

# Mémoire de Projet de Fin d'Études

Présenté en vue de l'obtention du titre

D'Ingénieur d'État

Spécialité : Génie Mécanique

\* \* ADDALAL Yassine \* \*

Titre :

## Conception et Réalisation d'un WAREHOUSE ROBOT



Société d'Accueil : NEXTRONIC



Soutenu le : 15/07/2020 devant le jury composé de :

- TAHIR Youssef : Professeur à l'ENSA de Casablanca
- ABOUCH Yassine: Fondateur et CEO de NEXTRONIC
- ELHAOUZI Ahmed: Professeur à l'ENSA de Casablanca
- AKHIATE Aziz : Professeur à l'ENSA de Casablanca

Président  
Parrain de stage  
Examinateur  
Encadrant

## Déclaration d'Auteur

Je déclare que ce Projet de fin d'étude intitulé "La Conception et la Réalisation d'un Warehouse Robot" et le travail qui y est présenté m'appartiennent. également je confirme que :

- Ce travail a été réalisé entièrement ou principalement dans le cadre de mon projet de fin d'étude dans cette école.
- Lorsqu'une partie de ce projet a déjà été soumise pour des autres candidats dans l'école ou tout autre établissement, cela a été clairement indiqué.
- Lorsque j'ai consulté les travaux publiés par d'autres, cela est toujours clairement attribué..
- Là où j'ai cité les travaux des autres, la source est toujours indiquée. À l'exception de telles citations, ce projet est entièrement mon propre travail.
- J'ai cité toutes les principales sources d'aide..
- Lorsque le projet est basé sur un travail effectué par moi-même conjointement avec d'autres, j'ai clairement expliqué ce qui a été fait par d'autres et ce que j'ai apporté moi-même..

Signature :

Date :

*« Et ma réussite ne dépend que d'Allah. En Lui je place ma confiance, et c'est vers Lui que je reviens repentant. . »*

**Quran surah Hud [11 :88]**

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARTS ET MÉTIER UNIVERSITÉ HASSAN  
II CASABLANCA

*Résumé*

Département Génie Mécanique  
Conception des Produits Nouveaux

Cycle d'Ingénieur

**La Conception et la Réalisation d'un Robot Magasinier**

Par ADDALAL YASSINE

Le présent rapport vient conclure le stage de fin d'études effectué au sein de l'entreprise **NEXTRONIC**, pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Mécanique, délivré par l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Casablanca ENSAMC.

L'entreprise cherche constamment différentes façons de moderniser le transport des matières et de la matière première dans l'unité de production. Une des solutions envisagées est de concevoir un robot magasinier "**Warehouse Robot**". C'est une opportunité pour couronner ce que nous avons appris tout au long de notre formation, en plusieurs matières étudiées. Le document comporte en grosso modo deux parties, la première consiste à aborder l'étude théorique : la modélisation, calculs. et la deuxième partie est dédiée au prototypage et la fabrication de la machine. Sans oublier les autres parties : d'électronique et la programmation du robot et des systèmes relatifs qui sont chargés aux membres du groupe de travail.

**Mots clés : – NEXTRONIC, Unité de production ,Warehouse robot,Modélisation, Prototypage , Programmation**

## *Abstract*

This report concludes the final internship Project which is carried out within NEXTRONIC company to obtain the Engineering Degree in Mechanical Engineering, awarded by the National School of Arts and Crafts, Casablanca (Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Casablanca ENSAMC) .

The NEXTRONIC company managers are constantly looking for different ways to modernize the transport of equipments and raw materials in the production unit. One solution is to design a warehouse robot. It is an opportunity to complete what we have learned throughout our training, in several subjects studied. The document consists of two subsidiaries, the first of which is to address the theoretical study : modelling, calculations ...etc and the second part is dedicated to the prototyping and manufacturing the machine. Not forgetting the other parts : electronics and programming of the robot and related systems that are charged to the other members of the group.

**Keywords :** – NEXTRONIC, Production unit ,Warehouse robot,Prototyping , Programmating

## ملخص

يختتم هذا التقرير مشروع التخرج المنجز في شركة نيكسترونبيك، لنيل شهادة مهندس دولة في الهندسة الميكانيكية الممنوحة من طرف المدرسة العليا للفنون و المهن الدار البيضاء .  
لجأت الشركة مؤخرا لفكرة تحديث عملية نقل المعدات والمواد الأولية ضمن وحدات الإنتاج المختلفة . و من بين الحلول التي وقع الإختيار عليها كانت تصميم روبوت نقل آلي . وهذا المشروع يعتبر فرصة لبلورة كل ما درّس خلال فترة التكوين . وبالمجمل هذا التقرير يحمل في طياته شقين أساسيين ، الأول يتضمن التمثيل الهندسي ، الدراسة النظرية ثم الحسابات . و أما الثاني يتضمن المحاكاة، النماذجة و نبذة عن بعض مراحل التصنيع المعتمدة. بدون إغفال الجوانب الأخرى ذات الصلة كالإلكترونيات و برمجة الروبوت المزمع إنجازها من قبل المختصين في فريق العمل .

**كلمات رئيسية:** نيكسترونبيك ، وحدات الإنتاج ، روبوت النقل ، التمثيل الهندسي ، النماذجة ، البرمجة

## *Remerciements*

Après nos louanges à Dieu et avant tout développement sur cette expérience professionnelle, il apparaît opportun de commencer ce rapport de stage par des remerciements, à ceux qui m'ont beaucoup appris au cours de ce stage, et même à ceux qui ont eu la gentillesse de faire de ce stage un moment très profitable.

Nous voulons exprimer notre sincère gratitude envers les cadres administratifs et le corps professoral de l'**ENSAM CASABLANCA**, pour la qualité de la formation dispensée ainsi que pour toutes les facilités qu'ils mettent à la disposition des étudiants afin de leurs garantir une bonne carrière d'ingénieur.

Nous tenons aussi à exprimer notre grande considération à mon encadrant académique Monsieur **AKHIATE Aziz**, qui a su m'encadrer pendant ce stage avec perspicacité, dévouement, altruisme et votre énorme bienveillance. Je vous remercie pour tous les conseils indispensables à la fois scientifiques et personnels que vous m'aviez accordés, pour le temps que vous avez consacré pour trouver des solutions aux problèmes que j'ai pu rencontrer pendant ma période de recherche et de calcul et pour vos explications claires et formatrices.

Ainsi au terme de ce rapport, je tiens à remercier chaleureusement mon parrain Industriel Monsieur **ABOUCH Yassine**, pour leurs conseils, leur confiance pendant cette aventure et l'intérêt particulier qu'ils ont porté à notre travail malgré leurs préoccupations. Aussi, mes leur remercions profondément pour toutes leurs remarques, critiques et suggestions qui ont largement contribué à l'aboutissement de ce travail.

Mes sincères remerciements à M. **TAHIR Youssef** pour avoir présidé le jury et également à mon cher professeur M. **ELHAOUZI Ahmed** pour avoir accepté de juger et examiner ce modeste travail.

Cette expérience s'est donc avérée être une expérience enrichissante tant sur le plan humain que sur le plan de l'apprentissage du métier d'ingénieur consultant.

**A mes très chers parents Mme BENOTHMAN Khadouj et M.  
ADDALAL ABDELKARIM**

*Aucun mot, aussi signifiant soit-il, ne saurait exprimer le degré d'amour, d'affection, de respect et de reconnaissance que j'éprouve pour vous.*

*Votre présence à mes côtés m'a toujours apporté la confiance et le réconfort.*

*Que Dieu vous procure une longue vie, avec bonheur et santé et vous protège afin que vous demeuriez le soleil qui illumine ma vie.*

*Merci mes parents de faire l'impossible pour moi.*

**À ma chère soeur Sanae**

*Je vous souhaite des rêves à n'en plus finir et l'envie furieuse d'en réaliser, vous avez toujours été pour moi une aide très précieuse. Je vous dédie ce travail en témoignages de ma grande affection.*

**A toute ma famille**

*Mon idole dans la vie, vous avez su m'orienter et me soutenir dans tous mes choix. Vous êtes ce que j'ai de plus cher au monde et je vous jure qu'aucun mot, ni expression ne saurait exprimer tout mon amour et toute ma gratitude.*

**A tous mes amis**

*Je vous aime tous très fort et je vous remercie pour tout ce que vous avez fait pour moi et mes camarades de la classe qui représentent pour moi ma deuxième famille.*

**A tous ceux qui ont confiance en moi.**

*Que tout le monde retrouve à travers ces quelques lignes, mes sincères profondes sentiments*

# Table des matières

<b>Déclaration d'Auteur</b>	<b>iii</b>
<b>Résumé</b>	<b>v</b>
<b>Remerciements</b>	<b>vii</b>
<b>Chapitre I Présentation du Champ de Travail</b>	<b>1</b>
I.1 Présentation d'Organisme d'Accueil . . . . .	2
I.2 Domaines d'Activités . . . . .	2
I.2.1 Electroniques Embarqués . . . . .	3
I.2.2 Systèmes Embarqués . . . . .	3
I.2.3 Objets Connectés . . . . .	3
I.3 Références et Partenaires de la Société . . . . .	4
I.4 Structures et Hiérarchie de NEXTRONIC . . . . .	5
<b>Chapitre II Mise en Sujet</b>	<b>9</b>
II.1 Cahier des Charges . . . . .	10
Remarque . . . . .	10
II.2 Les Ressources . . . . .	10
II.3 Contraintes Réalistes . . . . .	10
Fonctionnelle . . . . .	10
Sécurité . . . . .	11
Fabrication . . . . .	11
Timing . . . . .	11
Ergonomique . . . . .	11
II.4 Analyse de Besoin Réduite . . . . .	11
II.4.1 Elaboration de " Metric Target Specification Table " . . . . .	11
II.4.2 Scoring Matrix . . . . .	11
II.5 Étude et Recherche Bibliographique . . . . .	13
II.5.1 L'identification des Taches "Tasks identification" . . . . .	13
Nota : . . . . .	13
II.6 Planning du Projet . . . . .	13
II.6.1 Estimation du temps nécessaire du projet . . . . .	13
1-Function diagramme : . . . . .	15
2-Calcul du Coefficient PC "Product Complexity" . . . . .	15
II.6.2 Plan du projet selon la méthode de GANTT . . . . .	16
II.7 Conclusion . . . . .	16
<b>Chapitre III Le choix Conceptuel du Robot</b>	<b>17</b>
III.1 Le Concept Générique du Châssis . . . . .	18
III.1.1 Les Configurations Basiques des Roues des Robots . . . . .	18
III.1.2 Plus de Détails sur le Concept Choisi . . . . .	19
Définition . . . . .	19
III.2 La Sélection des Roues du Robot . . . . .	20
III.2.1 Dimensions des roues . . . . .	20
Pour Les deux Roues Différentiels : . . . . .	20
La troisième roulette : . . . . .	20
III.3 Premier Croquis Conceptuel et Dimensions Initiale . . . . .	21

