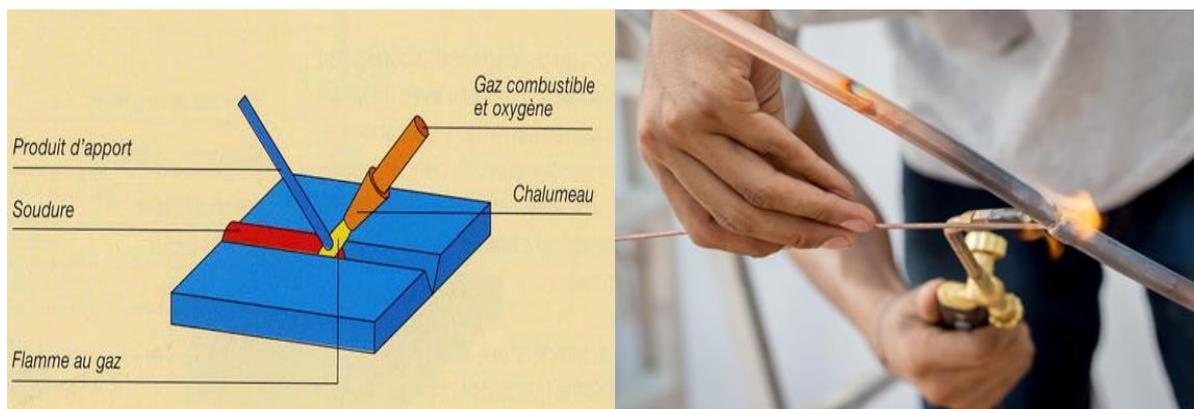
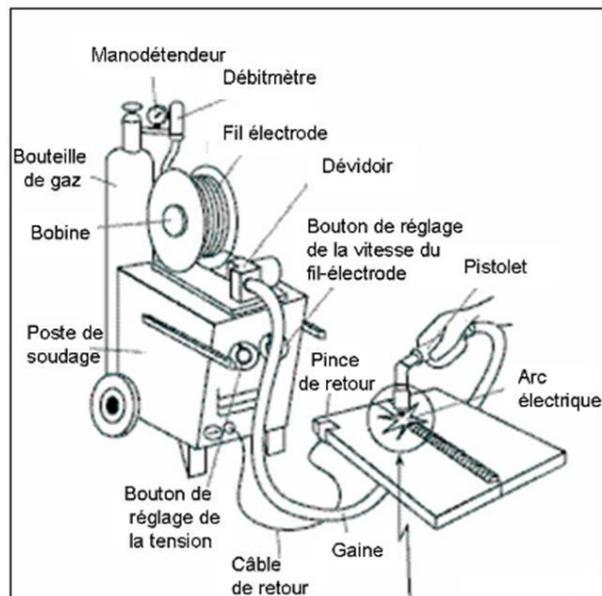


Figure 12. Soudage à la flamme [9]

#### 10.2.2 Soudage MIG et MAG

Le soudage MIG (Metal Inert Gas) et MAG (Metal Active Gas) figure 13 sont des procédés semi-automatiques largement utilisés en industrie pour leur souplesse, rapidité et faibles coûts. Adaptés à divers métaux (aluminium, cuivre, acier...), ils utilisent un fil métallique continu comme métal d'apport, dévidé via un pistolet de soudage. Un arc électrique chauffe la zone jusqu'à la fusion, tandis que le gaz protecteur empêche l'oxydation.

- MIG : utilise un gaz inerte (argon, hélium) pour protéger la soudure ;
- MAG : utilise un gaz actif (mélange d'argon avec CO<sub>2</sub> ou oxygène) influençant la qualité de la soudure.

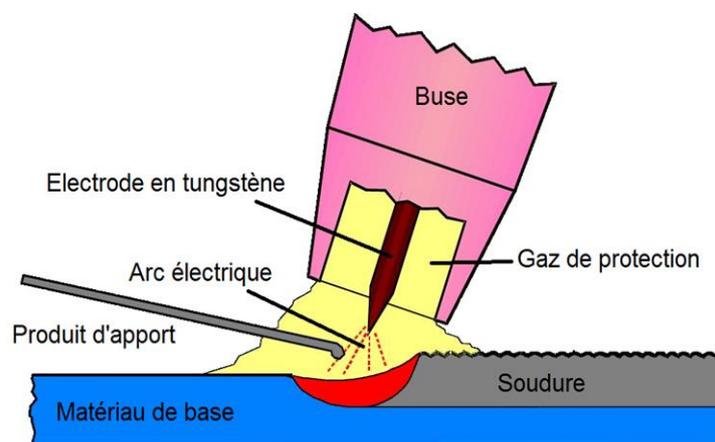


**Figure 13. Soudage MAG fil plein [9]**

Le soudage MIG/MAG est difficile à utiliser à l'air libre surtout ou en présence de forts courants d'air en raison de la nécessité d'un gaz de protection. Cependant, ces techniques sont robotisables, ce qui facilite le captage des fumées pour protéger le soudeur.

### 10.2.3 Soudage TIG (Tungsten Inert Gas)

Le soudage TIG est un procédé à l'arc sous protection gazeuse figure 14, utilisant une électrode non fusible en tungstène pour générer un arc électrique. Un gaz inerte (argon, hélium ou mélange des deux) protège l'électrode et le bain de fusion contre l'oxydation. Une baguette métallique est ajoutée comme métal d'apport. Il est utilisé pour souder l'aluminium et l'acier inoxydable, il offre des soudures de haute qualité, nécessitant une grande expertise. Il est largement employé en tôlerie, chaudronnerie et tuyauterie, notamment dans les secteurs de l'agroalimentaire, la chimie, l'énergie (gaz, nucléaire), l'aéronautique et le spatial.



**Figure 14. Soudage TIG [9]**

### 10.2.4 Soudage au chalumeau

Le soudage au chalumeau figure 15 utilise la chaleur générée par la combustion d'un gaz combustible, principalement de l'acétylène ou du propane, mélangé à l'oxygène. Le poste de soudage se compose de bouteilles de gaz, de détendeurs, de tuyaux souples, de dispositifs de sécurité et d'un chalumeau.



**Figure 15. Soudage au chalumeau**

# **Chapitre II**

## **Conception du châssis de scooter**

## 1. Synthèse des travaux réalisés

**Y. Champoux, S. Richardand, J. - M. Drouet 2007 [10]** : ont contribué à l'étude du comportement dynamique du châssis de scooter.

**Mohammad Al Bukhari Marzuki, Mohammad Hadi Abd Halim and Abdul Razak Naina Mohamed 2015 [11]** : ce travail de recherche a présenté deux méthodes d'analyse dynamique pour étudier les formes des modes et les fréquences naturelles dans la structure du châssis : l'analyse modale et l'analyse harmonique étant réalisées à l'aide de la méthode des éléments finis (FE). L'étude a identifié cinq formes de mode extraites à l'aide de la méthode Block Lanczos, toutes les formes de modes vibrent à une fréquence supérieure à 150 Hz.

**Pavana Shireesha Paningipalli, Dr. F. B. Sayyad 2016 [12]** : La conception d'une machine est un processus interdisciplinaire, impliquant l'aérodynamique, la thermodynamique, la dynamique des fluides, l'analyse des contraintes, l'analyse des vibrations, la sélection des matériaux et les exigences de fabrication. Le fonctionnement de tout système mécanique génère des vibrations. L'objectif de tout chercheur est de minimiser l'effet de ces vibrations qui peuvent être catastrophique. Le châssis de moto est un composant majeur dans un système de véhicule. Ce travail est accès sur la détermination des fréquences naturelles et des formes modales en calcul de structures. L'effet du matériau de construction est également traité. Une analyse modale expérimentale a été réalisée pour valider les modèles EF.

**YU Baojun, SUN Lunjie, BIAN Yahui, SI Sumei, YU Wenhan 2017 [13]** : ont présenté une étude modale d'un châssis en calcul de structures par éléments finis. Les fréquences naturelles des 10 premiers modes non nuls, sont comparées à celle du moteur tournant au ralenti. Les résultats obtenus montrent la non coïncidence de ces fréquences avec celle du moteur au ralenti et donc l'absence de résonance.

**D. Mohankumar, R. Sabarish, Dr. M. PremJeyaKumar 2018 [14]** : ont étudié les contraintes et les déformations subies par un châssis d'un scooter sous différents cas de charge, ainsi que l'identification des modes de défaillance structurelle à travers une analyse modale.

**Mohamed Hafeez, Mohamed Hafeez, V. Ajay, Santhosh Kumar H. V 2020 [15]** : L'article traite la validation expérimentale de l'analyse des vibrations d'un châssis simple de moto. À l'aide des formes de mode animées, Les auteurs ont déduit comment le châssis se comporte à différentes fréquences.

**Djoko Setyanto, Arka Dwinanda Soewono, Andi Wibowo and Rugerri Toni Liong 2020 [16]** : ont montré qu'un modèle éléments finis (FE) valide peut être utilisé pour remplacer les essais expérimentaux assez couteux. Pour valider le modèle FE, une analyse modale expérimentale (EMA) sur le prototype du cadre réel est réalisée. Le modèle du cadre est ensuite soumis aux contraintes qu'il faut pour simuler les conditions de conduite réelle de la moto. La réponse en fréquence de la simulation montre que la première fréquence naturelle de 3 Hz est celle qui domine.

**Prof. Kaveri.S Kadam, Mr. Nikhil.S. Sambhar, Ms. Namrata.M. Bora, Mr. Shubham. R. Bhakare, Ms. Swapnali.W. Gaikwad 2020 [17]** : leur travail traite un châssis de scooter électrique point de vue conception et analyse. L'accent est concentré sur l'effet de l'impact et du poids de chargement.

**Naresh Kumar KONADA, Koka Naga Sai SUMAN 2020 [18]** : L'objectif principal du travail de recherche est l'analyse du cadre d'un châssis d'un véhicule à deux roues électrique soumis à des charges statiques et d'impact. La conception du cadre du châssis est réalisée à l'aide d'un logiciel de CAO. Le cadre du châssis conçu est simulé et analysé à l'aide de la méthode des éléments finis. Les contraintes, les déformations et la contrainte de Von Mises sont évaluées à partir de l'analyse statique. Les contraintes et les déformations induites par l'impact sont évaluées à partir de l'analyse d'impact.

## **2. Méthodes de Modélisation d'un Châssis de Scooter**

### **2.1 Numérisation en plans 2D**

Si nous avons accès aux plans techniques, nous pouvons modéliser directement en 3D la structure du châssis considéré.

### **2.2 Relevé manuel des dimensions**

Pour relever les dimensions réelles d'un châssis, nous utilisons les outils usuels : pied à coulisse, mètre à ruban, rapporteur d'angle et télémètre laser. Chaque composant du châssis est mesuré avec précision (longueurs, diamètres des tubes, angles, entraxes, etc.). Les données recueillies entrent dans la conception 3D de châssis à l'aide d'un logiciel de dessin et de conception DAO et CAO tel que SolidWorks, CATIA.etc.

### **2.3 Photogrammétrie**

Cette technique consiste à utiliser plusieurs photos prises sous différents plans. Le traitement s'effectue ensuite via un logiciel tel que Meshroom ou Agisoft Metashape, afin de créer un nuage de points 3D.

### **2.4 Scan 3D**

Les scanners 3D de haute précision (type Artec, Creaform, Einscan) exploitent des technologies de projection laser ou de lumière structurée pour numériser le châssis avec une grande fidélité. Ils génèrent un nuage de points dense ou un maillage polygonal directement exploitable pour l'analyse géométrique. Ces données sont ensuite traitées dans un logiciel de rétro-ingénierie afin de reconstruire un modèle CAO paramétrique ou surfacique, compatible avec les outils de simulation ou de fabrication.

### **2.5 Rétro-ingénierie CAO**

La rétro-ingénierie consiste à convertir les données issues de la numérisation 3D (nuage de points ou maillage) en un modèle CAO exploitable. Cette étape est réalisée à l'aide de logiciels spécialisés (Geomagic, Design X, SolidWorks). Ils permettent de reconstruire des surfaces NURBS ou des géométries paramétriques à partir des données scannées. Le modèle obtenu peut ensuite être utilisé pour des analyses structurelles, de simulations, ou de fabrication assistée par ordinateur (FAO).

### 3. Génération du model CAO

La modélisation du châssis du scooter china a combinée des méthodes de mesure directe et de photogrammétrie. Les dimensions linéaires (longueurs, diamètres, entraxes) ont été relevées manuellement à l'aide d'outils de métrologie conventionnels, tels qu'un mètre à ruban et un pied à coulisse. Pour les angles et les inclinaisons des éléments structuraux difficiles à mesurer directement, une approche de photogrammétrie a été mise en œuvre. Deux photographies du châssis ont été prises sous deux plans figure 1, puis importées dans le logiciel de conception SolidWorks. Le tracé des lignes de référence sur les images a permis d'estimer les angles avec précision. Une échelle appropriée a été appliquée pour garantir la cohérence dimensionnelle entre les données extraites et les mesures faites.



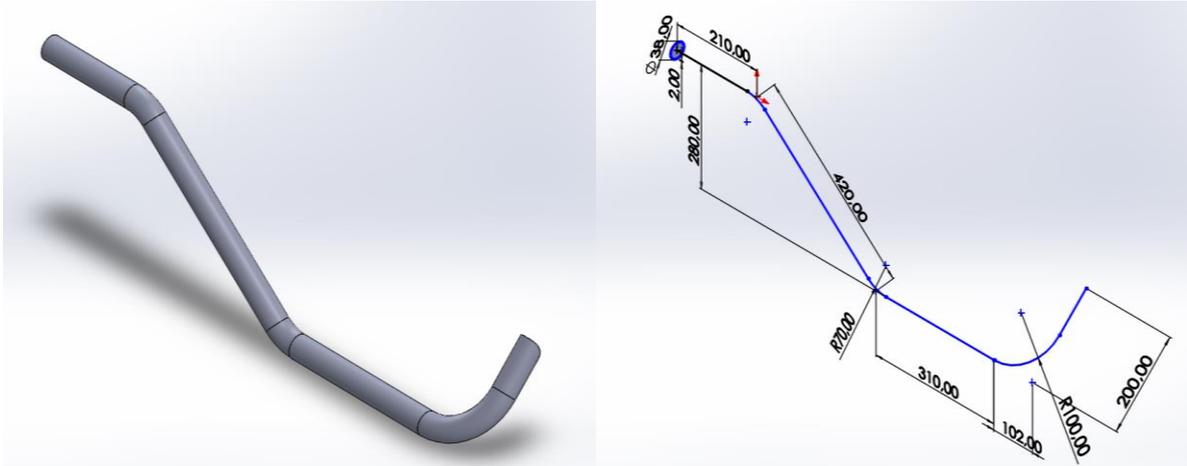
a)



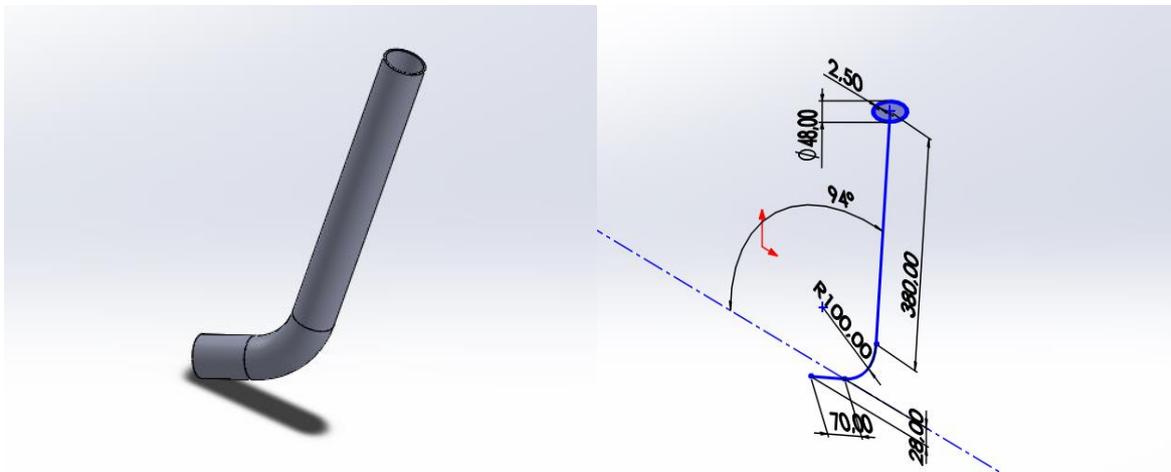
b)