III.4 Le Centre de Gravité . . . . .	22
III.4.1 Représentation des chargements . . . . .	22
III.4.2 Détermination de la Position Longitudinal et Transversal du Centre de Gravité par le Principe Fondamental de la Statique PFS . . . . .	23
III.5 Les Sollicitations Principales : . . . . .	24
III.5.1 La Flexion . . . . .	24
III.5.2 La Torsion. . . . .	25
III.5.3 La sollicitation Combinée Flexion + Torsion. . . . .	26
III.5.4 Le chargement Latérale. . . . .	26
III.5.5 Le chargement Longitudinal . . . . .	28
III.5.6 Le Chargement Asymétrique. . . . .	29
III.6 Les Conditions Résistance : Contraintes admissibles les Cas de Charges	31
III.7 Sélection du Châssis . . . . .	31
III.7.1 La Rigidité Torsionnelle . . . . .	31
III.7.2 Typologie des Châssis . . . . .	34
Châssis Ladder ou Châssis en H / en échelle: . . . . .	34
Châssis cruciforme . . . . .	35
Châssis avec tube de torsion . . . . .	36
Châssis tubulaire . . . . .	36
Châssis intégral ou monocoque . . . . .	37
III.7.3 Le Châssis Choisi . . . . .	37
III.8 Le Modèle 3D du Châssis Choisi . . . . .	38
III.8.1 Le Dimensionnement du châssis . . . . .	38
La condition de résistance de la flexion : . . . . .	39
<b>Chapitre IV Etude Cinématique du Robot</b>	<b>41</b>
IV.1 Terminologie et Définition : . . . . .	42
IV.1.1 Le Centre Instantané de Rotation CIR . . . . .	42
Définition . . . . .	42
Propriété importante . . . . .	42
IV.2 Cinématique Inverse et Directe . . . . .	42
Définition . . . . .	42
IV.2.1 Le Jacobien . . . . .	43
Définition . . . . .	43
IV.3 Modélisation Mathématique . . . . .	44
IV.3.1 La géométrie et la cinématique du robot . . . . .	44
Hypothèses : . . . . .	44
Remarque . . . . .	44
IV.3.2 Le principe de guidage du robot . . . . .	45
IV.3.3 Rayon de rotation et distance de déplacement en fonction de l'emplacement des points des postions souhaitées "Target points" . . . . .	47
Détermination du rayon de rotation . . . . .	47
Distance de la courbure du mouvement . . . . .	47
Contrôle de la vitesse et l'accélération du robot . . . . .	48
Limitations cinématique du robot . . . . .	48
IV.4 Schéma cinématique du robot . . . . .	48
<b>Chapitre V Etude Dynamique et Statique du Robot</b>	<b>51</b>
V.1 Calcul de la Puissance . . . . .	52
V.1.1 Détermination du poids total et les exigences de traction . . . . .	52
V.1.2 Calculer la fréquence de rotation des roues de traction . . . . .	53
V.1.3 Calculer la puissance/le couple du moteur de traction . . . . .	53

V.1.4	Conclusion . . . . .	54
V.2	Méthodologie de l'étude Dynamique . . . . .	55
V.3	Développement du Modèle Dynamique . . . . .	56
	Roulis . . . . .	56
	Tangage . . . . .	56
	Lacet . . . . .	57
V.3.1	Modèle dynamique du châssis . . . . .	57
V.3.2	Modèle à deux dimensions simplifié . . . . .	58
	Équations de mouvement du nouveau système : . . . . .	58
	Remarques : . . . . .	60
V.3.3	Modèle à deux dimensions . . . . .	62
	Remarque : . . . . .	63
	Équation du mouvement . . . . .	63
	A-Équations du mouvement de l'ensemble roue 1 . . . . .	63
	B-Équations du mouvement de l'ensemble roue 2 . . . . .	64
	C-Équations du mouvement de la masse 3 . . . . .	65
	Mouvements de translation . . . . .	65
	Mouvements de Rotation . . . . .	66
V.3.4	Modèle à trois dimensions . . . . .	68
	A-Équation de mouvement de l'ensemble roue 1 . . . . .	69
	B-Équation du mouvement de la roue 2 . . . . .	70
	C-Équation du mouvement de la roue 3 . . . . .	70
	D-Équation de mouvement du châssis (masse 4) . . . . .	71
	Mouvement de translation . . . . .	71
	Équation du mouvement en translation du châssis . . . . .	72
	Mouvement de tangage . . . . .	72
	Équation de mouvement en tangage du châssis . . . . .	72
	Mouvement de roulis . . . . .	73
	Équation de mouvement en roulis du châssis . . . . .	73
V.3.5	Conclusion . . . . .	75
V.4	Étude Des Modes Vibratoires et Analyse Des Contraintes Pour Un Châssis 1-D . . . . .	75
V.4.1	Modélisation du châssis du robot . . . . .	75
V.4.2	Calcul analytique des modes vibratoires . . . . .	76
	Méthode de Bernoulli-Euler . . . . .	76
	Méthode de Timoshenko . . . . .	79
V.4.3	Calcul numérique des modes vibratoires . . . . .	84
	Modes flexion . . . . .	84
	Modes torsion . . . . .	85
	Remarque : . . . . .	85
V.4.4	Conclusion . . . . .	85
V.5	Étude Des Modes Vibratoires et Analyse Des Contraintes Pour Un Châssis 3-D . . . . .	86
V.5.1	Analyse vibratoire . . . . .	86
	Représentation du chargement et conditions aux limites . . . . .	86
	Modes flexion . . . . .	87
	Modes torsion . . . . .	87
	Calcul d'erreur . . . . .	88
	Erreur pour les modes de flexion . . . . .	88
	Erreur pour les modes de torsion . . . . .	88
	Résultat et commentaire . . . . .	88

V.5.2	Calcul des contraintes . . . . .	89
	Remarque . . . . .	90
	Chargement statique . . . . .	91
<b>Chapitre VI</b>	<b>Construction et Fabrication du Modèle</b>	<b>93</b>
VI.1	Construction Du Robot . . . . .	94
VI.2	Système du levage . . . . .	95
VI.3	Système de suspension . . . . .	96
VI.3.1	La fabrication des pièces du système de suspension . . . . .	97
VI.4	Fabrication du châssis . . . . .	98
VI.5	Product Structure Variante PSV . . . . .	98
VI.5.1	Définition . . . . .	98
	Remarque . . . . .	98
VI.6	Estimation du coût . . . . .	100
<b>Chapitre VII</b>	<b>Conclusions Générales</b>	<b>101</b>
<b>Annexe A</b>		<b>103</b>
A.1	Les Valeurs d'inerties calculés sur CATIA : . . . . .	104
A.2	Les propriétés de la poutre UPE choisie . . . . .	104
<b>Annexe B</b>		<b>109</b>
B.1	Les Matrices des Systèmes des équations . . . . .	109
B.1.1	Modèle réel à deux dimensions 2-D . . . . .	109
B.1.2	Modèle réel à trois dimensions 3D . . . . .	110
<b>Annexe C</b>		<b>113</b>
C.1	Commandes de la résolution Sur MATLAB Par La Transformé de La-place : . . . . .	113
C.1.1	Modèle à deux dimensions simplifié : . . . . .	113
C.1.2	Modèle à deux dimensions réel : . . . . .	117
C.1.3	Modèle à trois dimensions : . . . . .	120

# Table des figures

I.1	La localisation de NEXTRONIC . . . . .	2
I.2	système d'analyse fabriqué à Nextronic . . . . .	4
I.3	Principaux partenaires de la société . . . . .	5
I.4	Principaux clients de la société . . . . .	5
I.5	La structure hiérarchique de NEXTRONIC . . . . .	6
II.1	Le tableau MTST . . . . .	11
II.2	Scoring Matrix . . . . .	12
II.3	Function Diagramme . . . . .	14
II.4	Function Diagram . . . . .	15
III.1	Degrés de Manoeuvrabilité de la Configuration 2 . . . . .	19
III.2	Concept de la différentiabilité des roues . . . . .	19
III.3	Rotation des roues autour de centre de rotation . . . . .	20
III.4	Les deux configurations possibles des roulettes . . . . .	20
III.5	La Roulette choisie . . . . .	21
III.6	Représentation conceptuelle et dimensions initiale . . . . .	21
III.7	Représentation basique du chargement . . . . .	22
III.8	La charge répartie $\vec{Q}$ . . . . .	23
III.9	Chargement sur les Roues . . . . .	23
III.10	Schématisation de la flexion du châssis . . . . .	25
III.11	Schématisation du torsion de châssis . . . . .	26
III.12	Représentation de la force Centrifuge . . . . .	27
III.13	Les paramètres de la force latérale . . . . .	27
III.14	Le Chargement Longitudinal . . . . .	29
III.15	La roue percute un objet surélevé . . . . .	30
III.16	Superposition des chargements . . . . .	30
III.17	Schématisation du torsion longitudinal du châssis . . . . .	31
III.18	Exemple d'élément de suspension Anti-roll bar . . . . .	32
III.19	Autre système Anti-roll bar . . . . .	32
III.20	Modèle simplifié de la suspension et rigidité de torsion du châssis . . . . .	33
III.21	La rigidité relative en fonction de la rigidité du châssis et le point optimal de rigidité du châssis . . . . .	34
III.22	Châssis Ladder ou Châssis en H . . . . .	35
III.23	Châssis cruciforme . . . . .	35
III.24	Châssis Combiné : chassis en H et cruciforme . . . . .	35
III.25	Châssis avec tube de torsion . . . . .	36
III.26	Châssis tubulaire . . . . .	36
III.27	Châssis Monocoque . . . . .	37
III.28	Modélisation du châssis par une poutre appuyée en deux appuis simples . . . . .	38
III.29	Diagrammes des efforts de cohésion . . . . .	38
III.30	Caractéristiques géométriques UPE 80 . . . . .	39

IV.1	Le centre instantané de rotation . . . . .	42
IV.2	Figure synthétique des terminologies cinématiques . . . . .	43
IV.3	Les paramètres géométriques cinématiques du robot . . . . .	44
IV.4	Le CIR du robot . . . . .	46
IV.5	Rayon de rotation en fonction de la position de la cible . . . . .	47
IV.6	Le schéma cinématique du robot vue de dessus . . . . .	49
IV.7	Le schéma cinématique du robot vue de gauche . . . . .	49
V.1	Le cas d'un terrain incliné . . . . .	52
V.2	Organigramme de la méthodologie. . . . .	55
V.3	Mouvement du roulis Rotation suivant l'axe longitudinal . . . . .	56
V.4	Mouvement du Tangage Rotation suivant l'axe transversal . . . . .	57
V.5	Mouvement du Lacet Rotation suivant l'axe vertical. . . . .	57
V.6	Schéma 2-D simplifié du robot. . . . .	58
V.7	Diagramme des corps libres. . . . .	58
V.8	Amplitude du châssis ,la position Vertical . . . . .	61
V.9	Amplitude du châssis ,Tangage . . . . .	61
V.10	Schéma 2-D du Robot. . . . .	62
V.11	Modèle 2-D, ensemble roue 1. . . . .	63
V.12	Modèle 2-D, ensemble roue 2 . . . . .	64
V.13	Amplitude de la roue 1 . . . . .	67
V.14	Amplitude du châssis ,Position vertical . . . . .	67
V.15	Amplitude du châssis ,Position angulaire . . . . .	67
V.16	Modèle 3-D du robot. . . . .	68
V.17	Modèle 3-D d'ensemble roue 1 . . . . .	69
V.18	Amplitude de l'ensemble roue 1. . . . .	74
V.19	Amplitude du châssis ,(Position verticale). . . . .	74
V.20	Amplitude du châssis (Tangage). . . . .	74
V.21	Amplitude du châssis (Roulis). . . . .	74
V.22	Structure simplifiée du châssis. . . . .	75
V.23	Poutre principale du châssis. . . . .	76
V.24	Équilibre dynamique d'un élément de poutre. . . . .	76
V.25	. . . . .	78
V.26	Section de la poutre UPE. . . . .	79
V.27	Chargement de la poutre agissant sur l'axe GG' . . . . .	80
V.28	Charge et moment agissants sur le moment de torsion . . . . .	80
V.29	Poutre simplement appuyée des deux côtés. . . . .	82
V.30	Modes de flexion de la poutre simplement appuyée des deux côtés. . . . .	85
V.31	Modes de torsion de la poutre simplement appuyée des deux côtés. . . . .	85
V.32	chargement et conditions aux limites . . . . .	86
V.33	Modes de flexion du châssis 3D. . . . .	87
V.34	Modes de torsion du châssis 3D. . . . .	88
V.35	Modélisation du chargement et conditions au limites sur Abaqus . . . . .	91
V.36	Distribution des contraintes du châssis en . . . . .	91
V.37	la zone la plus contraignant du châssis . . . . .	92
V.38	Déplacement maximal du châssis sous chargement statique. . . . .	92
VI.1	Le modèle 3D final du robot . . . . .	94
VI.2	Le modèle 3D final du robot détaillé . . . . .	94
VI.3	Le modèle 3D final du robot détaillé vue interne . . . . .	95
VI.4	Module de levage vue de gauche . . . . .	95

VI.5 Module de levage vue de droite . . . . .	96
VI.6 Module de levage vue de dessous . . . . .	96
VI.7 Système de suspension . . . . .	97
VI.8 L'intersection entre les bureaux d'étude et de méthode . . . . .	98
VI.9 Product Structure Variant PSV du robot . . . . .	99
A.1 Spécifications techniques des roues choisies . . . . .	103
A.2 Composition structurelle de la roue différentielle . . . . .	103
A.3 Figure réel des roues choisies . . . . .	104
A.4 Capture des valeurs d'inerties trouvées . . . . .	104
A.5 Propriétés mécaniques du caoutchouc . . . . .	105
A.6 Tableau Des Profilets UPE . . . . .	105
A.7 Les propriétés mécanique de la poutre UPE choisie . . . . .	106
B.1 . . . . .	109
B.2 . . . . .	110
B.3 . . . . .	111
C.1 . . . . .	113
C.2 . . . . .	114
C.3 . . . . .	115
C.4 . . . . .	116
C.5 . . . . .	117
C.6 . . . . .	118
C.7 . . . . .	119
C.8 . . . . .	120
C.9 . . . . .	121
C.10 . . . . .	122
C.11 . . . . .	123
C.12 . . . . .	124

# Liste des tableaux

V.1	Paramètres du modèle 2-D simplifié. . . . .	60
V.2	Paramètres du modèle 2-D . . . . .	63
V.3	Paramètres du modèle 2-D simplifié. . . . .	69
V.4	Fréquences de flexion de la poutre . . . . .	79
V.5	Fréquences de torsion de la poutre. . . . .	84
V.6	Fréquences de flexion . . . . .	84
V.7	Fréquences de torsion . . . . .	85
V.8	Fréquences de flexion du châssis. . . . .	87
V.9	Fréquences de torsion du châssis. . . . .	87

# Liste des Abréviations

<b>IHM</b>	Interface Homme Machine
<b>IOT</b>	Internet Of Things (Interner des choses)
<b>PCB</b>	Printed Circuit Board
<b>CAO</b>	Conception Assistée par Ordinateur
<b>CNC</b>	Computer Numerical Control ( machine outil à commande numérique MOCN)
<b>PC</b>	Product Complexity
<b>MTST</b>	Matrix Target Specification Table
<b>D</b>	Difficulty
<b>CG</b>	Centre de Gravité
<b>PFS</b>	Principe Fondamental de la Statique
<b>PFD</b>	Principe Fondamental de la Dynamique

# Liste des Symboles

$\delta_m$	degré de mobility (degré de mobilité)	
$\delta_s$	degré of steerability (degré qui mesure l'orientabilité du système )	
$\delta_M$	degré de manoeuvrabilité	
$A$	constante de qualité de la communication	
$\mu$	coefficient de frottement	
$\nu$	coefficient de poisson	
$G$	coefficient de Coulomb	
$Q$	résultante	N
$q$	densité linéaire de la charge	N/m
$P$	puissance	W ( $\text{J s}^{-1}$ )
$N$	fréquence de rotation	turns/minute
$\omega$	vitesse angulaire	rad s
$K$	rigidité du ressort	N/m
$b$	amortissement du suspension	NS/m
$\sigma_m$	contrainte maximale	MPa
$R_{pe}$	résistance pratique élastique	MPa
$I_G$	moment quadratique	$\text{Cm}^4$
$J$	moment quadratique polaire	$\text{Cm}^4$
$\rho$	masse volumique	$\text{Kg/m}^3$
$E$	module de Young	MPa
$G$	coefficient de Coulomb	MPa

## Introduction Générale

Depuis de nombreuses années, la robotique habituellement utilisée pour la construction de produits, le déplacement et la transformation d'objets, se concentre sur les systèmes coopératifs permettant d'exécuter des tâches complexes avec des humains. Ces systèmes doivent aussi offrir un enrichissement du comportement par leur interaction avec les humains. se réunissent, différentes communautés scientifiques telles que :

- Le traitement du signal : permettant le suivi et la reconnaissance visuelle d'objets, de personnes et autres.
- L'intelligence artificielle : permettant l'apprentissage des systèmes, les prises de décision et la planification.
- La robotique : pour la mécanique robotique tant dans l'expressivité, que la fluidité du mouvement.
- L'interaction homme-machine : pour la réalisation de méthodes d'interaction des systèmes.

Le travail souhaité est de concevoir et de réaliser un **Warehouse Robot**. La conception de ce projet se fait d'après des exigences et des spécifications présentées dans le cahier des charges et en fonction des ressources disponibles et aussi en tenant compte des contraintes, pour se faire nous avons opté pour le concept de la **Conception Simultané** comme une notion de travail dans le groupe, chacun travail avec son aspect et sa spécialité : l'automatique, l'électronique, le traitement d'image, la programmation et enfin ma partie mécanique du projet.

Dans cette partie du rapport, nous détaillerons les étapes successives de la construction mécanique de notre robot. Au départ d'une stratégie claire et précise, nous élaborerons les différents systèmes inhérents à celle-ci. Comment développer un robot le plus modulable et le plus fiable possible ? Telle était la question qui nous préoccupait sans cesse. Comme dans toute construction mécanique qui se respecte, un cahier des charges a été élaboré. Lors du développement du projet, celui-ci a dû être scrupuleusement respecté, parce que répondant parfaitement aux attentes de la stratégie.

Nous avons concentré nos forces afin d'élaborer un robot le plus fiable possible. En effet, nous ne pouvions nous permettre la moindre erreur mécanique, des fiabilisations devant être réalisées dans les deux autres domaines : électronique et informatique.

Le premier chapitre est dédié à une présentation abrégée de l'organisme d'accueil NEXTRONIC et ses domaines d'activités, ainsi que ses moyens de développement et ses ressources humaines, travail.

Le deuxième chapitre comporte une présentation du cadre du projet en définissant la problématique et la démarche du travail, ainsi la planification, l'analyse de besoin et l'analyse fonctionnel du robot.

Le troisième chapitre expose la composition structurelle, le calcul et le dimensionnement du châssis. Il traite aussi sa typologie et les avantages de chaque configuration.

Le quatrième chapitre décrit l'aspect cinématique du robot, l'établissement des vitesses en fonction des paramètres géométriques et il se termine par l'élaboration de schéma cinématique du robot.

Le cinquième chapitre expose les différents aspects théoriques du calcul dynamique en mettant le point sur l'aspect énergétique, vibratoire et les différents paramètres qui influent sur les résultats du calcul. Sans oublier l'analyse des contrainte et la résistance du châssis.

Le dernier chapitre détaille les étapes successives de construction du modèle 3D du robot et l'approche d'estimation du cout de production unitaire du robot.

## CHAPITRE

## I

**PRÉSENTATION DU CHAMP DE  
TRAVAIL**

Dans ce chapitre nous présenterons l'entreprise NEXTRONIC en tant qu'organisme d'accueil, sa construction, son activité, et son organisation. Et aussi nous citerons la technologie des produits notamment les objets connectés et l'IOT.

## I.1 Présentation d'Organisme d'Accueil

L'entreprise NEXTRONIC est un organisme de développement et de production dans les domaines de l'électronique, mécatroniques et Informatiques industriels. Il est voué à la recherche en systèmes embarqués, électroniques embarqués, objets connectés, conception et productions des cartes électroniques, technologies numériques, sécurité, énergies et environnement ainsi que la distribution d'une large gamme de composants électroniques, robotiques, outillage, appareils de mesure, de montage automatique et l'impression 3D.