**Figure 1. Photographie du châssis**

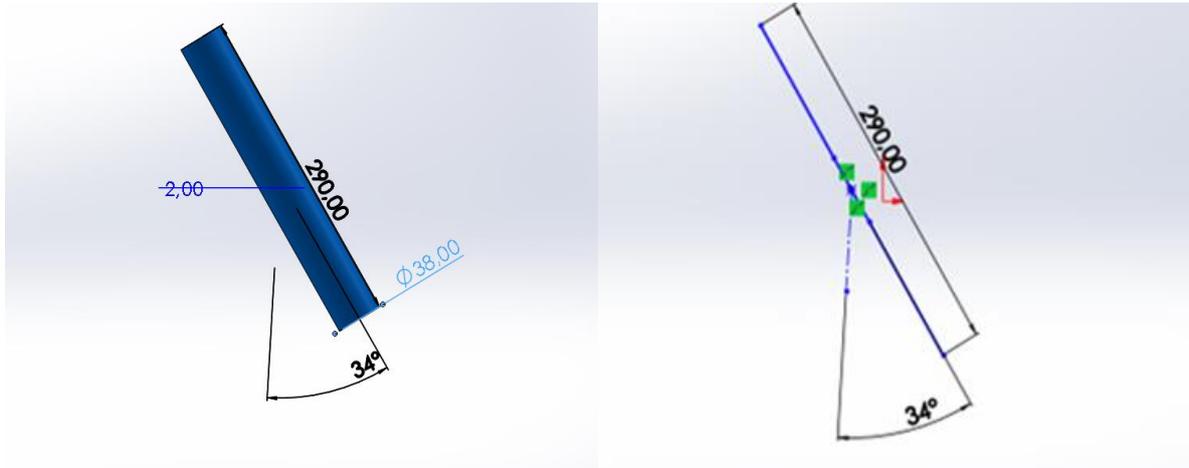




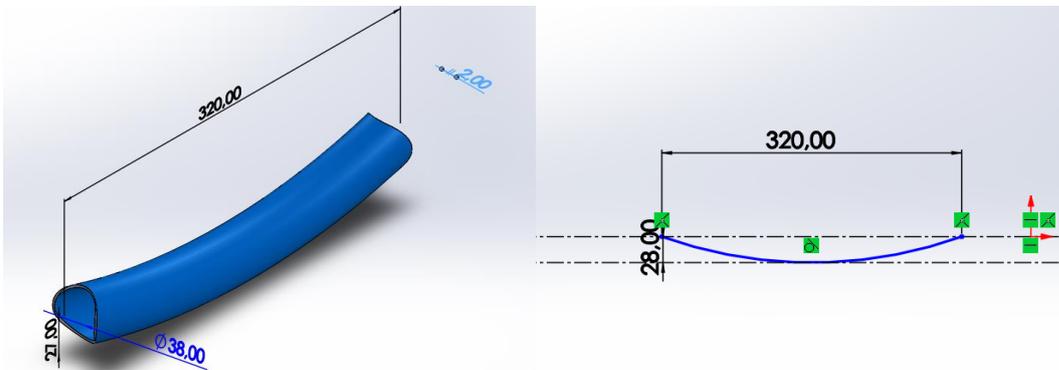
Tube latéral droit



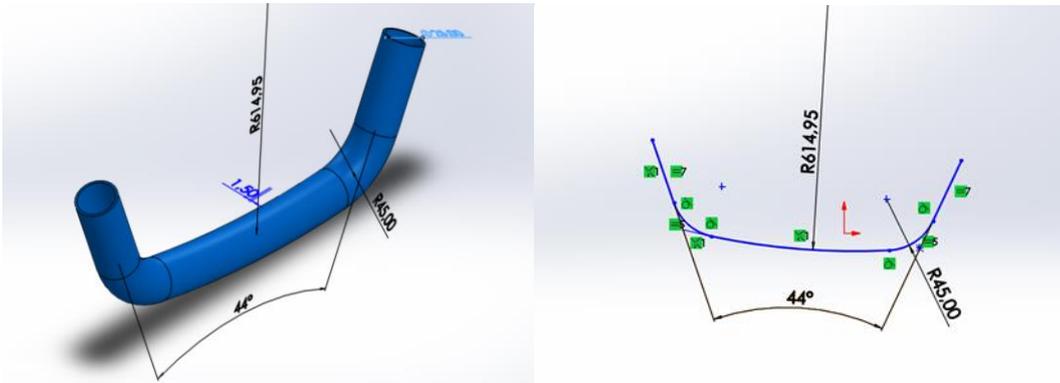
Tube avant



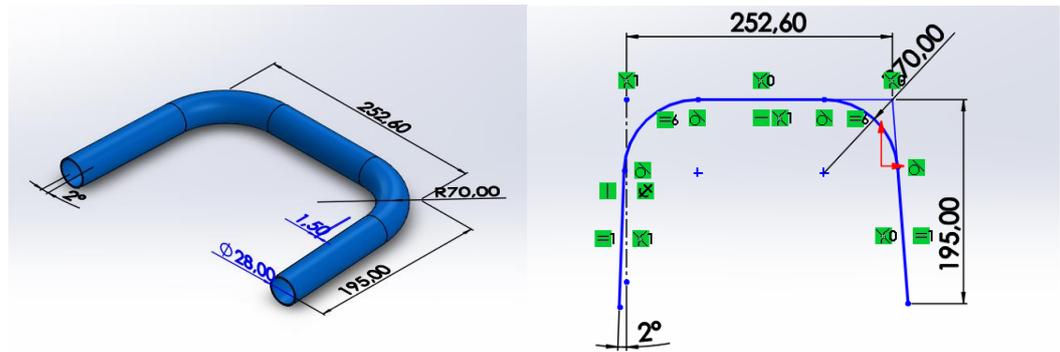
Tube de direction



Tube inferieur du renfort avant



Support de fixation de la béquille



Tube d'assemblage arrière

Figure 3. Dessin de définition des pièces principales du châssis

### 3.3 Assemblage de différentes pièces

Nous présentons sur la figure 4 le dessin d'assemblage des différentes pièces du châssis de scooter

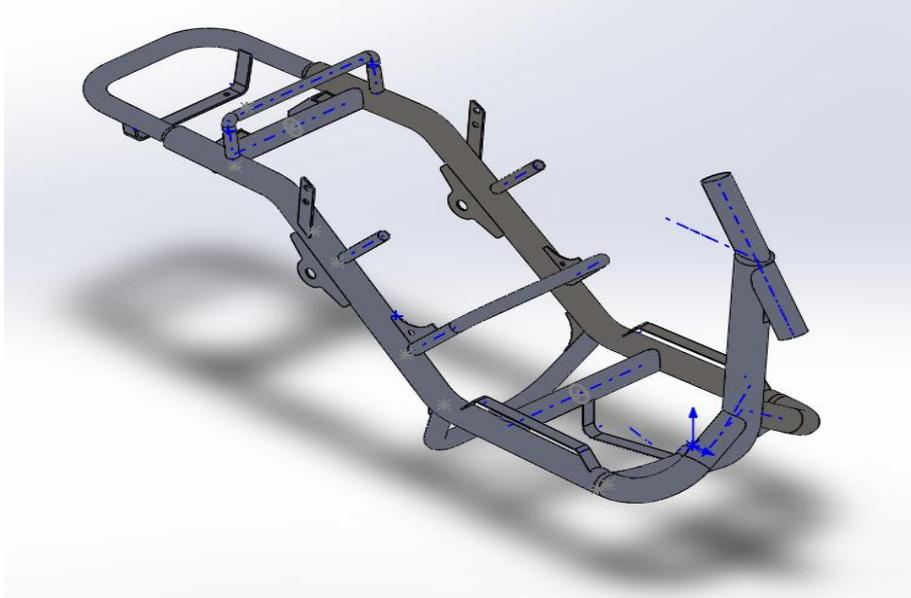


Figure 4. Châssis du scooter

## 4. Simulation numérique du comportement mécanique du châssis

La simulation numérique du comportement mécanique d'une structure mécanique, nécessite la conception du modèle 3D, la connaissance du matériau, les conditions aux limites appliqués et le maillage du châssis, C'est la démarche de calcul des structures par éléments finis.

### 4.1 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis des déplacements est une technique particulière d'approximation des solutions par sous-domaines appelés éléments finis. Basée sur une idée simple, elle consiste à discrétiser une forme complexe en un grand nombre de sous-domaines élémentaires de forme géométrique simple (éléments finis) interconnectés en des points appelés nœuds du maillage.

### 4.2 Etapes de calcul par éléments finis

- Numéroté et définir les coordonnées globales des nœuds dans l'espace physique et les tables de connectivité élémentaires de la structure (génération du maillage) ;
- Pour chaque élément  $e$  ;
  - la matrice de rigidité élémentaire  $[k^e]$  reliant les degrés de libertés (déplacements nodaux)  $\{u^e\}$  et les forces généralisées appliquées :

$$[k^e]\{u^e\} = \{f^e\} \quad (1)$$

- assembler les matrices et les vecteurs élémentaires en un système global de manière à satisfaire les conditions d'équilibre aux nœuds ;

$$[K]\{U\} = \{F\} \quad (2)$$

- Introduire les conditions limites sur les déplacements imposées ;
- Résoudre le système réduit  $[K_r]\{U_r\} = \{F_r\}$  et obtenir les déplacements  $\{U_r\}$  aux nœuds ;
- Calculer les déformations, les contraintes dans les éléments et les réactions aux nœuds sur lesquels les conditions aux limites sont imposées ;

Par ailleurs cette méthode peut être implémentée dans un programme informatique permettant de faire des calculs laborieux que l'être humain n'est pas capable de faire [19].

### 4.3 Théorie de l'analyse des vibrations

La fonction de réponse en fréquence utilise la technique de mesure de la transformée de Fourier rapide (FFT), qui est largement utilisée dans l'analyse de la dynamique des structures, en particulier dans l'industrie automobile, pour établir les caractéristiques de vibrations, c'est-à-dire la forme des modes et les fréquences naturelles du modèle de véhicule.

L'équation du mouvement pour un système en vibration libre non amorti s'écrit :

$$[M]\{\ddot{Q}\} + [K]\{Q\} = \{0\} \quad (3)$$

$[M]$  = Matrice masse globale ;

$[K]$  = Matrice raideur globale ;

$\{Q\}$  = Vecteur regroupant tous les DDL de la structure.

Après introduction des conditions aux limites sur les déplacements, cette équation devient :

$$[M_r]\{\ddot{Q}_r\} + [K_r]\{Q_r\} = 0 \quad (4)$$

Où  $[M_r]$  et  $[K_r]$  sont respectivement les matrices de masse et de rigidité réduite ou restructurées

On suppose une solution harmonique de la forme :

$$\{Q_r(t)\} = \{Q_i\}e^{j\omega_i t} \quad j = \sqrt{-1} \quad (5)$$

En substituant (5) dans (4), on obtient :

$$\det(-\omega^2[M_r] + [K_r]) = 0$$

Les solutions  $\omega_i$  sont les fréquences ou les pulsations naturelles du système, et chaque vecteur propre  $\{Q_i\}$  associé décrit une forme modale de vibration.

## 5. Types d'éléments de maillage

La discrétisation d'une structure avec SolidWorks implique l'utilisation de différents types d'éléments de maillages tableau 1.

### 5.1 Eléments solides 3D

Il s'agit d'éléments volumétriques représentant la pièce dans les trois dimensions (x, y et z), utilisés pour les pièces massives. Ils prennent la forme de tétraèdres ou d'hexaèdres.

### 5.2 Eléments coques (Shell) 2D

Éléments surfaciques 2D représentant l'épaisseur, utilisés pour les pièces minces ou une modélisation 3D complète s'avère trop coûteuse. Ils sont formés de triangles ou de quadrilatères surfaciques.

### 5.3 Eléments membranes 2D

Les éléments surfaciques qui ne supportent que des efforts dans leur plan (traction, compression) ne prennent pas en compte la flexion (pas de moment). Ils sont similaires aux couches, mais sans rigidité hors plan. Ils sont utilisés pour les pièces telles que les films, les bâches tendues, les structures textiles ou les peaux minces sous tension.

### 5.4 Eléments plaques 2D

Variante des coques, elles supportent à la fois la traction, la compression dans le plan et la flexion hors plan. On les retrouve plus souvent dans des solveurs spécialisés, mais en pratique, dans SolidWorks, les coques font souvent office de plaques pour les dalles, les plaques épaisses et les pièces mécaniques minces soumises à la flexion.

## Domaine d'application

**Tableau 1. Types d'éléments utilisés en calcul de structure par éléments finis**

Types d'éléments	Dimensions	Prend en compte	Exemples
Solide	3D	Traction, compression Cisaillement	Pièces massives
Coque (Shell)	2D	Traction, compression, flexion	Tôles minces
Membrane	2D	Traction, compression (Dans le plan)	Bâches, membranes Souples
Plaque	2D	Traction, compression, flexion	Dalles, plaques épaisses

## 6. Procédures de mesures des fréquences propres

### 6.1 Introduction

L'analyse modale expérimentale est essentielle pour comprendre la dynamique des structures et valider les modèles numériques, Elle joue un rôle clé dans le processus de surveillance des structures soumises aux vibrations. Les différentes techniques d'excitation (MIMO, SIMO, marteau) peuvent donner des résultats variables, surtout pour les structures complexes. Ouelaa et all [22]. L'application de ces méthodes à une éolienne complexe a donné des modes vibratoires proches. L'analyse modale expérimentale (AME), permet d'identifier les paramètres dynamiques clés sans modélisation préalable en mesurant la réponse vibratoire et la force d'excitation afin de calculer la réponse fréquentielle (FRF) [20].

### 6.2 Mesures des fréquences propres

Les auteurs ont mesuré et analysé les fréquences d'une structure de châssis importée de Chine. Les mesures expérimentales ont été réalisées dans le laboratoire de mécanique et structures de l'université de guelma, avec les conditions aux limites libre et appui-appui.

- Châssis libre (suspendu en un point par file élastique) ;
- Châssis posé sur un support (emplacements des amortisseurs avant et arrière).

La figure 5 a et b représente les bancs d'essais cas des configurations libre et appui\_appui. La technique appliquée consiste à exciter la structure en un point à l'aide d'un marteau de choc, et la réponse vibratoire est enregistrée par un accéléromètre positionné successivement sur 29 points définis le long de la structure.



a) Cas de la condition libre [21]



b) Cas de la condition appui-appui [21]

Figure 5. Bancs d'essais

### 6.3 Résultats de l'analyse modale expérimentale du châssis libre

Sur la figure 6 est présentée la superposition des fonctions de réponses fréquentielles, mesurées aux 29 points du châssis et leur courbe moyenne.

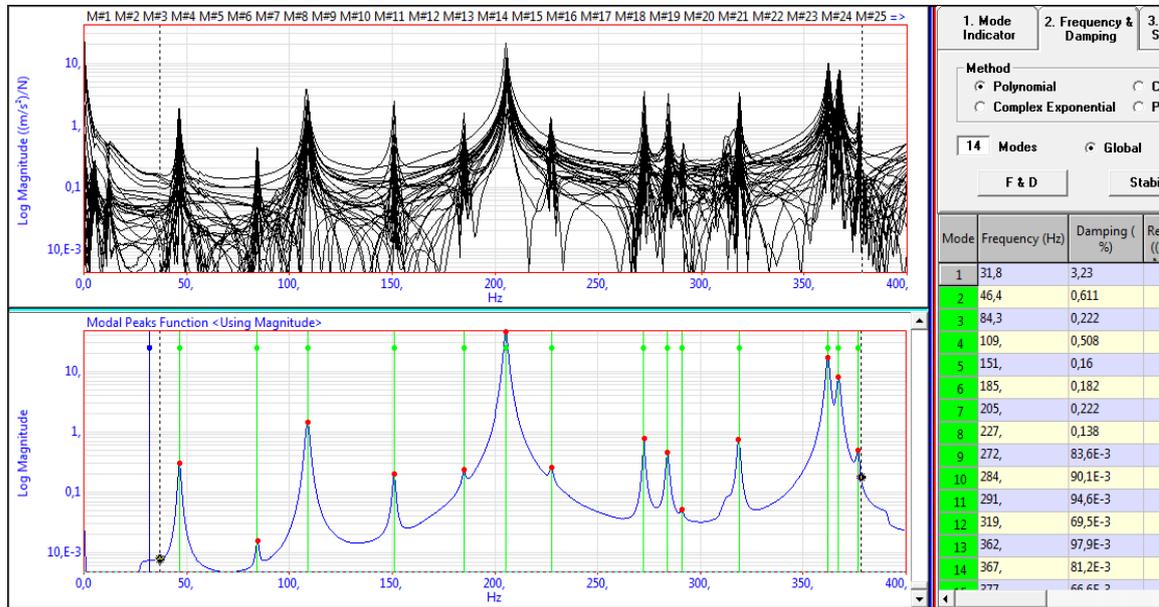


Figure 6. Résultats du châssis libre [21]

### 6.4 Résultats de l'analyse modale expérimentale du châssis Appuyé-Appuyé

Sur la figure 7 est présentée la superposition des fonctions de réponses fréquentielles, mesurées aux 29 points du châssis et leur courbe moyenne.