L'entreprise NEXTRONIC est située sur la route des Znata à Casablanca, comme il est montré sur la carte suivante figure I.1 :

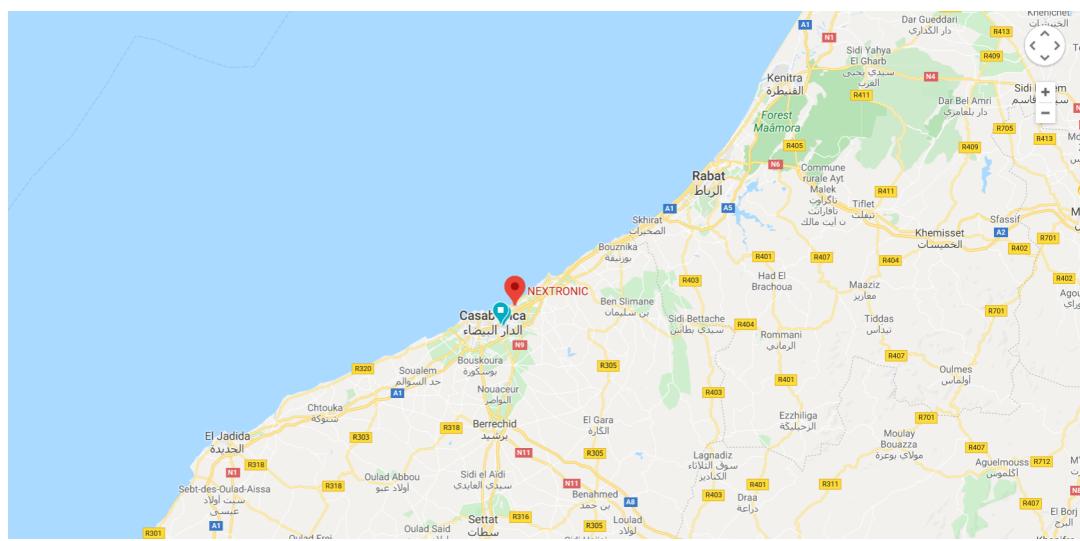


FIGURE I.1 – La localisation de NEXTRONIC

## I.2 Domaines d'Activités

Nextronic regroupe des équipes scientifiques oeuvrant dans des domaines innovants et met à leur disposition des instruments scientifiques de pointe. Les domaines de compétence développés par la société lui permettent d'intervenir à toutes les phases d'un projet.

À partir d'un cahier des charges, NEXTRONIC élabore des solutions techniques et développe complètement les produits, du démonstrateur jusqu'à la mise sur le marché dans les métiers suivants :

- Electronique embarquée (Conception et productions de cartes électroniques).
  - Système embarqué (Electronique, Informatique et Mécatronique).
  - Objet connecté (Système autonome et connecté à l'internet, application et logiciel)

### I.2.1 Électroniques Embarqués

A partir d'un cahier des charges ou de spécifications, NEXTRONIC conçoit des cartes électroniques adaptées aux besoins des clients. Cette conception passe par la définition de son architecture (matérielle, logicielle, mécatronique) et d'une CAO pour effectuer le schéma puis le routage de la carte électronique. L'équipe des ingénieurs se charge ensuite du code source (firmware, électronique logicielle). Le résultat est un premier prototype qui permet de valider le concept des cartes électroniques.

Une fois le prototype est validé, NEXTRONIC est en mesure de gérer la fabrication de ces cartes, via des partenaires de qualité, et d'effectuer les tests avant de livrer un produit fini et fonctionnel.

Ci-dessous une liste non exhaustive des technologies maîtrisées par les ingénieurs de NEXTRONIC en électronique embarquée :

- L'électronique numérique à base de Microprocesseurs, Microcontrôleurs, DSP, FPGA
- L'électronique analogique basse tension nécessaire à la mise en forme des signaux électriques pour interfaçer les capteurs et les actionneurs avec les unités de traitement.

### I.2.2 Systèmes Embarqués

Un système embarqué est un système autonome combinant de l'électronique, de l'informatique et de la mécatronique. Il s'interface avec l'homme via une IHM (Interface Homme Machine) spécifique, ou plus générique tel un smartphone, une tablette ou un PC. Ce système communique avec d'autres système "lointain" via une liaison Internet (interface Web) pour s'intégrer au M2M (machine to machine) ou bien à l'IoT (Internet of Things).

A partir d'un besoin ou d'une idée, NEXTRONIC conçoit intégralement des systèmes embarqués avec des composants de pointe et testés avec la plus grande attention, jusqu'à son industrialisation et garantissant une continuité de fonctionnement. Pour concevoir une architecture fiable, NEXTRONIC utilise de l'électronique de pointe avec des microprocesseurs à basse consommation ou des microcontrôleurs avec une partie logicielle spécifique pilotant directement les composants internes (électronique logicielle, firmware) ou s'appuyant sur un système d'exploitation (OS temps réel, Windows 10, Linux, Android).

Nous donnons ci-dessous une liste des technologies fabriquées par les ingénieurs de NEXTRONIC en systèmes embarqués figure I.2 :

- Systèmes d'acquisitions
- Systèmes de commande complets.
- Systèmes d'analyse de Traffic Routière.

### I.2.3 Objets Connectés

Un objet connecté est un dispositif électronique de type système embarqué qui échange des informations avec un ou plusieurs autres dispositifs. L'un des exemples les plus communs aujourd'hui est celui de la montre intelligente (Smart-Watch).



FIGURE I.2 – système d’analyse fabriqué à Nextronic

Cette dernière est connectée au smartphone et ces deux systèmes se partagent diverses données issues soit de la montre (cardio fréquencemètre, gyroscope etc.) soit du smartphone (notifications, applications etc.).

Nous pouvons aussi penser à l’objet connecté comme un outil industriel, avec comme exemple récent, la gestion en temps réel de la consommation d’eau. Les échanges d’informations entre les objets connectés peuvent se faire de proche en proche (liaison Bluetooth, ZigBee, BLE), via un réseau local (Wifi) ou via Internet (SigFox, LoRa, Box, GSM, 3G, 4G). Nous parlons alors d’internet des objets.

En plus de la compétence hardware, l’équipe NEXTRONIC est aussi constituée d’ingénieurs en développement de logiciels et d’applications qui sauront permettre de communiquer les objets connectés avec un ordinateur, un smartphone, une tablette ou tout autre dispositif grand public capable d’être programmé.

Afin de permettre aux projets des objets connectés de communiquer avec leur environnement proche ou distant, NEXTRONIC travaille en collaboration avec Microsoft AZURE, expert dans la gestion des données sur Internet et dans le Cloud.

### I.3 Références et Partenaires de la Société

Depuis 2011, NEXTRONIC a accompagné de nombreuses entreprises dans leurs projets de systèmes embarqués et d’objets connectés, allant de la petite structure (Startup / TPE) à des clients grand compte avec toujours les mêmes prérogatives : Innovation, expertise et continuité industrielle. Les clients sont issus de multiples domaines d’activités :

- Industrie
- Recherche et Laboratoires
- Agriculture et Viticulture
- Automobile et Transport
- Sécurité et Défense
- Organismes d’état et communautés de communes

- Equipement de la maison et domotique
- Produits électroniques grand public

NEXTRONIC a su tisser des liens forts avec des partenaires spécialisés dans l'innovation technologique. Que cela soit avec des laboratoires de recherche scientifique, des pôles de compétitivité ou des organisations dédiées à l'innovation, le réseau de la société NEXTRONIC accompagne et appuie les idées et projets de systèmes embarqués, ou d'objets connectés, porteurs pour l'avenir figure I.3 et figure I.4 .



FIGURE I.3 – Principaux partenaires de la société



FIGURE I.4 – Principaux clients de la société

## I.4 Structures et Hiérarchie de NEXTRONIC

Avec l'expérience acquise au fil du temps, NEXTRONIC met aujourd'hui à la disposition de sa clientèle des équipements, des moyens humains et un savoir-faire qui la permet d'assurer ses métiers, sans avoir recours à la sous-traitance et à une échelle nationale. Le schéma suivant figure I.5 représente l'organisation interne de NEXTRONIC :

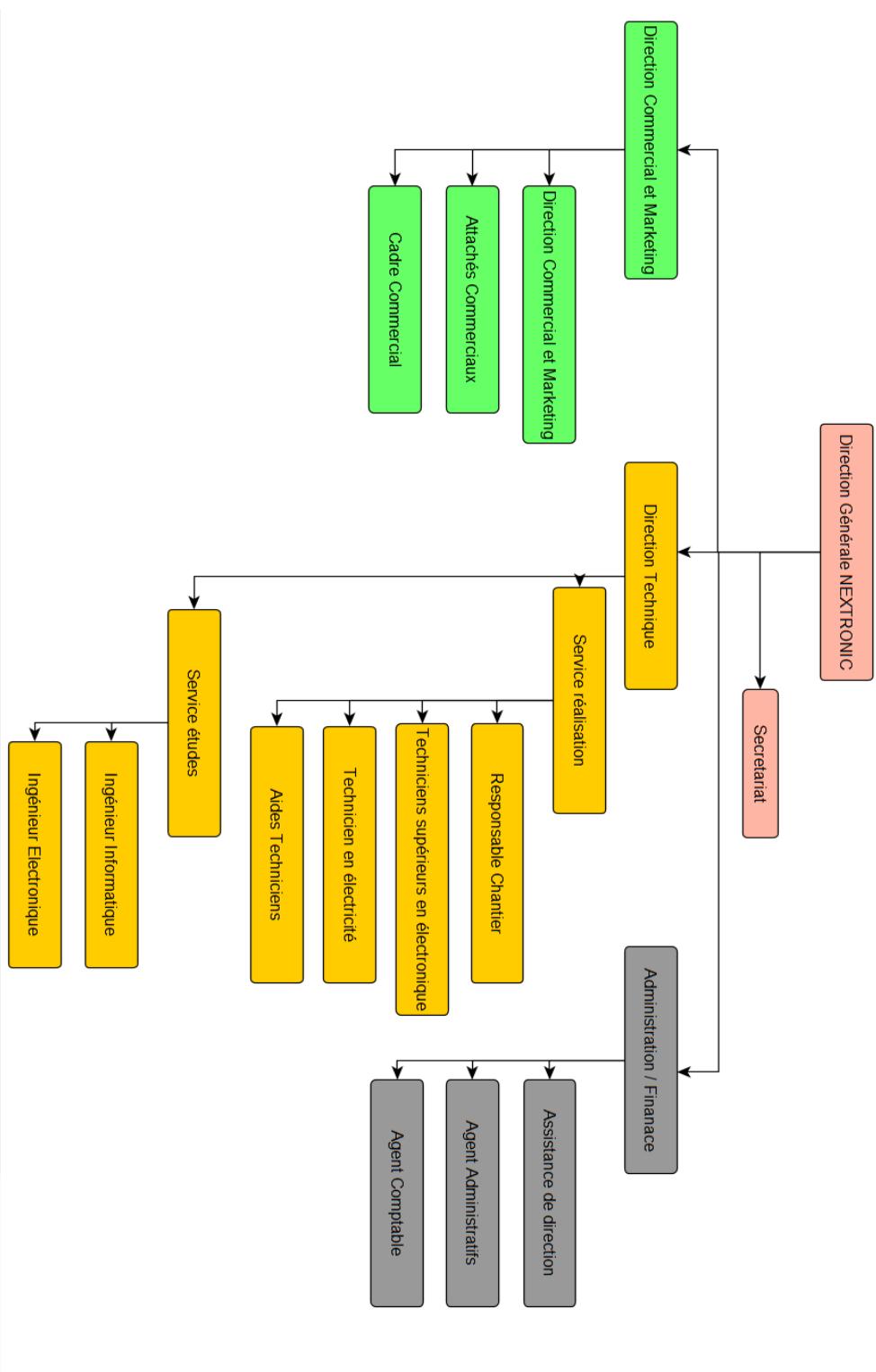


FIGURE I.5 – La structure hiérarchique de NEXTRONIC

## **Conclusion**

Ce chapitre a introduit le cadre général de ce projet de fin d'études en présentant l'organisme d'accueil à travers son domaine d'activité, ses services et ses moyens de production. Le chapitre suivant présentera le contexte du projet en détaillant la problématique, les objectifs et la méthodologie suivie dans ce projet.