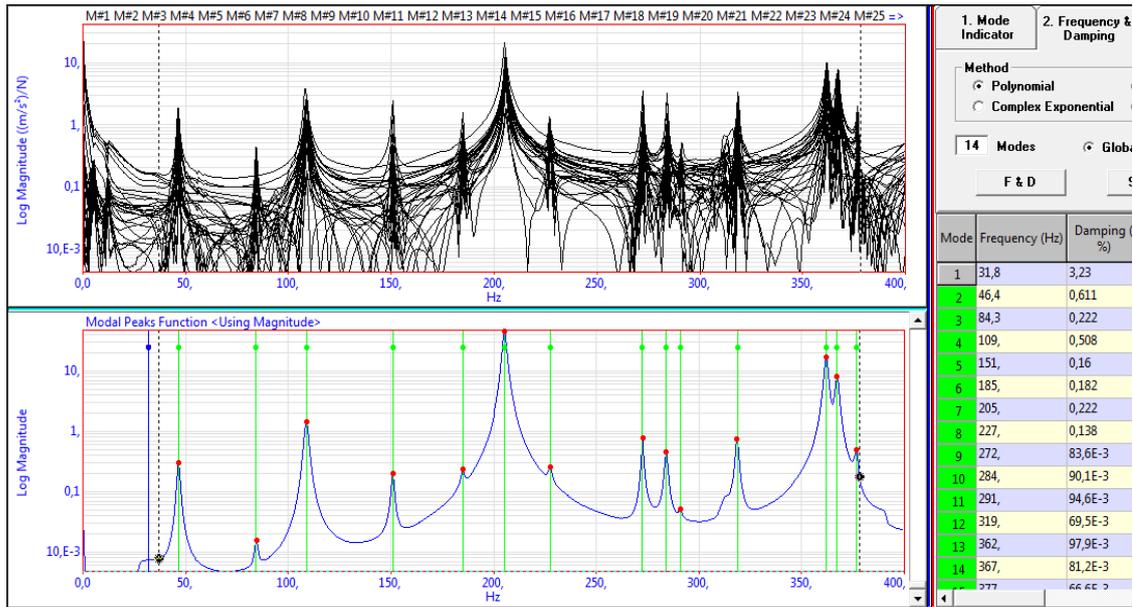


Figure 7. Résultats du châssis appui-appui [21]

6.5 Tableau récapitulatif des résultats

Sur le tableau récapitulatif 2 sont indiquées les fréquences mesurées sur une bande de fréquences [0-400Hz], dans le cas de deux configurations de conditions aux limites. Pour la première colonne de configuration libre les fréquences montrées sont celles de la structure du châssis. Tandis que pour la deuxième colonne de fréquences listées, elles peuvent être du châssis, du support ou des éléments d’habillages. Une étude complémentaire plus fine est nécessaire pour trier les modes du châssis, de l’habillage et du support.

Tableau 2. Tableau récapitulatif des résultats [21]

Bande de fréquence d’analyse [0 – 400 Hz]	
Fréquences (Hz) châssis libre	Fréquences (Hz) châssis appui appui
46.4	8.65
84.3	25.7
109.0	40.2
151	48.9
205	106
227	163
272	185

# **Chapitre III**

## **Simulation modale et statique du châssis**

## 1. Introduction

Notre projet traite essentiellement l'étude, le dessin, la conception et l'évaluation des performances structurelles statique et modales d'un châssis de scooter de fabrication chinoise en calcul de structures par éléments finis sous Solid Works 2016. Les résultats de la simulation modale sont comparés à ceux obtenus dans des travaux antérieurs [22]. Pour voir l'influence de la conception sur les résultats de comportement mécanique une conception d'un châssis large est réalisée, les contraintes, les déformations, les déplacements et le coefficient de sécurité obtenus sont comparés à ceux du châssis incliné.

## 2. Etude statique

Le calcul statique du châssis chargé par les poids, du conducteur 80 kg, du réservoir 5 kg, du moteur 28 kg et de la mallette 17 kg dans les conditions de travail présentés ci-dessous a permis d'obtenir la déformée totale, la répartition des contraintes de von mises, la déformation globale, les déplacements globaux et le coefficient de sécurité.

Matériau utilisé : Acier non allié de :

Module élastique : 210000 MPa

Limite d'élasticité : 220.594 MPa

Coefficient de poisson : 0.28

Masse volumique : 7800 kg/m<sup>3</sup>

### 2.1 Châssis large

#### 2.1.1 Conception et conditions aux limites

Nous présentons sur la figure 1 le châssis chargé avec les parties arrière et avant sont bloquées en translations.

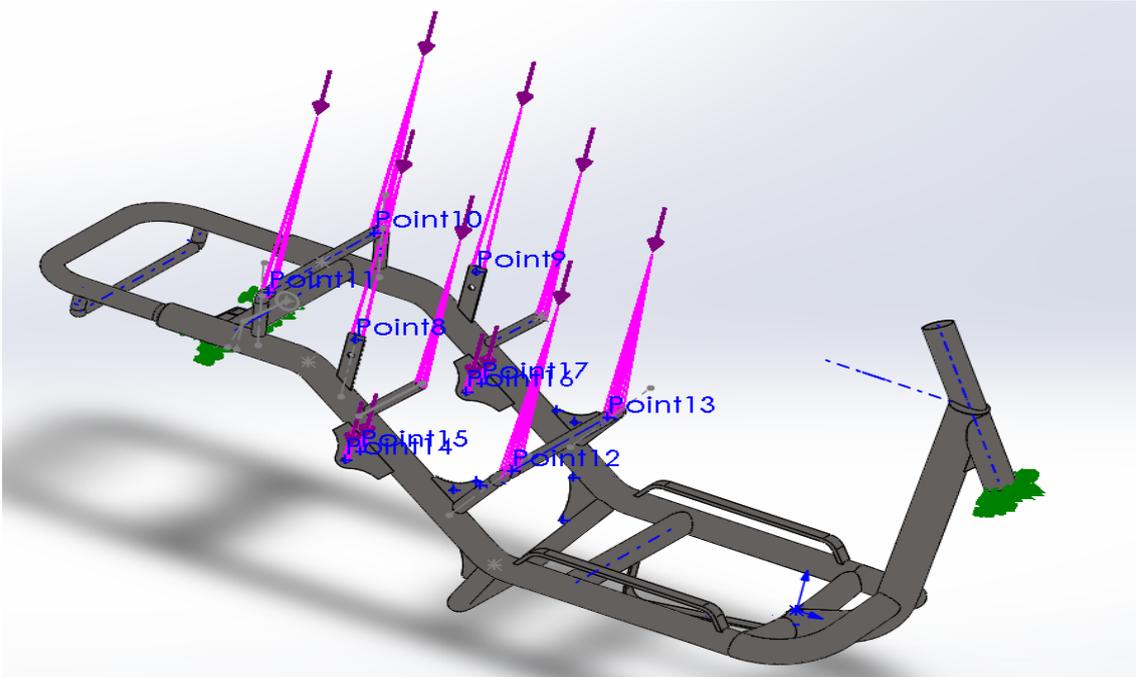


Figure 1. Chargement et conditions limites du châssis

### 2.1.2 Structure avant et après déformation

Après calcul statique du châssis sous chargements et conditions aux limites indiqués ci-dessus le châssis se déforme selon la figure 2.

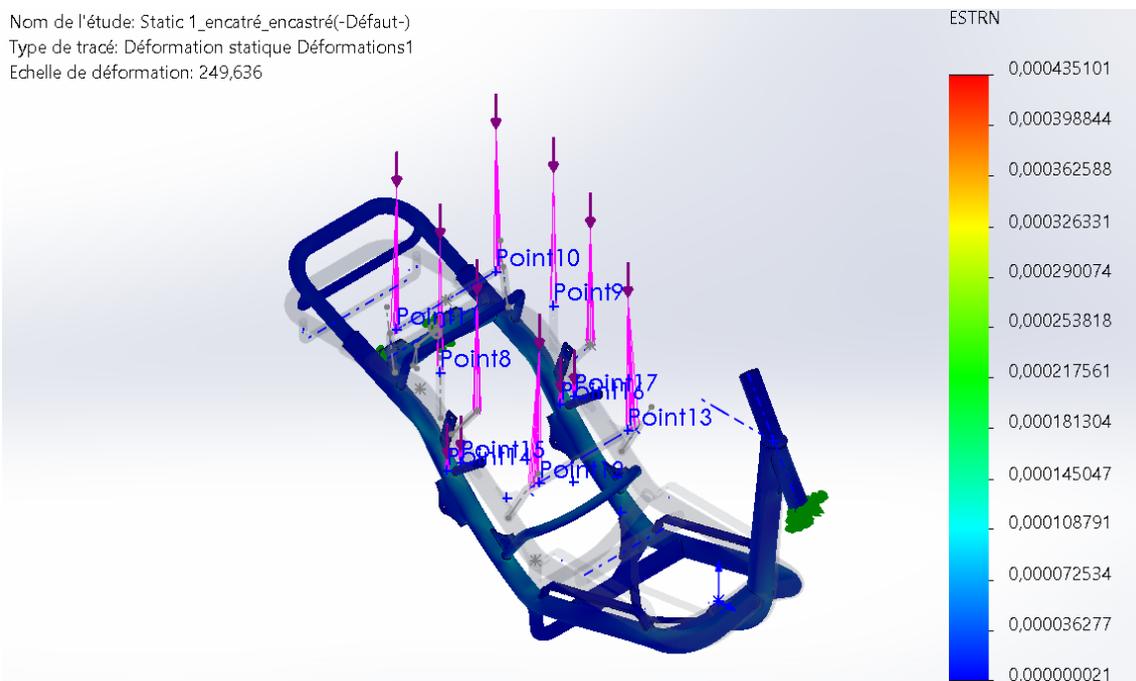


Figure 2. Châssis large et sa déformée

### 2.1.3 Contraintes de Von Mises

La figure 3 montre la répartition des contraintes de von mises dans la structure la valeur maximale est de 128.61 MPa.

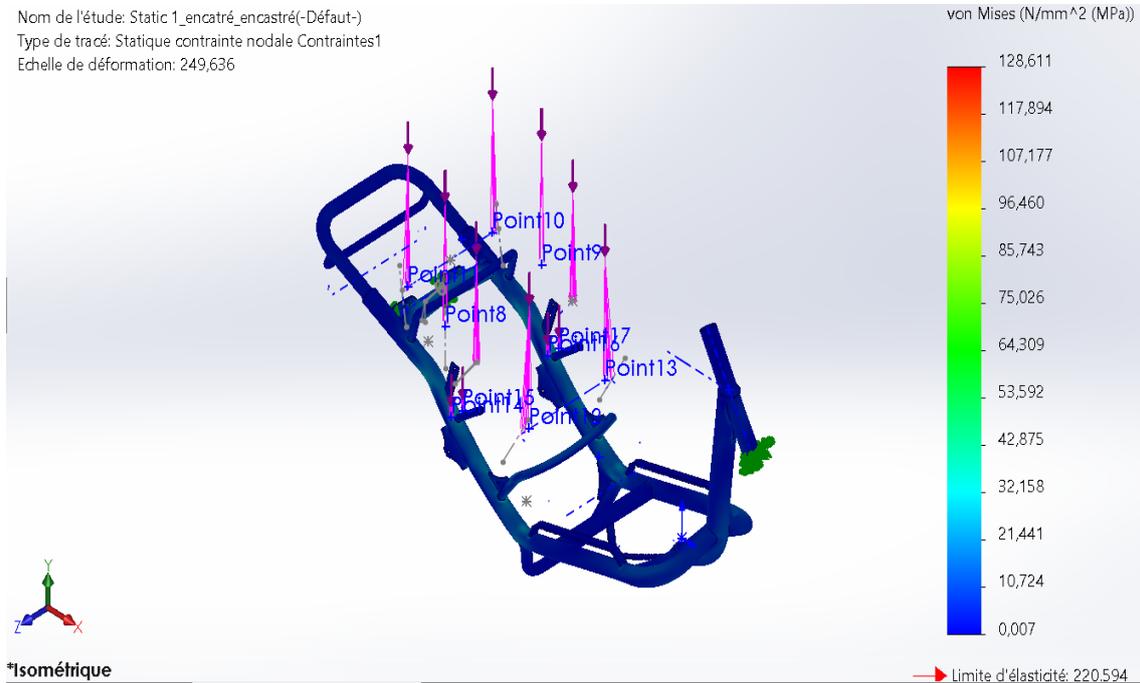


Figure 3. Contraintes de Von Mises en MPa

### 2.1.4 Déplacement global

Sur la figure 4 nous présentons le déplacement global de la structure chargée. Le résultat de calcul montre qu'il est de l'ordre de 1 (mm).

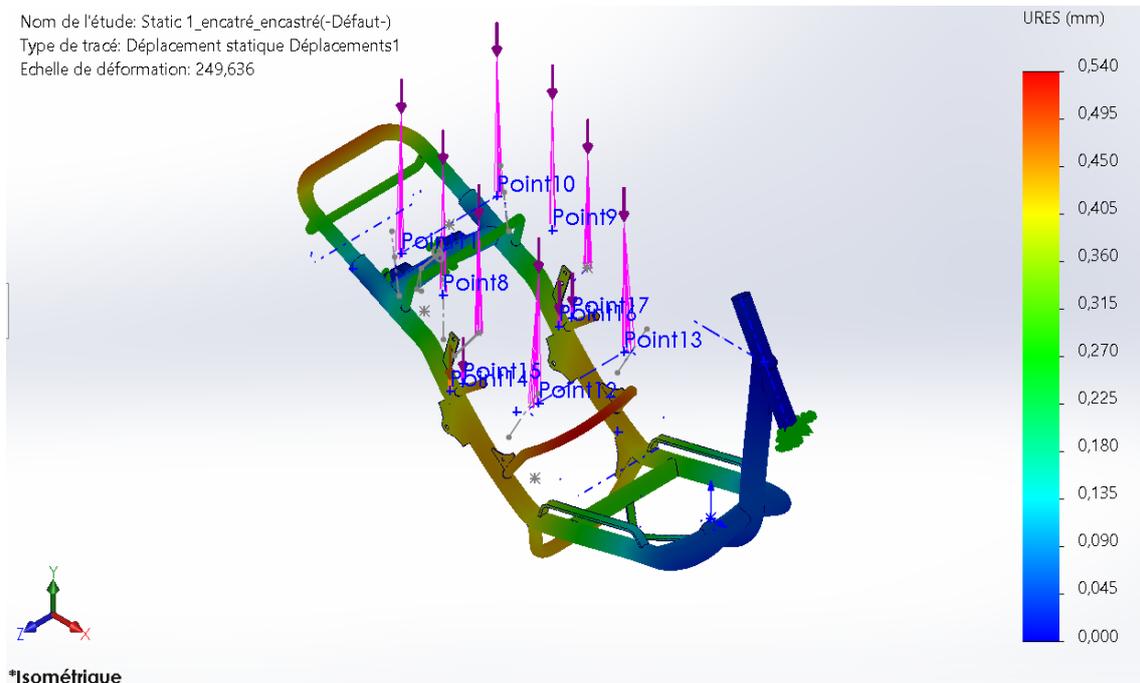
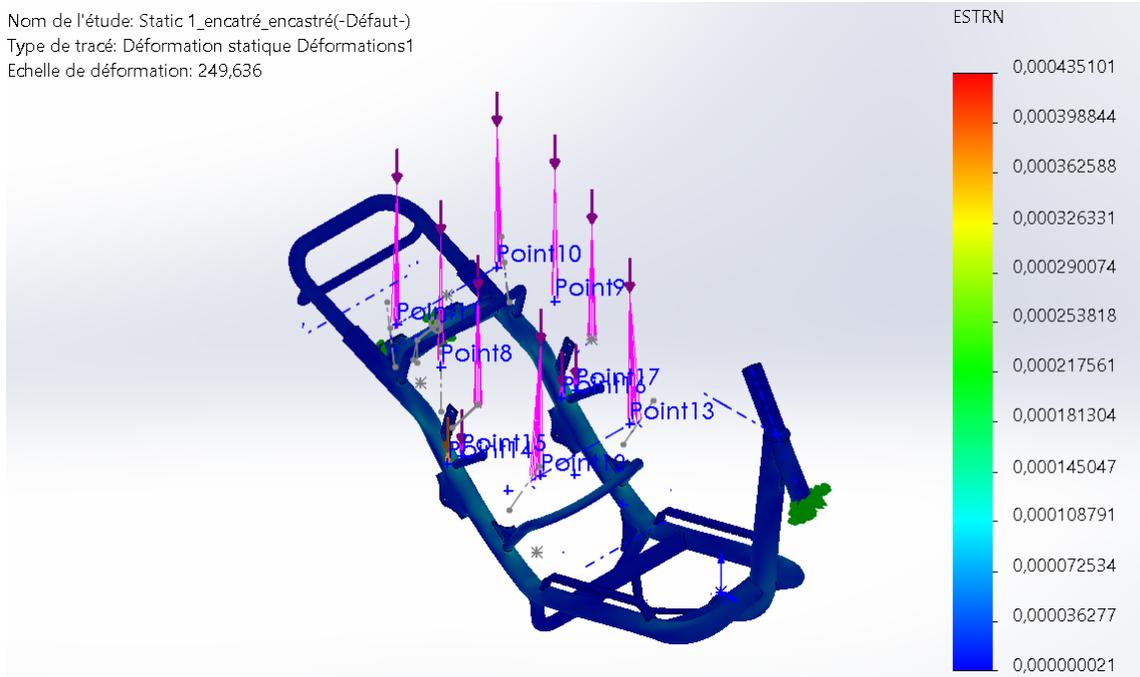