## CHAPITRE

## II

## MISE EN SUJET

Ce chapitre décrit la problématique sur laquelle nous avons travaillé durant toute la période du stage de fin d'études ainsi que la démarche que nous avons suivons pour aborder notre projet à partir une analyse des exigences ou besoins avancé et aussi l'approche de planification de travail.

## II.1 Cahier des Charges

Le besoin principal est de construire alors un robot de transport des objets quelque soit sa nature matériel, matière première ou déchets, moyennant **le maximum possible les ressources locales** de l'entreprise et **un coût de fabrication assez faible** en tenant en compte aussi des besoins suivantes :

1. Être Robuste et léger .
2. Supporter une charge de **100 KG**
3. Utiliser les concepts simples pour faciliter la maintenance et la production.
4. Être ergonomique et fiable
5. Garantir la sécurité au cours de fonctionnement
6. Respecter le critère d'encombrement les dimensions  $600mm \times 600mm$
7. Utiliser le maximum possible des pièces standards pour éviter la dépendance aux autres fabricants (réduction du coût et le temps d'attente ...etc)
8. Faciliter le contrôle et avoir une bonne manoeuvrabilité
9. Avoir une grande efficacité énergétique
10. Surmonter les obstacles avec une stabilité importante.
11. L'esthétique

### Remarque

Les parties suivantes font partie d'une approche américaine d'analyse de cahiers des charges très répondues dans le monde de la conception mécanique , [17] .

## II.2 Les Ressources

Comme l'entreprise est spécialiste dans le domaine électronique les appareils relatives à ce dernier sont très disponible dedans, mais heureusement l'entreprise peut aussi Rendre disponible des machines d'usinage de haute technologie et tous les matériels nécessaire de la partie mécanique , alors nous citons ces ressources :

- Les hardware (Les cartes PCB - Les Capteurs - Batteries câbles et matériels de localisation GPS...etc )
- Les Softwares ( logiciels de programmation et de traçage des cartes ..etc )
- Machines de découpe des carte PCB
- Machines de prototypage
- Imprimantes 3D .
- Machines d'usinage (conventionnel et CNC )
- La matière première ( La toile - Les barres et composants d'assemblage ...etc)

## II.3 Contraintes Réalistes

### Fonctionnelle

L'autonomie de la batterie est considérée la problématique la plus répondu dans un tel projet , l'autonomie moyenne des batteries utilisées c'est autour d'intervalle  $[2h - 3h]$ .

## Sécurité

Au cours de la conception il faut prendre en considération d'éliminer les angles vifs au niveau de la structure mécanique (châssis et la tôle ) et aussi une bonne isolation électrique pour éviter les courts-circuit et chocs notamment au cours de chargement des batterie .

## Fabrication

Toute les composants mécanique *sont imposés d'être en Aluminium* pour assurer la légèreté voulu.

## Timing

Dans un seul mot c'est le **COVID-19** , le temps de la fin de projet ne sera pas respecter.

## Ergonomique

Principalement c'est de rendre la manipulation du robot simple et sécurisée, et assurer une bonne étanchéité pour les composants électroniques .

## II.4 Analyse de Besoin Réduite

### II.4.1 Elaboration de " Metric Target Specification Table "

MTST est un tableau son rôle est comme son nom indique c'est d'interpréter le besoin aux termes des spécifications techniques, d'une autre façon c'est pour quantifier les besoins .

Numéro du Metric	Besoins associés	Metrics	Units	Acceptale	Ideal
1	1 7 9	Prix	MAD	<10000	5000-6000
2	1 2 6 7 9	Poids du robot	Kg	< 20	15
3	6	Longueurs du robot	m	0,6	0,6
4	6	Largeur du robot	m	0,6	0,6
5	2	Limite du poids à déplacer	Kg	80	100
6	1 2 9	Autonomie de la batterie	Km	> 10	20
7	3 7 10	Bruit	db	< 90	30-90
8	2 8 9 10	Vitesse de déplacement	km/h	> 10	[15-20]
9	4 8	Angle de rotation	°	> 180	360
10	4 8	Angle de vision (capteurs )	°	120	360
11	4	La hauteur pour monter la charge	m	0,5	1

FIGURE II.1 – Le tableau MTST

### II.4.2 Scoring Matrix

C'est un outil utilisé dans la conception mécanique notamment au monde anglophone , sert à aider les concepteurs en générale pour choisir les concepts ou les solutions convenables ou cas ou il y a une confusion ou une grande diversité du

choix , il se base sur l'affectation des poids pour chaque choix ou concept ou la chose que nous voulons hiérarchiser en fonction de l'importance et en fin le choix convenable Facilement sera montré.

Pour notre cas nous l'avons utilisé pour connaître les besoins principaux et les secondaires dans de la conception. Nous définissons alors le classement numérique suivant :

- **9** : Importance extrême
- **7** : Importance forte
- **5** : Importance modérée
- **3** : Importance encore modérée
- **1** : Égalité
- **0.5** : Moins d'importance

	Metrics	Prix	Poids du robot	Longeurs du robot	Largeur du robot	Limite de la charge à déplacer	Autonomie de la batterie	Bruit	Angle de rotation	Angle de vision (capteurs )	La hauteur pour monter la charge	Vitesse de déplacement	Row Total	Weight	Weight %	
Needs		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11				
Prix	1	1	5	5	5	3	3	5	3	3	3	6	42	0,104869	10%	
Poids du robot	2	3	1	3	3	5	5	6	3	3	3	3	38	0,094881	9%	
Longeurs du robot	3	3,00	5,00	1	1	1	3,00	5	5	5	1	1	31	0,077403	8%	
Largeur du robot	4	3,00	5,00	1	1	1	3,00	5	5	5	1	1	31	0,077403	8%	
Limite de la charge à déplacer	5	9	7	5	5	1	5	8	5	5	5	5	60	0,149813	15%	
Autonomie de la batterie	6	5	5	5	5	2	1	8	5	5	5	5	51	0,127341	13%	
Bruit	7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	11	0,027466	3%	
Angle de rotation	8	4	4	5	5	3	3	5	1	1	3	3	37	0,092385	9%	
Angle de vision (capteurs )	9	5	5	3	3	3	3	5	3	1	1	1	33	0,082397	8%	
La hauteur pour monter la charge	10	3	3	1	1	0,5	1	5	5	3	1	3	26,5	0,066167	7%	
Vitesse de déplacement	11	5	5	1	1	3	3	6	5	5	5	1	40	0,099875	10%	
													Total :	400,5	1	100%

FIGURE II.2 – Scoring Matrix

D'après la matrice au dessus nous pouvons maintenant classer les métrics principaux et secondaires selon le poids obtenu pour chacun . alors au cours de la conception il faut donner la priorité aux suivants :

- Limite de la charge à déplacer 15%.
- Autonomie de la batterie 13%.
- Prix 10%.
- Vitesse de déplacement 10%.

Et les autres sont considérer moins d'importance :

- Poids de robot 9%.
- Angle de rotation 9%.
- Angle de vision 8%.
- Longueur et la largeur du robot 8%.
- La hauteur pour monter la charge 7%.
- Le bruit 3%.

## II.5 Étude et Recherche Bibliographique

Afin d'avoir une vue panoramique sur le sujet on s'était basés sur plusieurs moyennes de recherches pour construire une image initiale autour le projet et aussi le plus important c'est la division structurelle du projet, plusieurs approches sont utilisées, Plus particulièrement :

- Le Brain Storming
- Ebooks et Videos sur Web
- Patents existantes

### II.5.1 L'identification des Taches "Tasks identification"

Pour le but de faciliter le travail et la répartition des tâches aux membres du groupe nous avons pensé à décomposer notre projet en deux "sous-projets" ou parties d'autres façon c'est la **décomposition structurelle du dispositif**. Nous présentons ci-dessous l'organigramme structurel du projet nommé aussi "Function diagramme" **II.3** ( Seulement la partie mécanique qui sera détaillée)

**Nota :**

Ce diagramme sera utilisé aussi pour l'estimation du temps du projet dans le paragraphe suivant.

## II.6 Planning du Projet

En bref le "plan project" est un document utilisé pour garder un projet sous contrôle durant toutes ses étapes de sa réalisation. En générale ce planning se fait en trois étapes principales :

- L'identification des tâches "Tasks identification". ( le paragraphe précédent.)
- Estimation du temps nécessaire du projet.
- L'obtention d'un Plan finale du projet à l'aide d'un outil de planification.

### II.6.1 Estimation du temps nécessaire du projet

L'estimation du temps dépend principalement à la complexité du produit ou plus précisément dépend de la complexité de sa fonction ( dans ce cas on aura plusieurs décompositions fonctionnels ou structurelle => plusieurs sous-projets ==> nécessite plus de temps soit pour sa conception ou soit pour sa fabrication).