Figure 4. Déplacement (mm)

**2.1.5 Déformation globale**

La figure 5 représente la répartition de la déformation au sein du châssis, elle est très faible

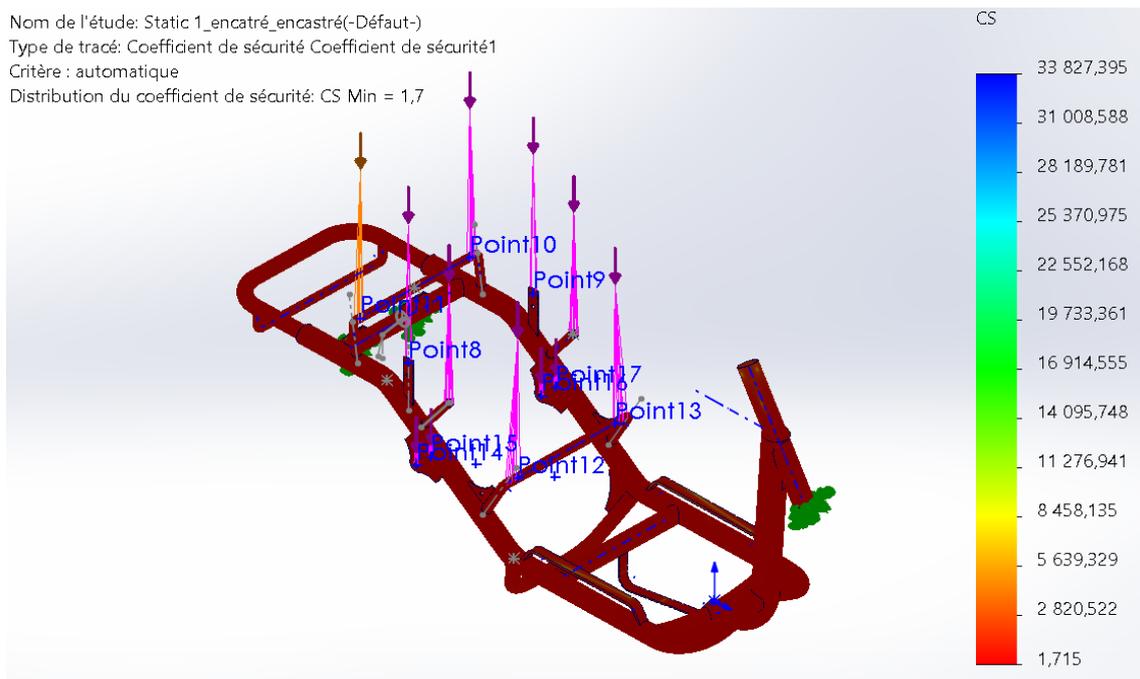
$\varepsilon = 0.0004$ .



**Figure 5. Déformation**

**2.1.6 Coefficient de sécurité**

Nous présentons sur la figure 6 le tracé du coefficient de sécurité dans la structure il est de l'ordre 1,7.



**Figure 6. Coefficient de sécurité**

## 2.2 Châssis incliné

### 2.2.1 Structure avant et après déformation

La figure 7 montre le châssis incliné et sa déformée avant et après chargement.

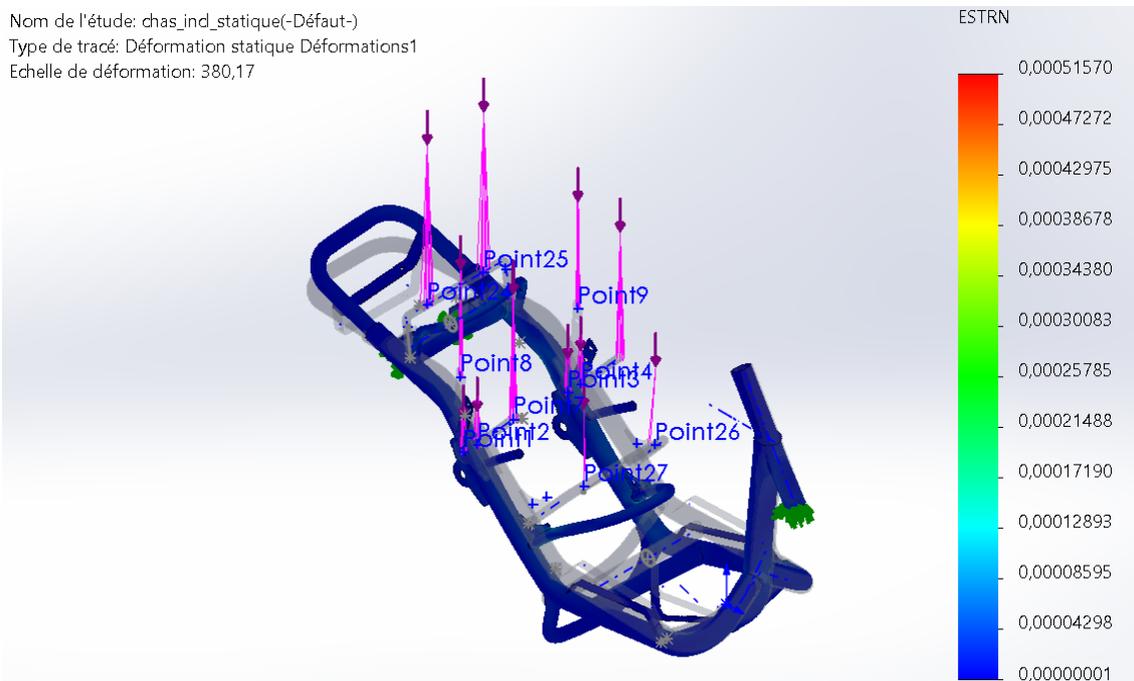


Figure 7. Châssis incliné et sa déformée

### 2.2.2 Contraintes Von Mises

La figure 8 montre la répartition des contraintes de von mises dans la structure la valeur maximale est de 141.832 MPa.

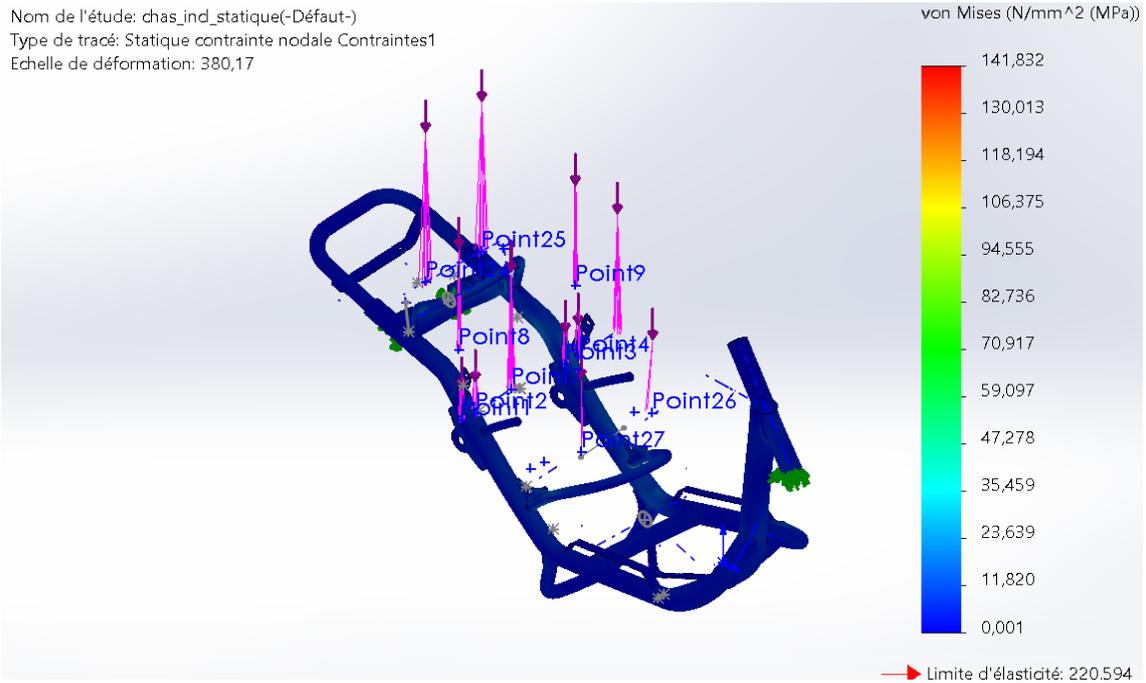


Figure 8. Contraintes von mises en MPa

### 2.2.3 Déplacement global

Sur la figure 9 nous présentons le déplacement global de la structure chargée. Le résultat de calcul montre qu'il est de l'ordre de 1 (mm).

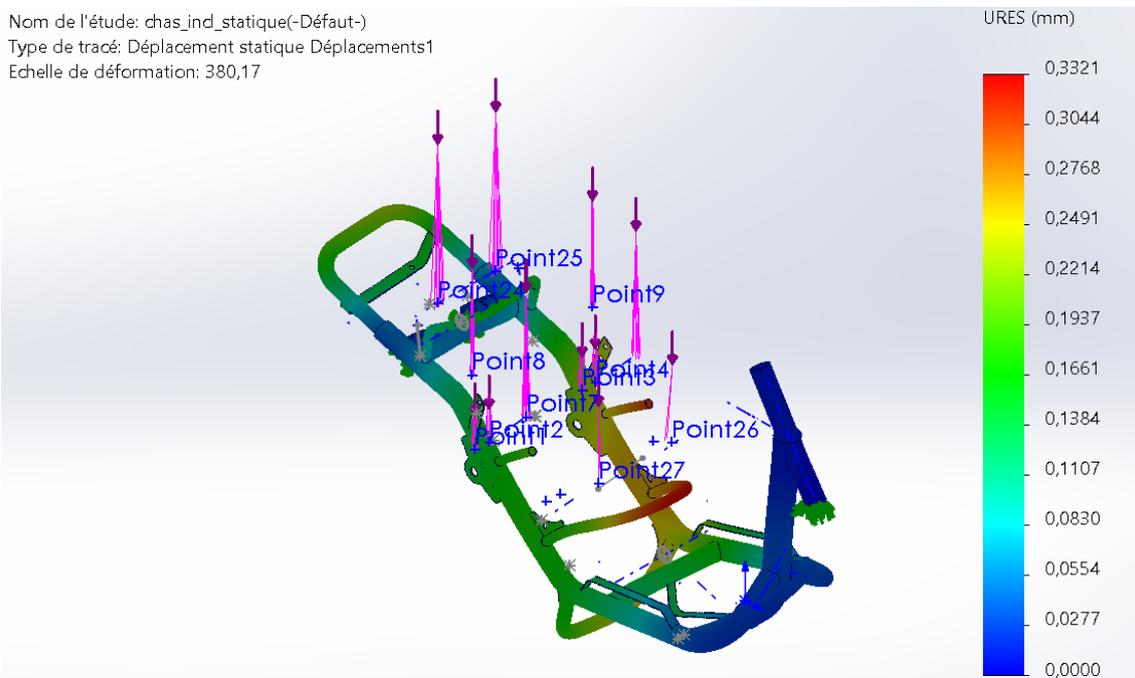


Figure 9. Déplacement global

### 2.2.4 Déformation globale

La figure 10 illustre la distribution des déformations dans le châssis, avec une valeur maximale très faible estimée à  $\varepsilon = 0.0005$ .

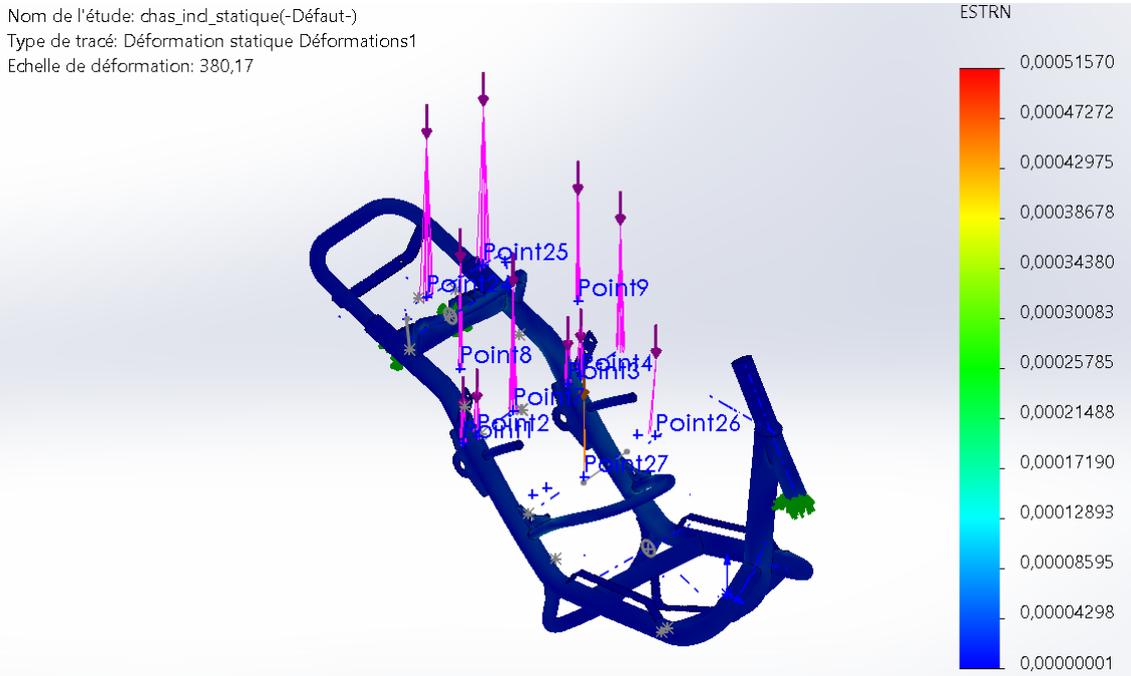


Figure 10. Déformation globale

### 2.2.5 Coefficient de sécurité

La figure 11 montre la distribution du coefficient de sécurité dans le châssis du scooter. La valeur minimale obtenue est de 1,6.