Théoriquement les américains utilise une approche d'estimation du temps exprimé par la formule suivante :

$$\text{Temps(Heures)} = A * PC * D^{0.85}$$

Avec :

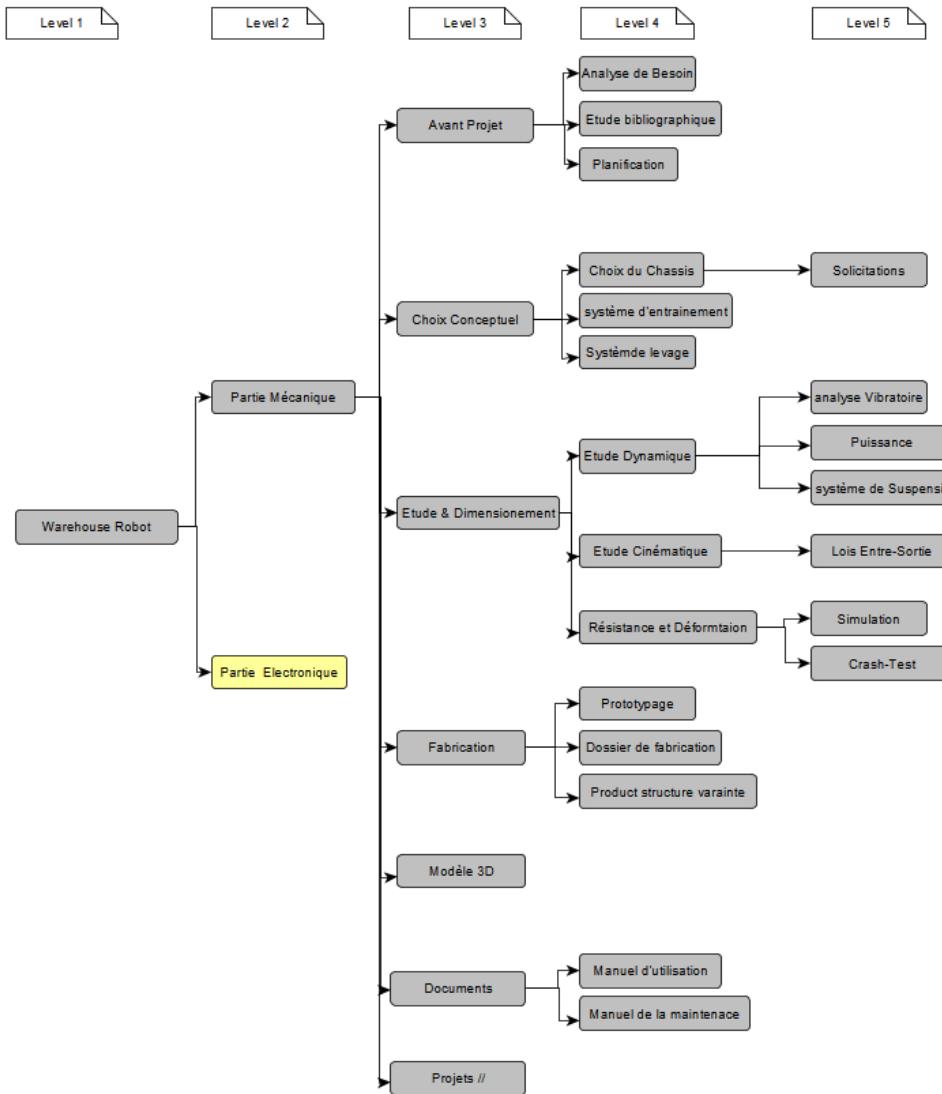


FIGURE II.3 – Function Diagramme

**A :** Une constante dépend de **la qualité de la communication** entre les groupes participants. En réalité cette constante est donnée en fonction de la taille de l'entreprise ou de la société. Par exemple :

- Une petite entreprise  $A = 30$  (une bonne communication)
- une grande entreprise  $A = 150$
- $A = 150 \times 5$  pour les sociétés assez grande.

Alors pour notre cas nous prenons  $A = 30$

**D (Difficulty) :** un coefficient dépend de **la complexité technologique** du dispositif à concevoir, par exemple :

- $D = 1$  Technologie du dispositif très connue.
- $D = 2$  Technologie plus au moins nouvelle.
- $D = 3$  Technologie complètement nouvelle.

Alors Sans doute nous prenons  $D = 1$ .

**PC (Product Complexity)** : Alors comme nous avons déjà indiqué que la complexité du produit dépend principalement à la fonction du produit , pour déterminer ce coefficient nous suivons la méthode suivante :

### 1-Function diagramme :

Function diagramme : figure II.4 :

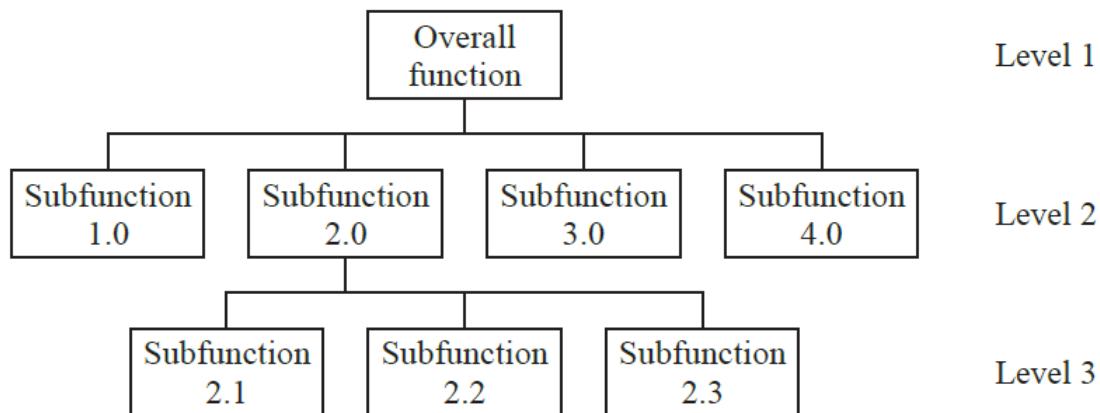


FIGURE II.4 – Function Diagram

### 2-Calcul du Coefficient PC "Product Complexity"

Ce coefficient est calculé par la formule suivante :

$$PC = \sum j \times F_j$$

- $j$  = "Level" (le niveau)
- $F_j$  "The number of functions "(pour notre cas est équivalent aux nombre de décompositions structurelle)

Pour cet exemple Le  $PC$  est :

$$PC = (1 * 1) + (2 * 4) + (3 * 3) = 18$$

Donc maintenant nous appliquons cette méthode pour calculer notre propre PC :

- **Function diagram** figure II.3

Alors notre coefficient  $PC$  est :

$$PC = (1 \times 1) + (2 \times 1) + (3 \times 7) + (4 \times 14) + (5 \times 7) = 115$$

- **Le Temps estimé alors est :**

$$Temps(Heures) = 30 \times 115 \times 1^{0.85} = 3450heurs$$

Avec A=30 , PC = 115 , D=1 .

Alors Le temps approché du projet est environ de **3450 Heurs** que nous devont la divisé sur la période du PFE 4 mois.

### **II.6.2 Plan du projet selon la méthode de GANTT**

Aprés avoir diviser le projet entre les membres du groupe nous avons classer les taches principales selon la priorité et les prédecesseurs pour assurer une grande fluidité et cohérence et aussi le respect de la notion de **la conception simultané** , pour cela nous avons utilisé l'outil de planification de diagramme de GANTT annexe **A**.

## **II.7 Conclusion**

Ce chapitre a entamé les identifications des spécifications de conception à travers une approche d'analyse de besoin détaillée. Le prochain chapitre attaquera les premières étapes de la conception c'est la génération des concepts et choisir aussi les configurations optimales des systèmes relatifs à ce robot.

## CHAPITRE

## III

**LE CHOIX CONCEPTUEL DU  
ROBOT**

Ce chapitre est un état de l'art sur la robotique. Il présente une définition détaillée de celle-ci, sa composition structurelle , le calcul et le dimensionnement . Quelques exemples de robots expressifs seront décrits ainsi que les avantages caractéristique de chaque type. Nous conclurons en positionnant le travail de projet effectué et en comparant notre objectif aux robots présentés.

### III.1 Le Concept Générique du Châssis

Tout d'abord avant d'attaquer cette partie il faut parler de nombreuses paramètres qui vont orienter le choix de la structures , ils sont principalement : **les degrés de liberté , holonomique ou non holonomique , L'odométrie , la nature des sollicitations et la rigidité .**

**L'odométrie** – Est une technique permettant d'estimer la position d'un véhicule en mouvement ,repose sur la mesure individuelle des déplacements des roues pour reconstituer le mouvement global du robot. En partant d'une position initiale connue et en intégrant les déplacements mesurés, nous pouvons ainsi calculer à chaque instant la position courante du véhicule.

**non holonomique** – Un système non holonomique en physique et en mathématiques est un système dont l'état dépend de la voie suivie .Un tel système est décrit par un ensemble de paramètres soumis à des contraintes différentielles et dépend de l'état initiale du système.

#### III.1.1 Les Configurations Basiques des Roues des Robots

Généralement plusieurs configurations sont possibles (quatre grandes catégories) , mais il faut citer d'abord quelques notes fondamentales qui vont nous diriger à choisir la configuration convenable :

1. La stabilité d'un véhicule est garantie avec 3 roues (Si le centre de gravité se trouve dans le triangle formé par le point de contact avec le sol des roues.)
2. La Stabilité améliorée par 4 roues et plus (toutefois, ces dispositions sont hyper statiques et nécessitent un système de suspension flexible.)
3. Des roues plus grandes permettent de surmonter des obstacles plus élevés (mais ils nécessitent un couple plus élevé ou des réductions dans la boîte de vitesses.) et le choix des roues dépend de l'application.
4. La plupart des arrangements ne sont pas holonomiques (commande complexe)
5. La combinaison de l'actionnement et de la direction sur la même roue rend la conception complexe et ajoute des erreurs supplémentaires pour l'odométrie.

Pour notre cas , la solution optimale c'est la configuration basé sur les trois roues figure III.1 qui répond au cahier des charges et qui assure aussi :

- une stabilité isostatique
- Une bonne Odométrie
- Moins de complexité au niveau de commande .

En outre dans la même configuration choisi ils existent 4 solutions basiques , la seule différence est la degré de Manoeuvrabilité  $\delta_M$  , alors nous choisissons la solution convenable c'est **Le Robot à Roues Différentielles ou Differential Drive"** ou **differential wheeled robot**.

$$\delta_M = \delta_m + \delta_s \quad (\text{III.1})$$

- $\delta_m$  : Degree of mobility (Degré de mobilité)
- $\delta_s$  :Degree of steerability ( degré qui mesure l'orientabilité de système)

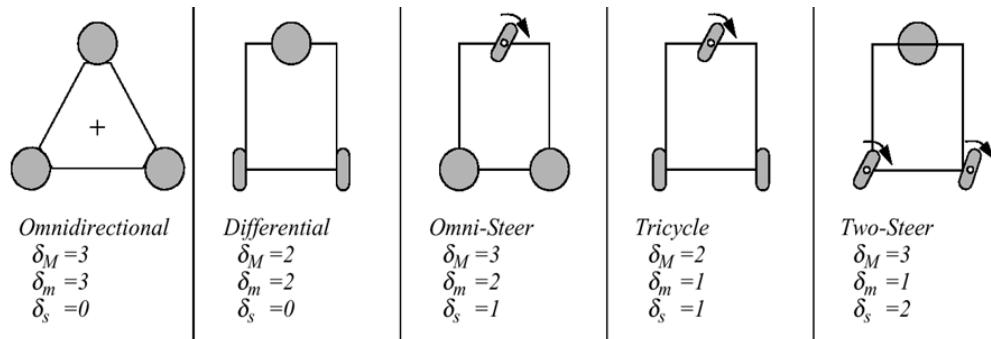


FIGURE III.1 – Degrés de Manoeuvrabilité de la Configuration 2

### III.1.2 Plus de Détails sur le Concept Choisi

#### Définition

Un robot à roues différentielles est un robot mobile dont le mouvement est basé sur deux roues entraînées séparément placées de chaque côté de la carrosserie du robot. Il peut donc changer de direction en modifiant le taux de rotation relatif de ses roues et ne nécessite donc pas de mouvement de direction supplémentaire figure III.2.