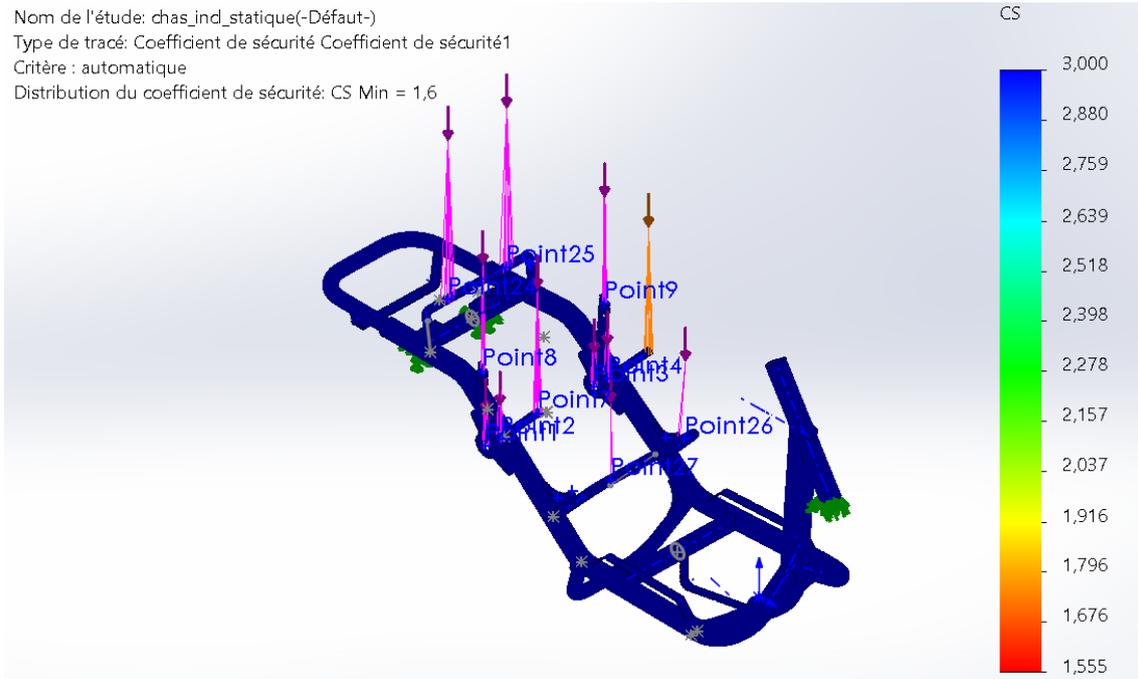


Figure 11. Coefficient de sécurité

### 2.3 Etude comparative des résultats de la simulation

Sur le tableau 1 nous présentons une étude comparative des paramètres de comportement mécanique obtenus par simulation numérique dans deux cas de conception de châssis large et incliné.

Tableau 1. Résultats de l'analyse statique pour les deux modèles de châssis

Modèles de châssis	Contraintes (MPa)	Déplacement (mm)	Déformation	Coefficient de sécurité
Châssis large	128.61	0.54	0.0004	1.7
Châssis incliné	141.83	0.33	0.0005	1.6

### 2.4 Conclusion

Il ressort de ces résultats que le châssis incliné présente une rigidité supérieure, un déplacement minimal, garantissant ainsi une meilleure résistance sous un chargement donné.

---

## 2.5 Analyse des résultats

### 2.5.1 Interprétation des résultats

Il ressort du tableau 1 que les valeurs des contraintes et des déformations augmentent pour le châssis incliné. Cette hausse s'explique principalement par la réduction de la surface (étendue) du châssis, ce qui entraîne une augmentation du rapport  $F/S$  en se référant à la formule de base de la contrainte normale. Cette augmentation de la contrainte  $\sigma$  engendre également une hausse de la déformation globale  $\varepsilon$ , conformément à la relation  $\varepsilon = \sigma/E$ .

Concernant le coefficient de sécurité et les déplacements globaux, on observe une légère diminution due à une amélioration de la rigidité du châssis. Le coefficient de sécurité peut être calculé par la relation  $C_s = \sigma_e/\sigma$  où  $\sigma_e$  est la contrainte du domaine élastique et  $\sigma$  la contrainte calculée dans le châssis. Ces valeurs restent acceptables et assurant un bon compromis entre sécurité et performance structurelle.

### 2.5.2 Avantage du châssis incliné

C'est pour cette raison que les conceptions modernes des scooters privilégient les châssis inclinés offrant plusieurs avantages notamment :

- **Amélioration de la maniabilité** : un châssis rétréci à l'arrière permet une meilleure maniabilité, en particulier dans les virages ; cette configuration réduit la résistance à l'air latéral et facilite les manœuvres, notamment en milieu urbain ;
- **Réduction du poids** : le rétrécissement du châssis à l'arrière contribue à l'allègement de la structure globale du véhicule. Cela se traduit par de meilleures performances en accélération, une consommation de carburant réduite pour les modèles thermiques ou une autonomie accrue pour les modèles électriques ;
- **Amélioration esthétique** : d'un point de vue stylistique, un châssis étroit à l'arrière confère au scooter une allure plus dynamique, moderne et sportive ;
- **Optimisation de l'intégration des composants** : Cette configuration facilite l'agencement des composants internes, comme le moteur, la transmission ou les systèmes d'échappement ;
- **Amélioration de l'aérodynamisme** : l'arrière affiné permet une meilleure circulation de l'air autour du véhicule, réduisant ainsi la traînée aérodynamique. Cela peut avoir un impact positif sur la vitesse de pointe et l'efficacité énergétique.

### 3. Etude modale

#### 3.1 Objectif de l'analyse modale

Cette étude vise à concevoir et à déterminer les fréquences naturelles et les formes modales du châssis du scooter. Les résultats de cette analyse sont essentiels pour comprendre la réponse dynamique de la structure du châssis libre et sous chargement. Les résultats obtenus sont importants et permettent d'optimiser le dessin et la conception du châssis afin d'éviter les phénomènes de résonance susceptibles d'affecter la sécurité ou les performances du châssis.

#### 3.2 Maillage de la structure

Un maillage volumique standard du châssis a été utilisé avec une taille d'élément de 3 mm, le nombre total d'éléments est de 886024 et le nombre de nœuds est de 1480635. La figure 12 montre le maillage généré du châssis.

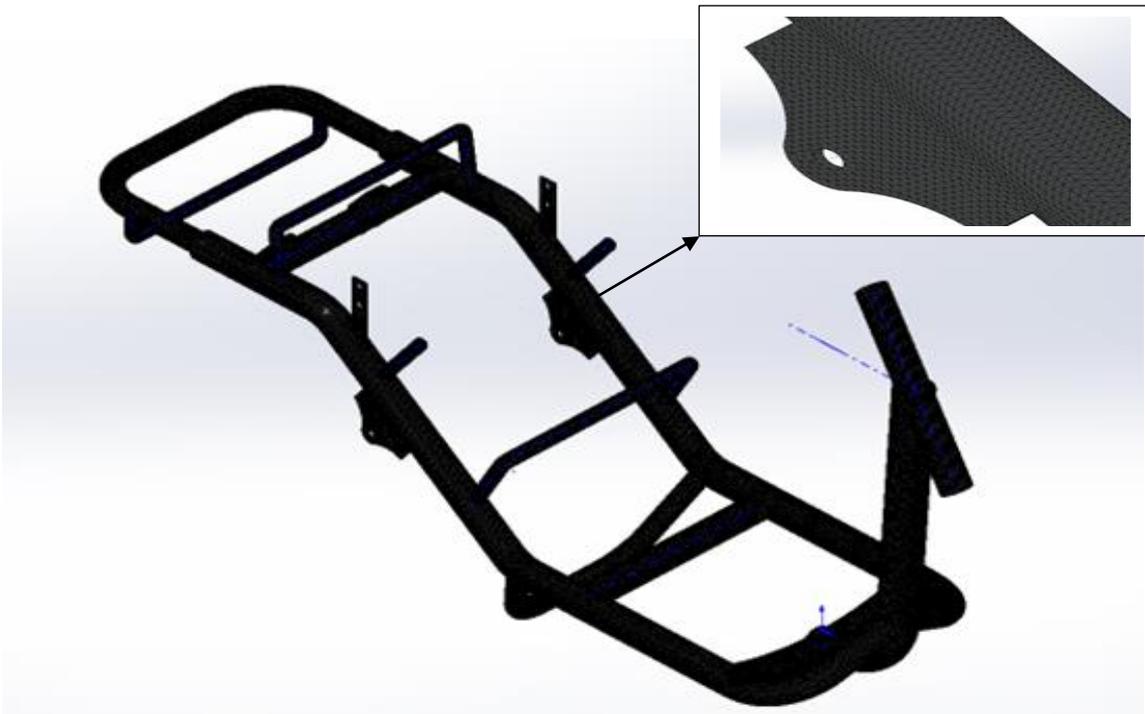


Figure 12. Châssis conçu et maillé

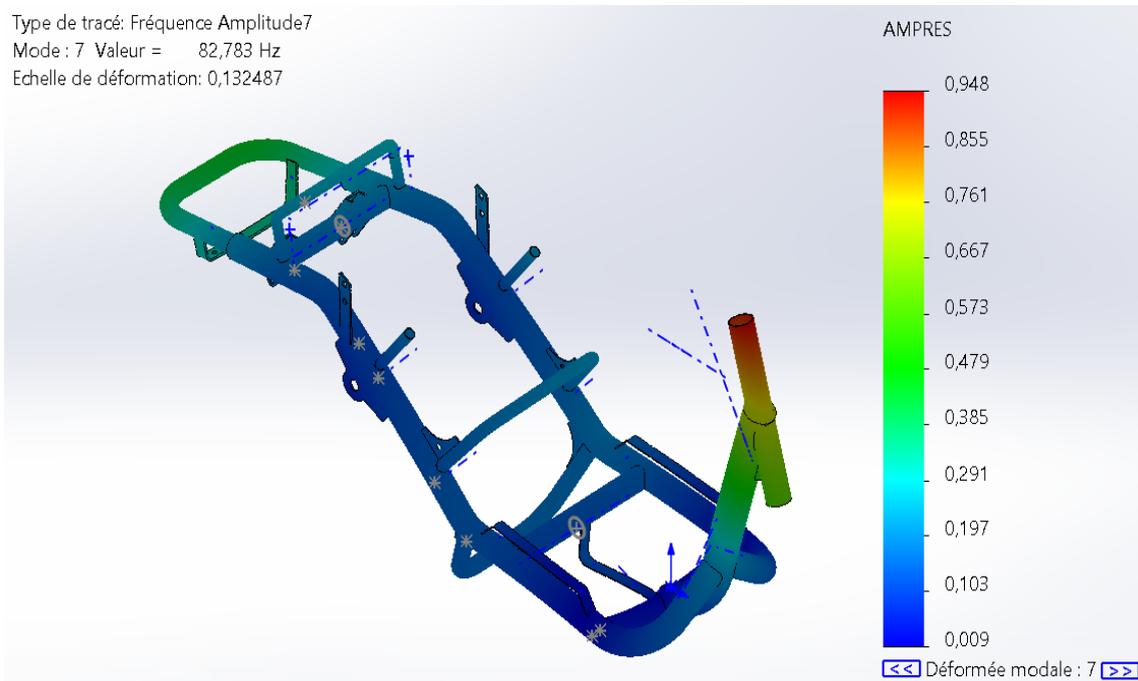
#### 3.3 Cas du châssis libre

La simulation est effectuée sur le châssis conçu, il est complètement libre, les résultats obtenus sont présentés sur les figures 13.

### 3.3.1 Fréquences et modes obtenus

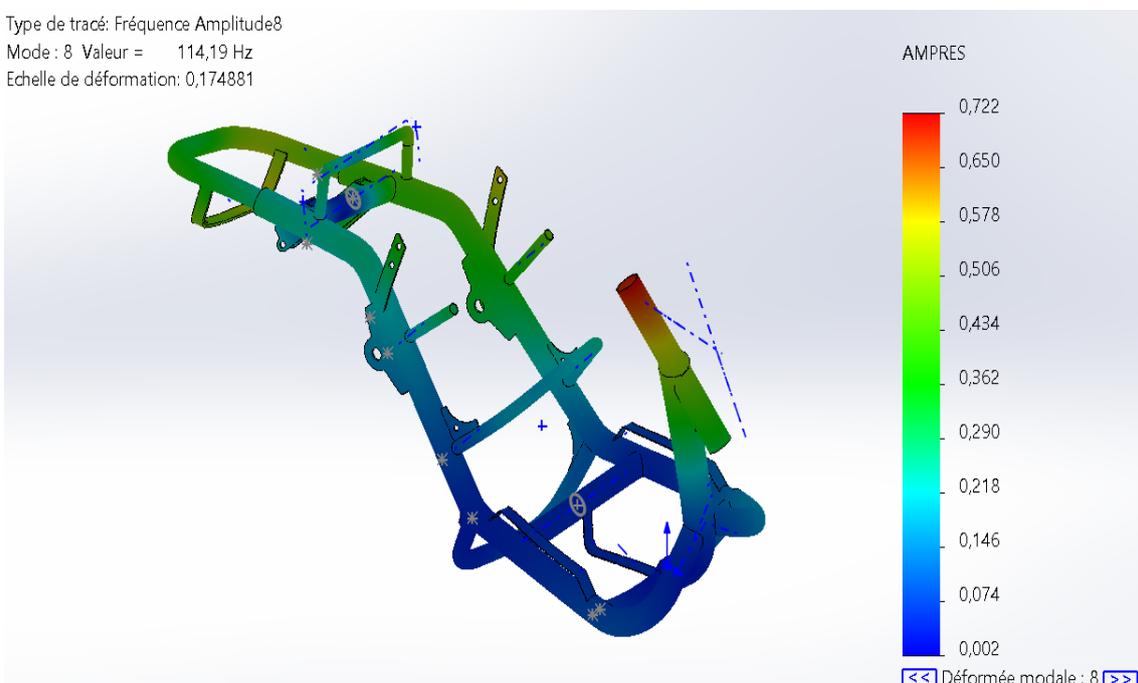
#### Amplitude 1, fréquence 1 = 82.783 Hz

Type de tracé: Fréquence Amplitude7  
 Mode : 7 Valeur = 82,783 Hz  
 Echelle de déformation: 0,132487



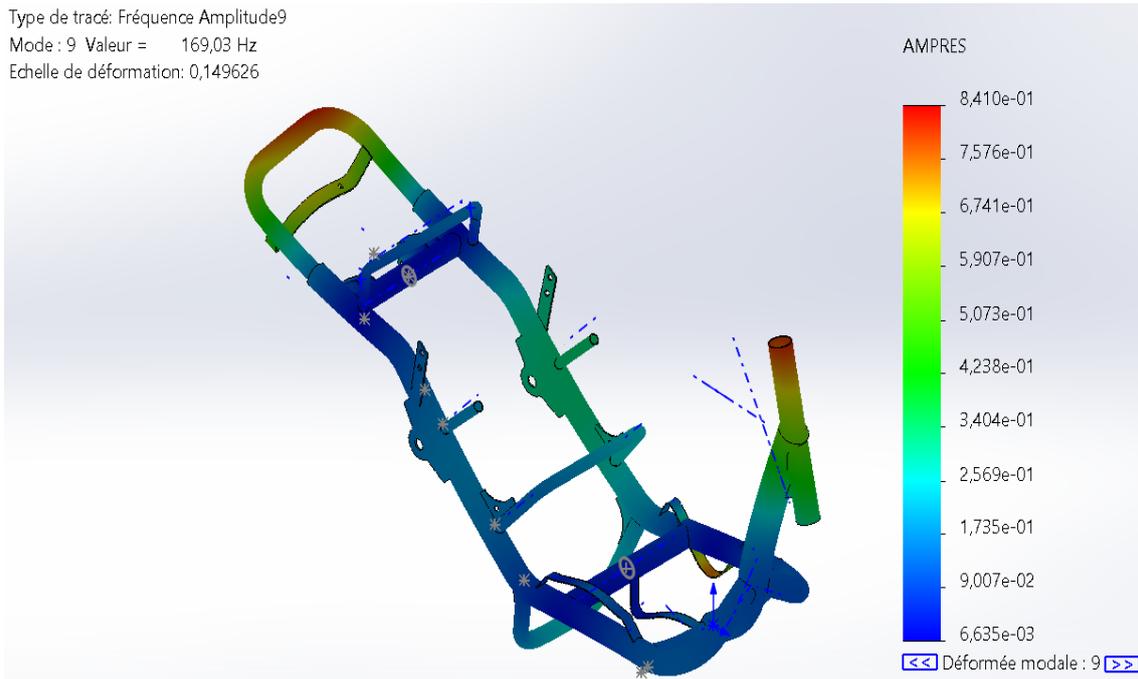
#### Amplitude 2, fréquence 2 = 114.19 Hz

Type de tracé: Fréquence Amplitude8  
 Mode : 8 Valeur = 114,19 Hz  
 Echelle de déformation: 0,174881