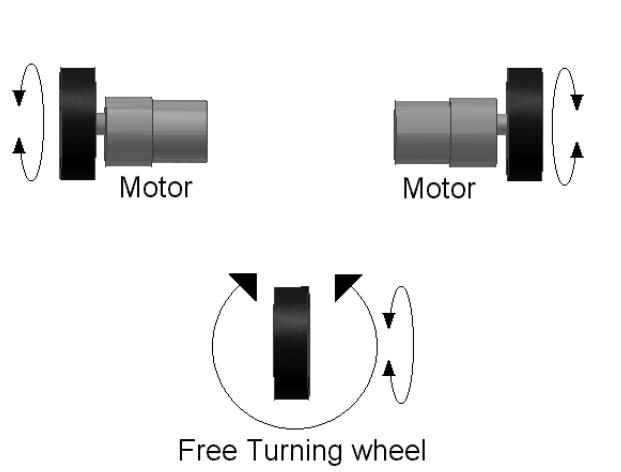


FIGURE III.2 – Concept de la différentiabilité des roues

Si les deux roues sont entraînées dans la même direction et la même vitesse, le robot ira en ligne droite. Si les deux roues sont tournées à vitesse égale dans des directions opposées.

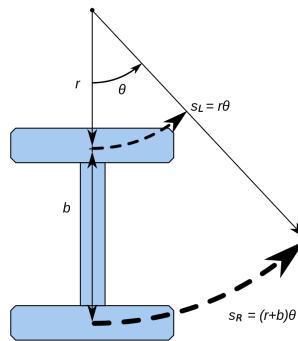


FIGURE III.3 – Rotation des roues autour de centre de rotation

## III.2 La Sélection des Roues du Robot

### III.2.1 Dimensions des roues

Il est très favorable de choisir des grandes roues pour un tel projet ça aidera beaucoup au niveau de fluidité de mouvement et pour surmonter le maximum des obstacles , mais une pénalité d'énergie sévère c'est à dire plus de couple sera demandé pour qu'elles puissent se mouvoir ce qui impose de faire un bon rapport entre les deux . Nous présentons alors les roues choisis :

#### Pour Les deux Roues Différentielles :

Nous avons choisi deux roues similaires de **Hoverbord** de dimension standard **6.5 inch** environ de 165.1 mm de diamètre , disponible aux marchés locales , annexe A figures A.3 , A.1 et A.2.

#### La troisième roulette :

Les roues, doivent être sélectionnés sur la base de différents paramètres : avant tout le type d'emploi et la charge que les roues devront supporter.Alors nous disposons pour ce cas deux types de roulettes figure III.4 pour les raisons de stabilité au cours de mouvement il est conseillés d'utiliser le type **(C) Castor Wheel**.

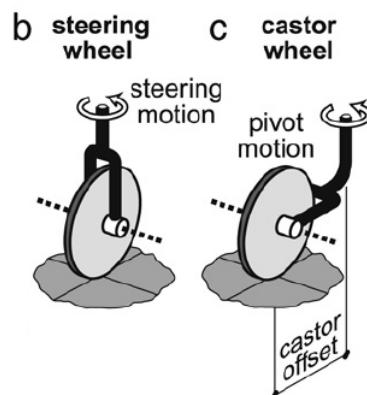


FIGURE III.4 – Les deux configurations possibles des roulettes

D'après le guide de choix de l'entreprise **TELLURE ROTA** (Nature du sol , Température de travail ...etc ) [8] la roue optimale pour le cas c'est la roue de type **industrielle légère** (spécifique pour les poids qui varient de [100- 200Kg]).

Le choix final alors c'est la Roue **SERIE 22** figure III.5 Indiquées pour des chariots ayant des charges légères, même en présence d'obstacles et pour des utilisations mixtes intérieures-extérieures. Le bandage en caoutchouc gris non-tachant les rend indiquées même sur des sols délicats et en environnements domestiques/institutionnels.

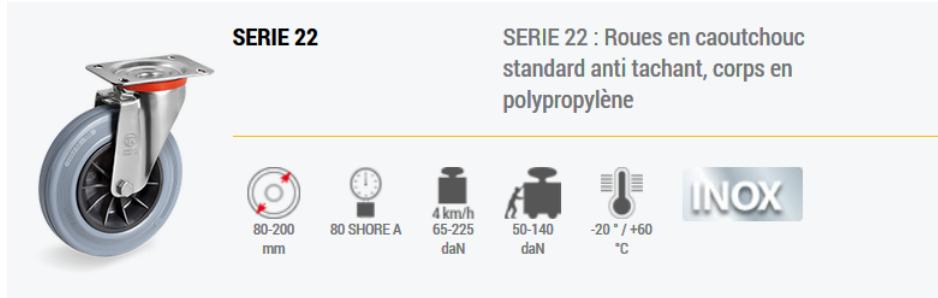


FIGURE III.5 – La Roulette choisie

### III.3 Premier Croquis Conceptuel et Dimensions Initiale

D'après le cahier des charges fonctionnels les dimensions du robot sont approchés à partir d'un chariot de transport utilisé au sein de l'entreprise , la figure suivante indique la perspective initiale de ces dimensions figure III.6

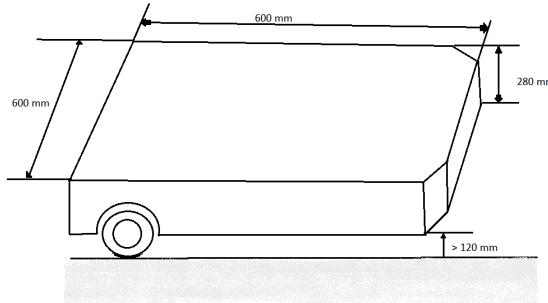


FIGURE III.6 – Représentation conceptuelle et dimensions initiale

- **Longueur :** 600 mm
- **Largeur :** 600 mm
- **Hauteur :** 280 mm
- **Hauteur / au sol :**  $\geq 120\text{mm}$

### III.4 Le Centre de Gravité

Après le choix des roues et l'affectation des dimensions l'étape qui suit c'est la détermination du centre de gravité de ce petit véhicule , c'est une entré fondamental pour continuer les autres aspects notamment la cinématique et la dynamique du robot.Nous citons ci-dessous la méthode de détermination :

1. Représentation des chargements
2. Choix d'un point de référence ( pour le calcul des moments )
3. Détermination du position Longitudinal du CG
4. Détermination du position Transversal du CG

**Nota :** Les étapes présentées au dessus sont pour déterminer un CG initiale ,car l'ajout des composants (les boites électronique - câbles - batteries ...etc) changeront forcément la valeur réel du CG , alors une autre itération expérimentale dans la phase du prototypage est nécessaire et par la suite l'ajustement des valeurs calculé au début.

#### III.4.1 Représentation des chargements

Le cahier des charges indique le poids total est d'environ de **100 kilogrammes** alors ce dernier est considéré comme un chargement maximal , la figure suivante illustre sa répartition figure **III.7**

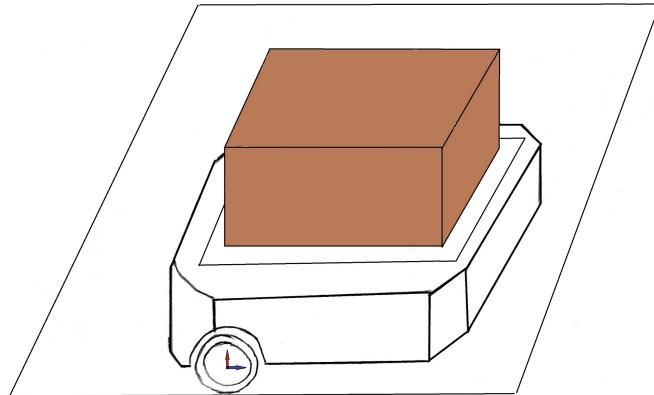


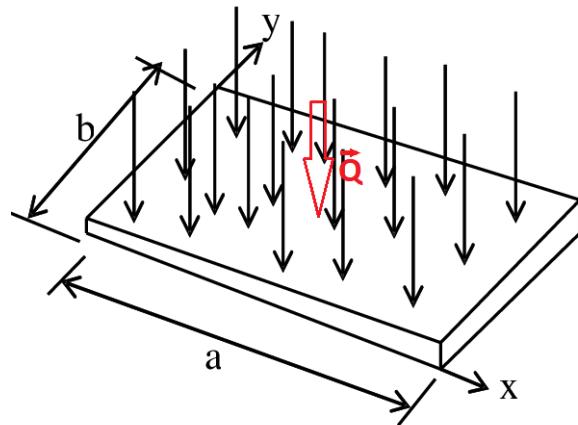
FIGURE III.7 – Représentation basique du chargement

La charge alors est une charge répartie de résultante (passe par CG )  $\vec{Q}$  sur la surface fonctionnelle du robot  $S$  figure **III.8** avec :

- La surface fonctionnelle  $S : S = a \times b = 0.16m^2$  ( $a = b = 400mm$ )
- la masse  $m = 100Kg$
- La résultante  $\vec{Q}$  est

$$\vec{Q} = \text{masse} \times \vec{g} \quad (\text{III.2})$$

$$\vec{Q} = 980 \text{ N}$$

FIGURE III.8 – La charge répartie  $\vec{Q}$ 

Alors l'effort sur chaque roue est de 327 N figure III.9

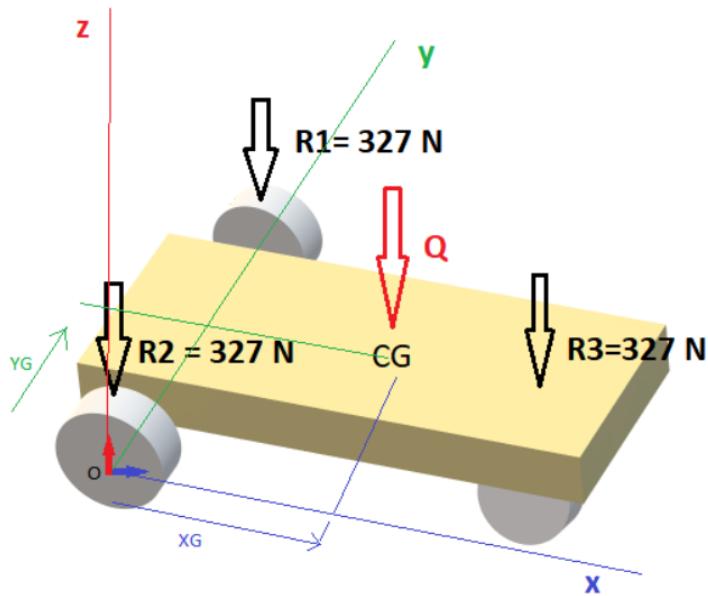


FIGURE III.9 – Chargement sur les Roues

### III.4.2 Détermination de la Position Longitudinal et Transversal du Centre de Gravité par le Principe Fondamental de la Statique PFS