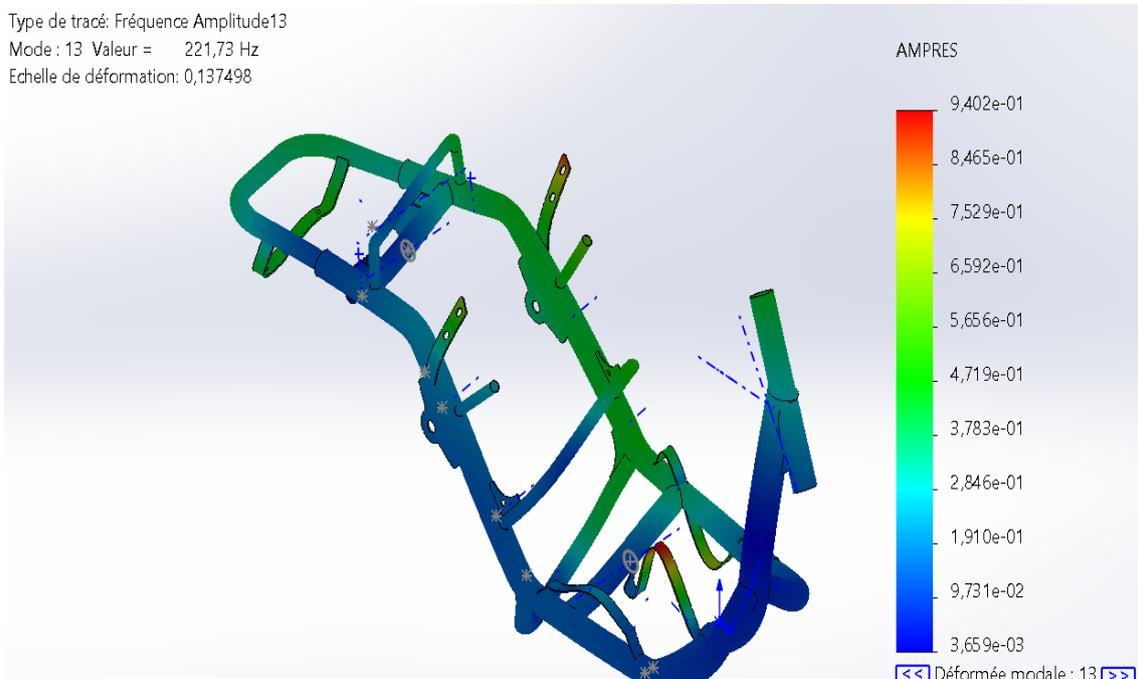
**Amplitude 3, fréquence 3 = 169.03 Hz**

Type de tracé: Fréquence Amplitude9  
 Mode : 9 Valeur = 169,03 Hz  
 Echelle de déformation: 0,149626



**Amplitude 4, fréquence 4 = 221.73 Hz**

Type de tracé: Fréquence Amplitude13  
 Mode : 13 Valeur = 221,73 Hz  
 Echelle de déformation: 0,137498



**Figure 13. Fréquences et déformations modales**

### 3.4 Cas du châssis appuyé\_appuyé

Sur la figure 14 nous présentons le châssis avec les conditions appuyé\_appuyé.

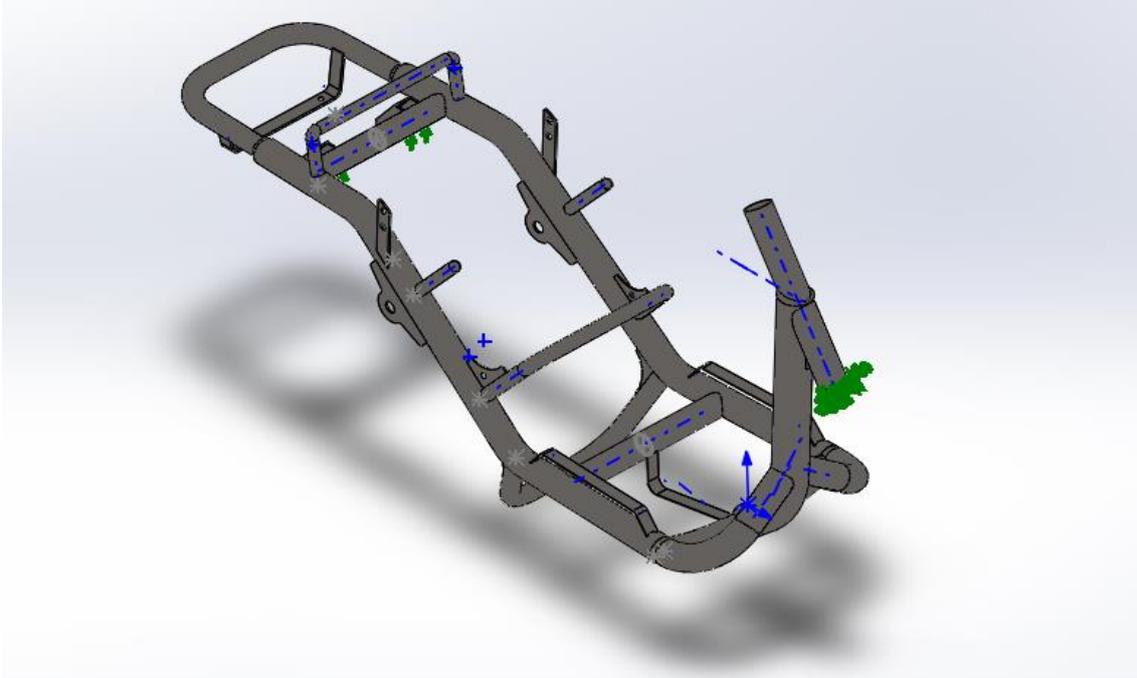


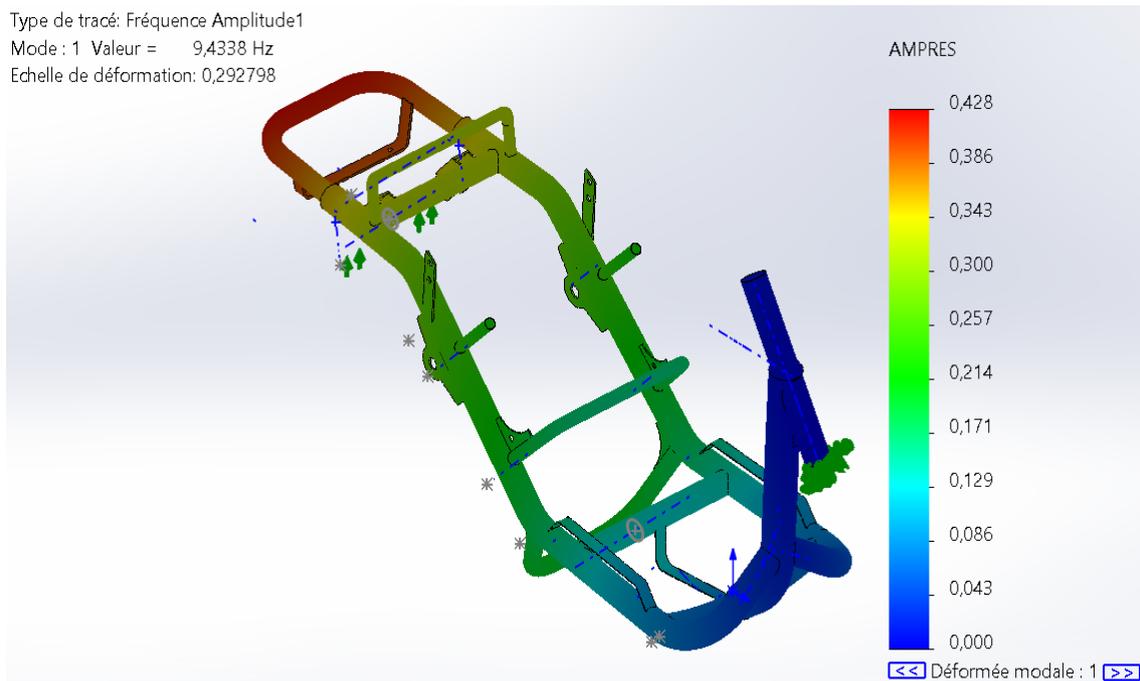
Figure 14. Châssis appuyé\_appuyé

#### 3.4.1 Fréquences et modes obtenus

La simulation du châssis est effectuée avec la condition appuyé\_appuyé, les résultats obtenus sont montrés par les figures 15.

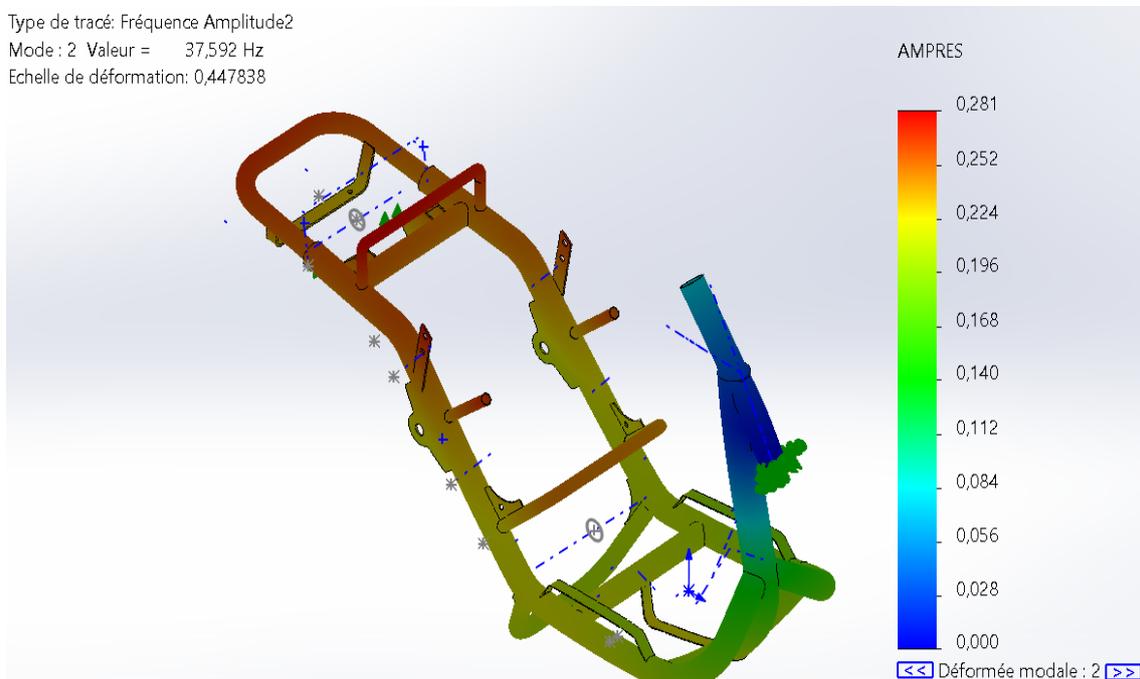
**Amplitude 1, fréquence = 9.4338 Hz**

Type de tracé: Fréquence Amplitude1  
 Mode : 1 Valeur = 9,4338 Hz  
 Echelle de déformation: 0,292798



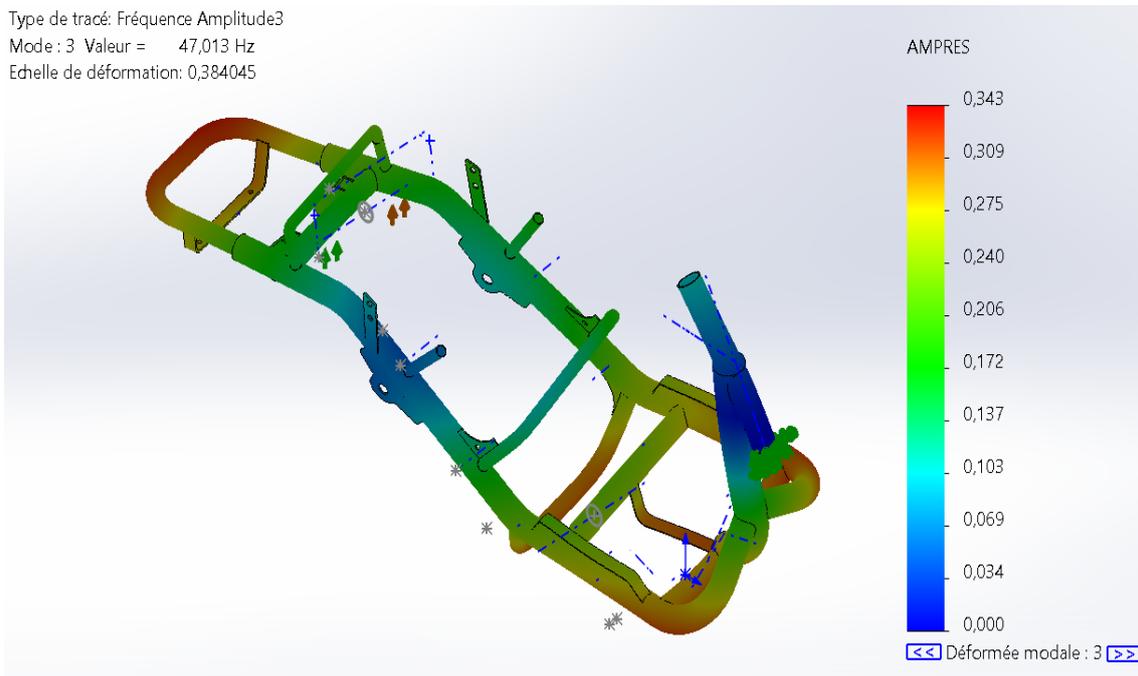
**Amplitude 2, fréquence = 37.592 Hz**

Type de tracé: Fréquence Amplitude2  
 Mode : 2 Valeur = 37,592 Hz  
 Echelle de déformation: 0,447838



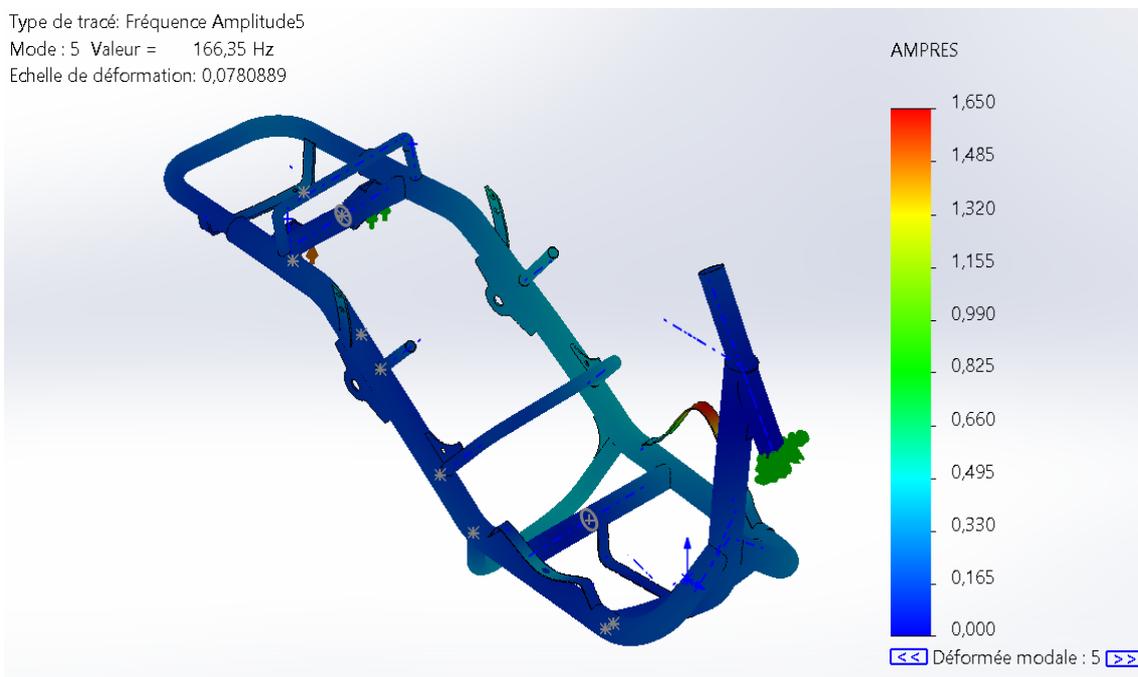
**Amplitude 3, fréquence = 47.013 Hz**

Type de tracé: Fréquence Amplitude3  
 Mode : 3 Valeur = 47,013 Hz  
 Echelle de déformation: 0,384045



**Amplitude 4, fréquence = 166.35 Hz**

Type de tracé: Fréquence Amplitude5  
 Mode : 5 Valeur = 166,35 Hz  
 Echelle de déformation: 0,0780889



**Figure 15. Fréquences et déformations modales**

### 3.5 Etude comparative des résultats simulation\_expérimentale

Sur le tableau 2 nous présentons une étude comparative des fréquences naturelles obtenues par simulation numérique en calcul de structures et celles mesurées expérimentalement.

**Tableau 2. Comparative des résultats simulation\_expérimentale**

Modes	Simulation Libre	Expérimentale Libre	Simulation appuyé_appuyé	Expérimentale appuyé_appuyé
1	83.07	84.3	9.43	8.65
2	114.38	109	37.59	40.02
3	169.03	151	47.01	48.9
4	221.73	227	166.35	163

### 3.6 Analyse et interprétation des résultats

L'étude modale réalisée avait pour but la détermination des fréquences et modes propres du châssis dans le cas de deux configurations de conditions aux limites libre et appuyé\_appuyé. Les résultats obtenus sont comparés à ceux de la littérature tableau 2. On déduit que pour le châssis libre les quatre premières fréquences issues de la simulation sont proches de celles expérimentales. Nous pensons que pour avoir des résultats convergeant simulation expérience, il faut concevoir et fabriquer un châssis avec seulement les pièces principales (sans pièces pour fixation d'habillage), puis procéder à la détermination des fréquences et modes propres expérimentales et simulées. Pour le châssis appuyé\_appuyé les quatre premières fréquences expérience-simulation sont similaires à première vue mais une étude approfondie est nécessaire pour dégager avec exactitude l'appartenance de ces fréquences au châssis, support ou aux éléments de fixation de l'habillage. Pour être sûr qu'aucune fréquence naturelle du châssis ne coïncide avec la fréquence de résonance du moteur nous avons calculé la fréquence du moteur au ralenti 1500 tours/minute, sa valeur est de 50Hz. Cette fréquence est différente de celles du châssis. Ce résultat nous permis de dire que les fréquences naturelles du châssis n'entrent pas en résonance avec celle du moteur tournant au ralenti.

Les fréquences obtenues sont principalement celles des modes flexion et torsion ces derniers sont plus présents.

# Conclusion générale

---

Ce travail nous a permis d'explorer la conception, la modélisation et l'analyse structurelle d'un châssis de scooter. Grâce à une démarche méthodique combinant ingénierie inverse, conception assistée par ordinateur et simulation par éléments finis, nous avons pu évaluer le comportement mécanique du châssis dans différents scénarios.

L'analyse statique a révélé que le châssis incliné offrait de meilleures performances en termes de rigidité et de déformation, avec un coefficient de sécurité satisfaisant.

L'étude modale a permis de déterminer les fréquences naturelles et les formes modales du châssis, et a confirmé l'absence de résonance lorsque le moteur tourne au ralenti.

La comparaison des résultats de simulation en termes de fréquences avec les mesures expérimentales antérieures a montré une concordance acceptable, validant ainsi la fiabilité du modèle utilisé. Les modes de fréquences obtenus sont principalement des modes de flexion et de torsion.

Ces résultats ouvrent la voie à des améliorations futures, notamment en matière d'optimisation des matériaux, d'aérodynamisme et d'intégration de nouvelles technologies.

En somme, ce mémoire apporte une contribution certaine à la compréhension du comportement statique et dynamique des châssis de scooters et propose une méthodologie applicable à d'autres structures mécaniques similaires.

### **Perspectives**

- Fabriquer un prototype de scooter à partir des pièces principales le composant ;
- Réaliser de nouveau des études expérimentales et de simulation sur le prototype avec les scénarios prédéfinis et comparer les résultats simulation-expérience ;
- Voir l'influence du matériau de construction et le type de maillage sur les résultats de l'étude ;
- Traiter l'influence des méthodes de conception sur les résultats de calcul.

# Références bibliographiques

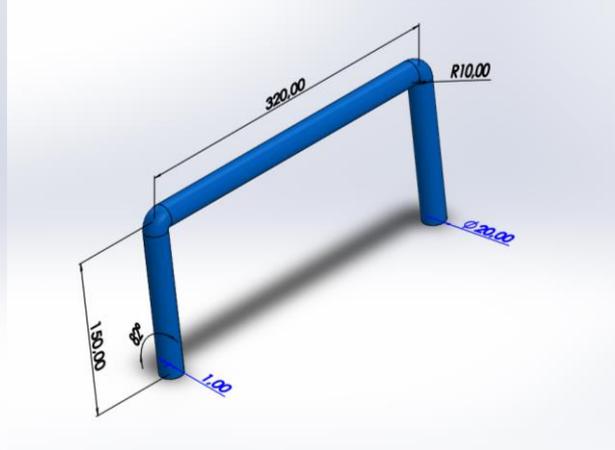
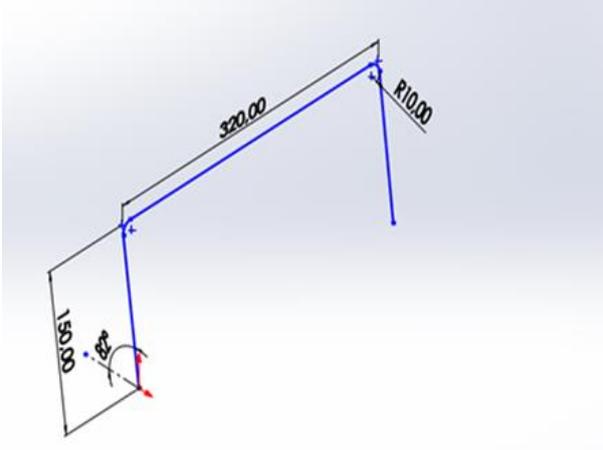
---

## Références bibliographiques

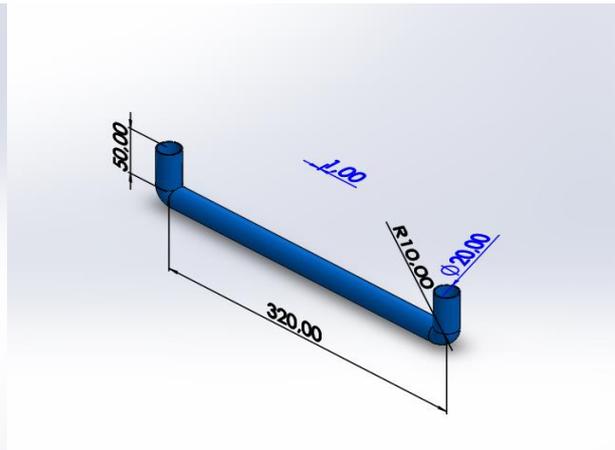
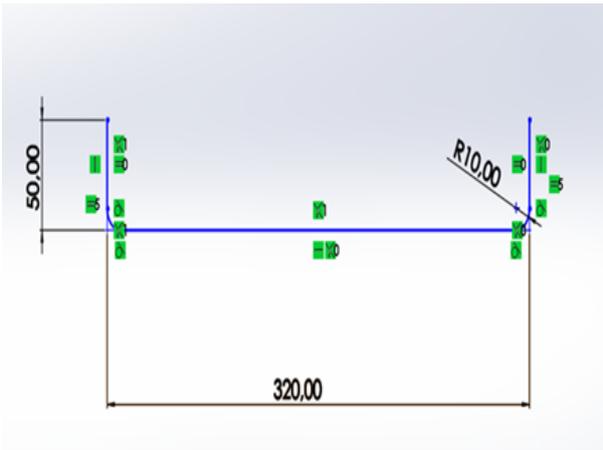
- [1] <https://www.toutsurlamoto.com/le-cadre-moto/>
- [2] [https://mecatech-kustom-parts.com/52287-large\\_default/cadres-kraft-tech-style-softail-double-berceau-droit.jpg](https://mecatech-kustom-parts.com/52287-large_default/cadres-kraft-tech-style-softail-double-berceau-droit.jpg)
- [3] <https://knaufautomotive.com/fr/ingenierie-inversee-comment-nous-lutilisons-pour-soutenir-nos-clients/>
- [4] <https://lombard-mougenot.com/s/Tubes/Carres>
- [5] <https://www.commentfer.fr/54-tube-acier-rectangulaire#:~:text=Le%20tube%20de%20fer%20rectangulaire,longueurs%20adapt%C3%A9es%20%C3%A0%20vos%20besoins.>
- [6] <https://www.zintilon.com/fr/blog/automotive-car-chassis/>
- [7] [https://fac.umc.edu.dz/fstech/cours/ST/Technologie%20de%20base\\_Mecibah.pdf](https://fac.umc.edu.dz/fstech/cours/ST/Technologie%20de%20base_Mecibah.pdf)
- [8] <https://fr.scribd.com/document/756537724/Conception-d-un-chassis-tubulaire-d-un-tricycle-moto>
- [9] <https://www.anses.fr/fr/system/files/VSR2017SA0237Ra-2.pdf>
- [10] Champoux Y, Richard S, Drouet JM. Dynamique structurelle des bicyclettes. Sound and Vibration. 2007 ; juillet :16–22.
- [11] Marzuki MA, Abd Halim MH, Naina Mohamed AR. Détermination des fréquences naturelles par analyse modale et harmonique d'un châssis de voiture de course à structure spatiale à l'aide d'ANSYS. American Journal of Engineering and Applied Sciences. 2015;8(4):538–548.
- [12] Paningipalli PS, Sayyad FB. Validation théorique et expérimentale du châssis de moto pour la réduction de poids. International Journal of Scientific & Technology Research. 2016 ;5(10) :4–10.

- 
- [13] Yu B, Sun L, Bian Y, Si S, Yu W. Analyse modale par éléments finis du châssis de course FSC. *Advances in Computer Science Research*. 2017 ;62 :161–165.
- [14] Mohankumar D, Sabarish R, PremJeyaKumar M. Analyse structurelle et modale du cadre de scooter. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*. 2018 ;118(Suppl. 18) :935–943.
- [15] Hafeez M, Bhat VV, Ajay V, Kumar SKHV. Analyse modale opérationnelle d'un châssis de bicyclette. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*. 2020 ;6(4) :520–523.
- [16] Setyanto D, Soewono AD, Wibowo A, Liong RT. Conception d'un cadre de moto dans une entreprise automobile en Indonésie. *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)*. 2020;13(4):738–743.
- [17] Kadam KS, Sambhar NS, Bora NM, Bhakare SR, Gaikwad SW. Conception et analyse du cadre de châssis d'un e-scooter. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2020;7(6):7138–7146.
- [18] Konada NK, Suman KNS. Analyse du cadre de châssis d'un deux-roues électrique soumis à des charges statiques et d'impact. *Journal of Mechanical and Energy Engineering*. 2020;4(1):15–26.
- [19] [https://www.math.univtoulouse.fr/~abendali/gmm4\\_EF\\_bendali.pdf](https://www.math.univtoulouse.fr/~abendali/gmm4_EF_bendali.pdf)
- [20] Hafallah MEH, Abbes A. Détermination des fréquences et des amortissements modaux des structures mécaniques. Mémoire de fin d'études, Université 8 Mai 1945 – Guelma, Département de Génie Mécanique, spécialité Maintenance Industrielle. 2022.
- [21] Ouelaa N, Djemaa MC, Fatmi L, Bzazi A, Younese R, Kharoubi M, Boudjahem A, Khahlaras H, Bakaria R, Bentradi H. Rapport interne : Équipe mixte CYCMA/Chine. Laboratoire de mécanique et structures, Université de Guelma. Juin 2022.

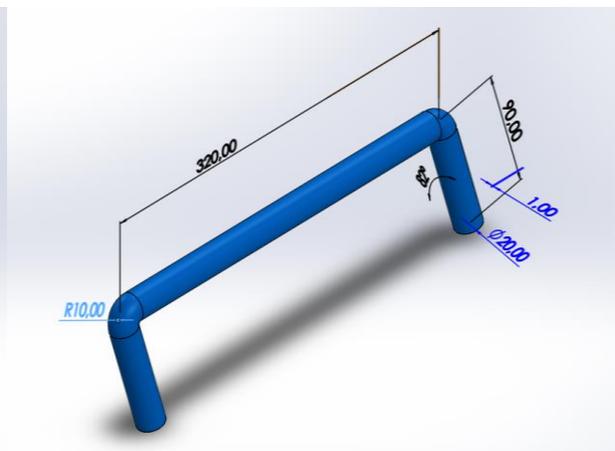
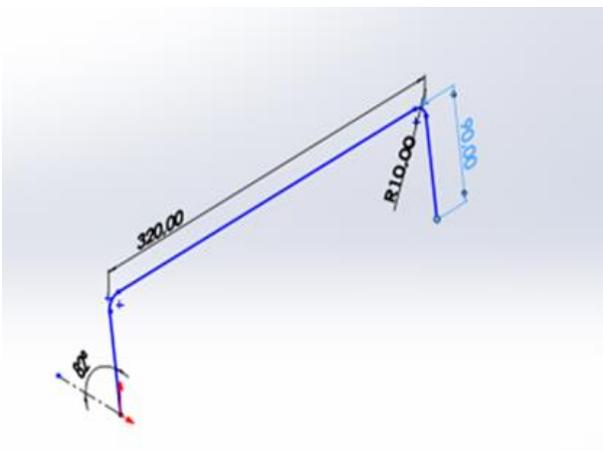
# Annexe



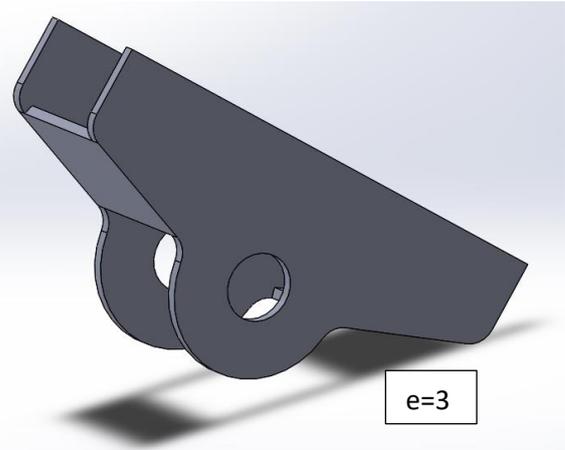
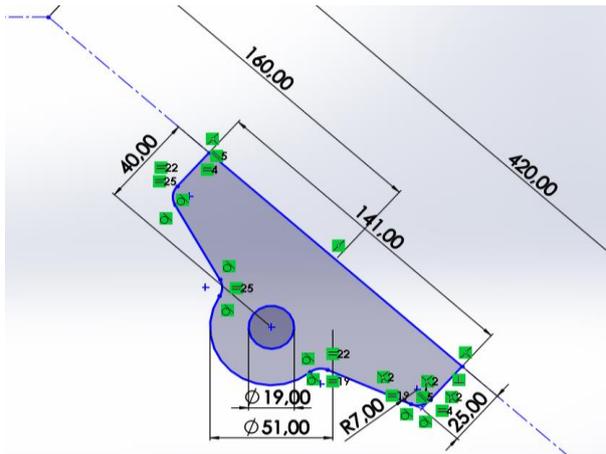
Support de fixation de la selle



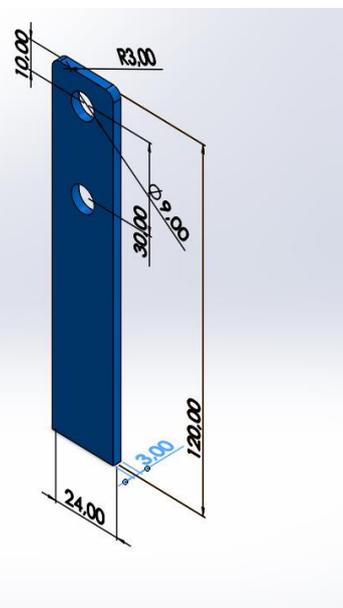
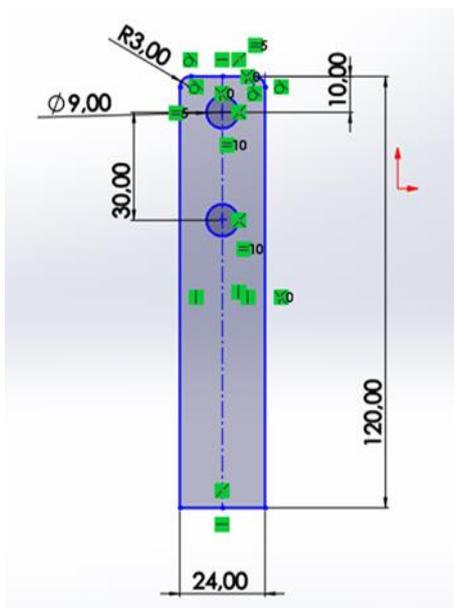
Support de fixation de la jupe arrière



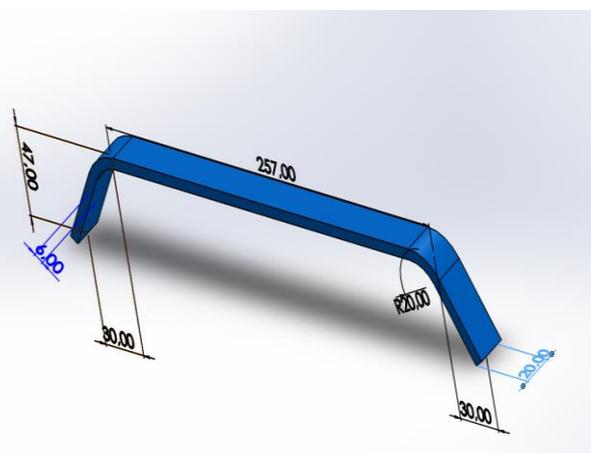
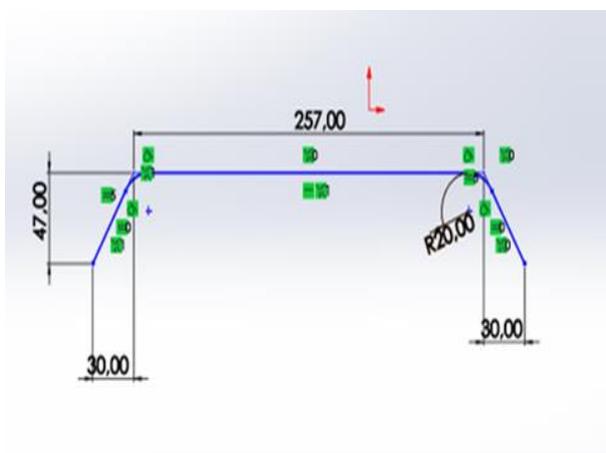
Support de fixation de la mallette



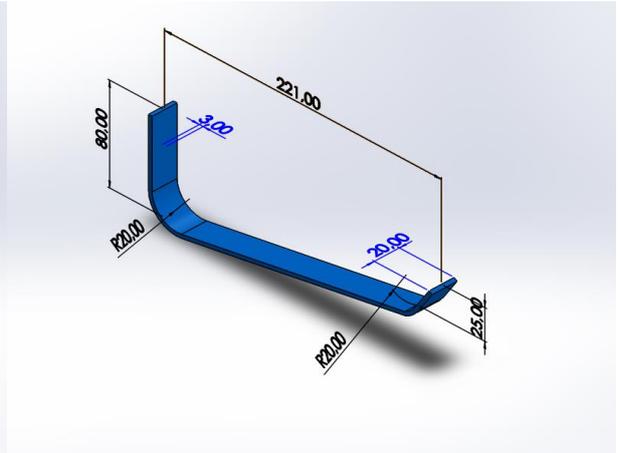
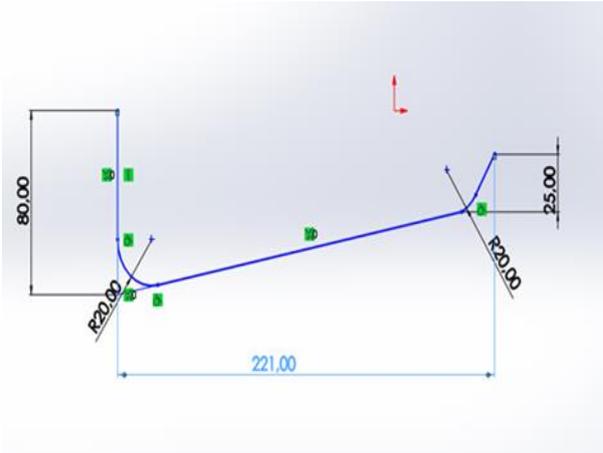
**Boitier de fixation du support moteur**



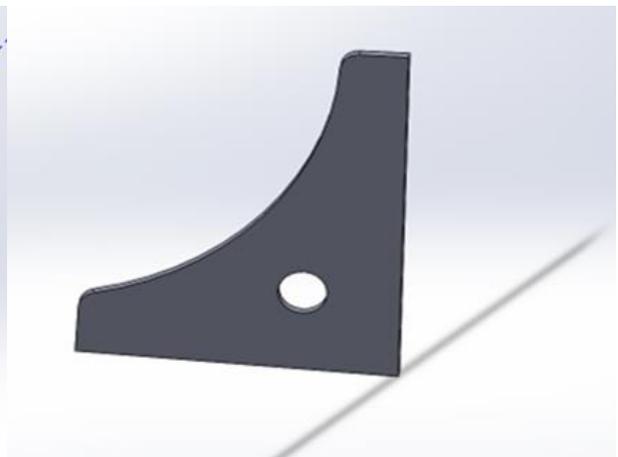
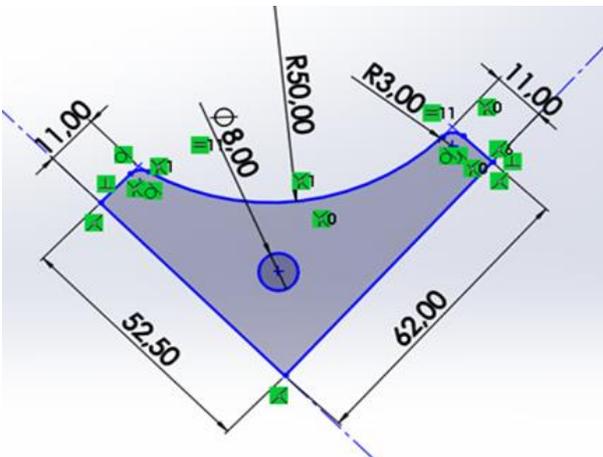
**Raccord de fixation du support de la selle**



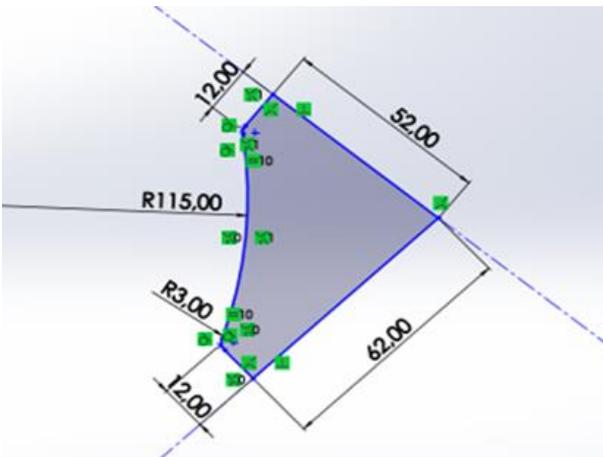
**Support du carénage repose-pieds**



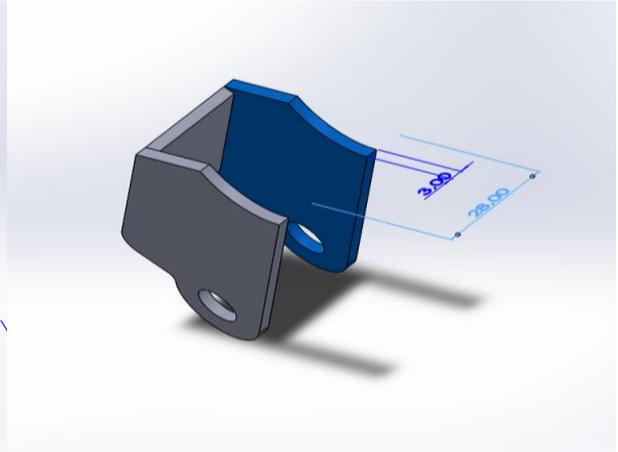
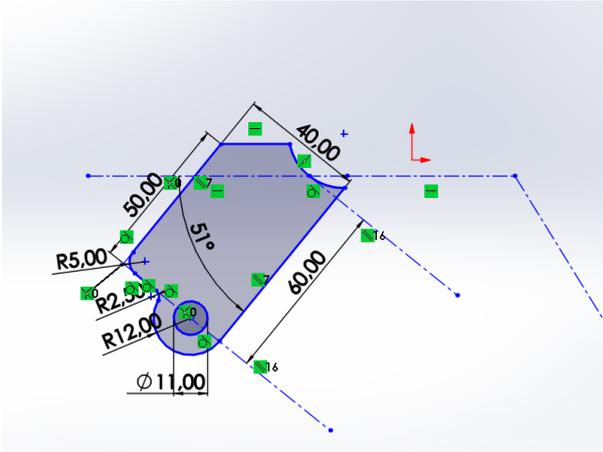
Support du plancher



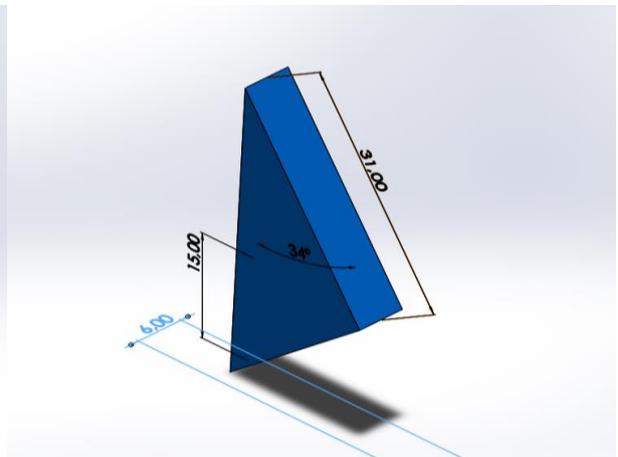
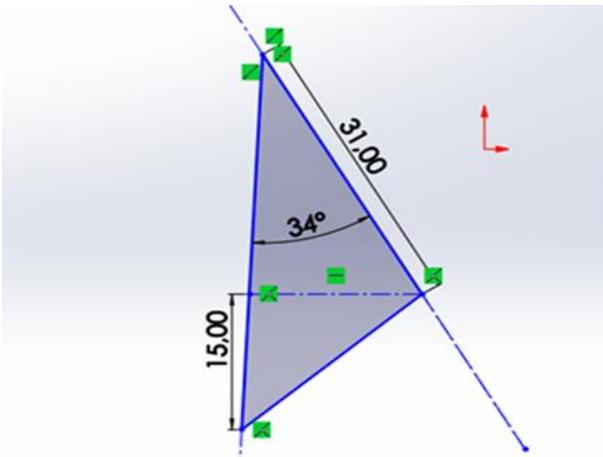
Renfort



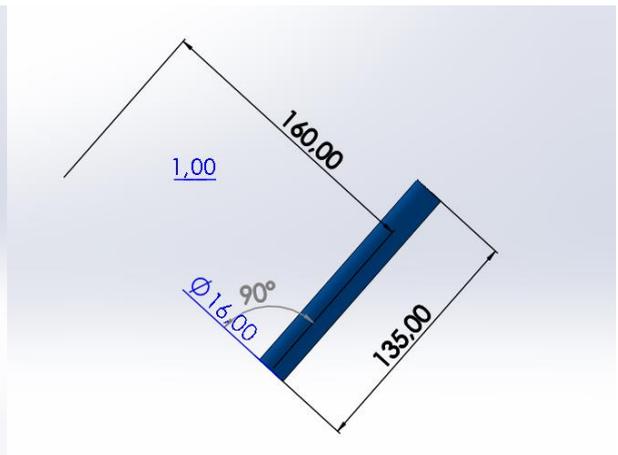
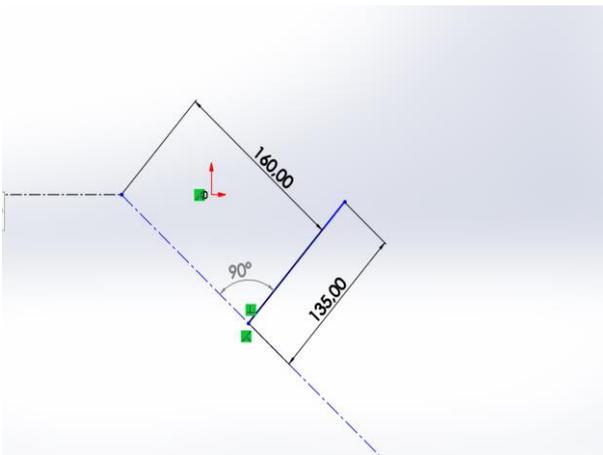
Renfort du support béquille centrale



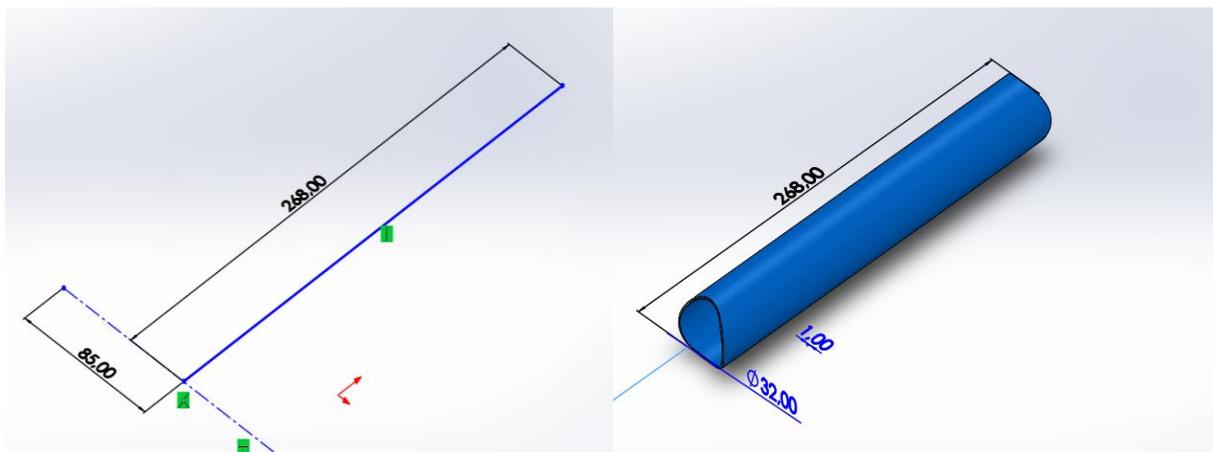
**Patte de fixation des amortisseurs**



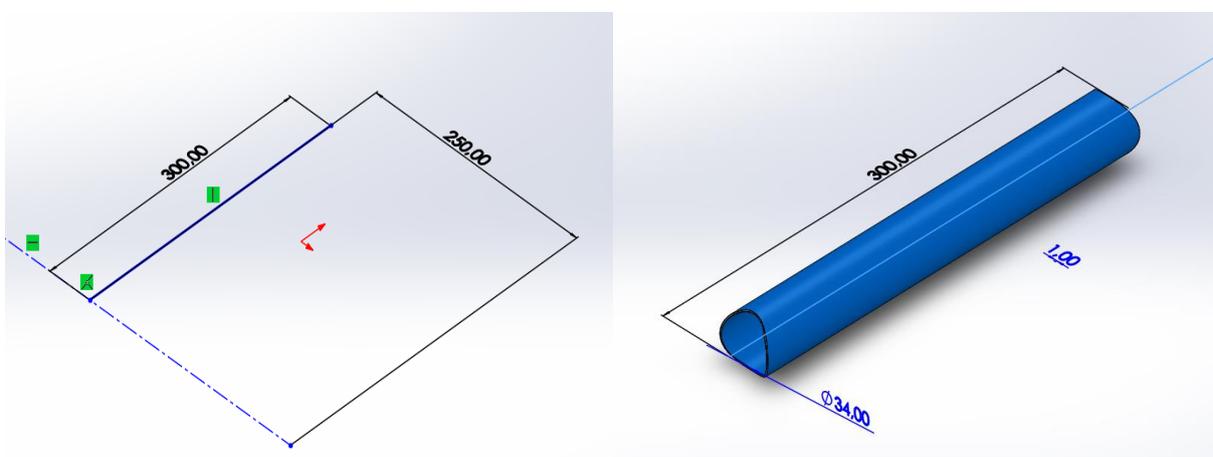
**Renfort de tube avant**



**Support inferieur de fixation du réservoir**



**Tube arrière de renfort**



**Tube inferieur central de renfort**