Le PFS donne l'équation des moments suivante :

$$\sum \vec{M}(F_{ext})_O = \vec{0} \quad (\text{III.3})$$

$$(R\vec{1}O \wedge \vec{R1}) + (R\vec{3}O \wedge \vec{R3}) + (Q\vec{O} \wedge \vec{Q}) = \vec{0}$$

$$(-L.\vec{y} \wedge R1.\vec{z}) + [(-l.\vec{x} - \frac{L}{2}.\vec{y}) \wedge R3.\vec{z}] + [(-x_g.\vec{x} - y_g.\vec{y}) \wedge -Q.\vec{z}] = \vec{0}$$

$$-L.R1.\vec{x} + l.R3.\vec{y} - \frac{L}{2}.R3.\vec{x} - x_g.Q.\vec{y} + y_g.Q.\vec{x} = \vec{0}$$

Sachant que  $R1=R2=R3=R$  la projection suivant l'axe (**OX**) donne :

$$-L.R1 - \frac{L}{2}.R3 + y_g.Q = 0$$

$$y_g = \frac{1}{Q}(\frac{3}{2}L.R)$$

La projection suivant l'axe (**Oy**) :

$$l.R3 - x_g.Q = 0$$

$$x_g = \frac{l.R}{Q}$$

Avec :  $L=600 \text{ mm}$ ,  $l=400$ ,  $R=327 \text{ N}$  et  $Q=980 \text{ N}$  les expressions des coordonnées du CG sont :

- $y_g = 300 \text{ mm}$
- $x_g = 133.5 \text{ mm}$

### III.5 Les Sollicitations Principales :

En générale il y a cinq types de chargement sur châssis engendrés soit sous conditions de fonctionnement normales ou le cas d'irrégularités de la route ou les manœuvres [4].

Les cas de charges les plus importants pour le châssis : flexion, torsion et flexion – torsion combinée

1. La Flexion.
2. Le Torsion.
3. La sollicitation combinée Flexion + Torsion.
4. Le chargement Latérale.
5. Le chargement Longitudinal.
6. Le chargement asymétrique.

#### III.5.1 La Flexion

Sollicitation dans le plan vertical **xz** causée par le poids propre des organes et de la charge le long du châssis. Souvent c'est le plus dominante dans les approches de dimensionnement comme nous allons voir dans la section III.8.1 de ce chapitre .

**Principe :**

- Calculer le diagramme de moments de flexion et d'effort tranchant le long de l'axe du véhicule.
- Calculer les contraintes et déformations dans le châssis et dans le longerons du véhicule.

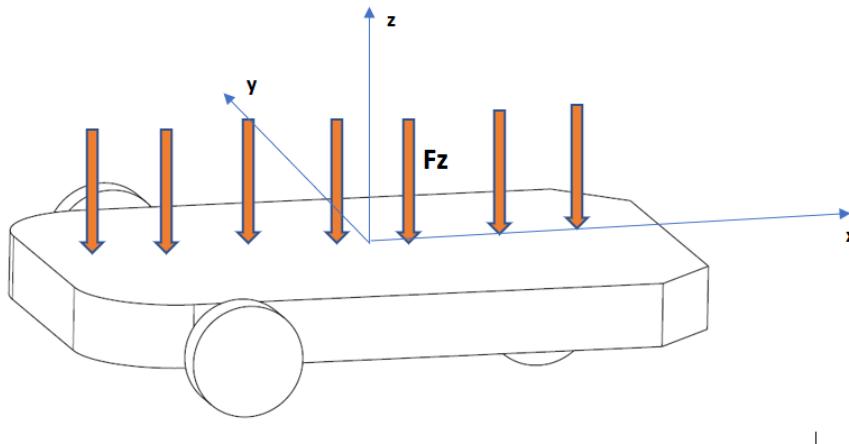


FIGURE III.10 – Schématisation de la flexion du châssis

### Cas des Charges Dynamique :

Les charges dynamiques devraient être considérées lorsque le véhicule rencontre des surfaces de route inégales.

Par exemple lorsque l'on passe sur des casse-vitesse, les roues peuvent quitter le sol. Lorsque le véhicule retombe les charges sous les essieux sont considérablement augmentées. Selon l'expérience acquise par les constructeurs la charge statique doit être augmentée par un facteur d'amplification :

- 2,5 à 3 pour les véhicules routiers.
- 4 pour les véhicules tout terrain

### III.5.2 La Torsion.

la structure est soumise à un moment autour de l'axe de l'essieu par application de forces vers le haut et vers le bas de part et d'autre de l'axe x.

Nous considérons ici un cas de torsion pure appliqué sous un des essieux et repris par des réactions sous les roues de l'autre essieu.

Le calcul du couple est basé sur les charges sous l'essieu le plus léger. Sa valeur vaut la charge sous la roue multiplié par la voie de l'essieu :

$$M_{tx} = \frac{R \cdot t}{2} \quad (\text{III.4})$$

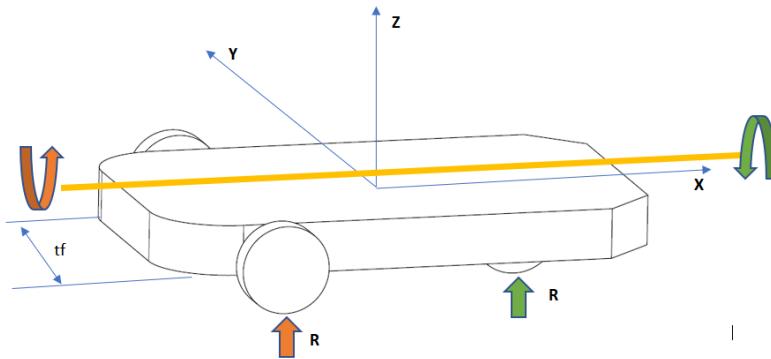


FIGURE III.11 – Schématisation du torsion de châssis

#### Cas des Charges Dynamique :

A nouveau nous devront considérer un chargement dynamique. Selon l'expérience acquises par les constructeurs la charge statique doit être augmentée par un facteur d'amplification :

- 1,3 pour les véhicules routiers,
- 1,8 pour les véhicules tout terrain.

#### III.5.3 La sollicitation Combinée Flexion + Torsion.

en pratique la gravité est toujours présente et la torsion est accompagnée de flexion. La combinaison des cas de charge de flexion et de torsion correspond à la situation où une roue de l'essieu le plus léger se soulève au point de quitter le sol (réaction nulle). La charge de l'essieu est alors totalement reprise par une seule roue.

#### III.5.4 Le chargement Latérale.

création de charge selon l'axe y lorsque l'on prend un virage ou que l'on touche une bordure Les cas de charges latérales et d'accélération / décélération sont surtout importants pour le calcul des éléments de suspension et des points d'ancrage des suspensions dans le châssis.

Lorsque l'on prend un virage, les pneus reprennent les forces centrifuges :

$$F_{cent} = \frac{m \cdot V^2}{R_{cent}} \quad (\text{III.5})$$

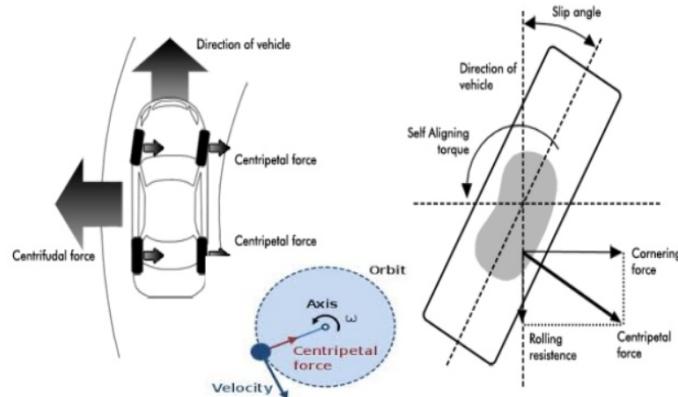


FIGURE III.12 – Représentation de la force Centrifuge

La situation la plus défavorable survient lorsqu'on est à la limite du retournement, toute la charge repose alors sur la seule roue extérieure. La structure est cette fois considérée comme une poutre dans le plan horizontal xy.

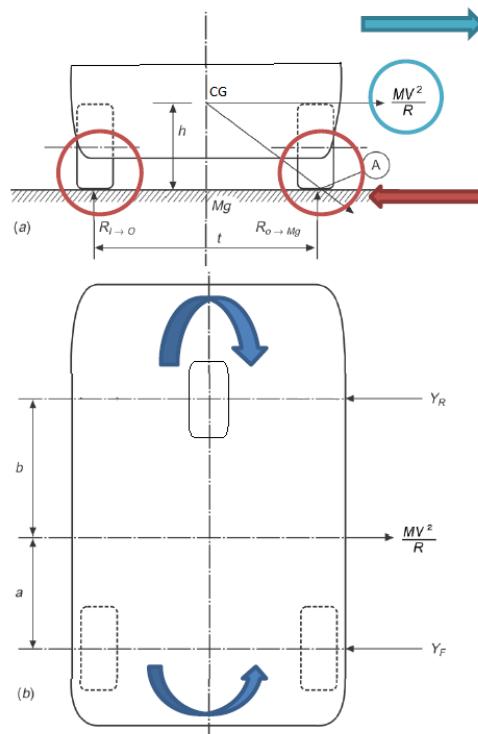


FIGURE III.13 – Les paramètres de la force latérale

L'accélération latérale pour laquelle la situation critique survient est obtenue en écrivant l'équilibre en rotation du véhicule :

$$F_{cent} = \frac{m \cdot V^2}{R_{cent}} \cdot h = m \cdot g \frac{t}{2} \quad (\text{III.6})$$

L'accélération critique est donnée par :

$$\frac{V^2}{R_{cent}} = g \frac{t}{2.h} \quad (\text{III.7})$$

La force centrifuge vaut :

$$\frac{m.V^2}{R_{cent}} = m.g \frac{t}{2.h} \quad (\text{III.8})$$

La force latérale sous l'essieu avant :

$$Y_F = \frac{mV^2}{R_{cent}} \cdot \frac{b}{a+b} \quad (\text{III.9})$$

La force latérale sous l'essieu arrière :

$$Y_R = \frac{mV^2}{R_{cent}} \cdot \frac{a}{a+b} \quad (\text{III.10})$$

La structure est considérée comme une poutre simplement supportée soumise à un chargement dans le plan xy au travers de son centre de gravité.

Un modèle plus détaillé considère une distribution de charges distribuées ainsi que nous avons procédé pour la flexion sous poids propre. En pratique la situation critique n'arrive jamais à cause de la hauteur du CG et du coefficient de friction :

$$\begin{aligned} h &= 0,51m \\ t &= 1,45m \\ gt/2h &= g1,45/(2 \times 0,51) = 1,42g > \mu g \sim 0,8g \end{aligned}$$

Dès lors aucun coefficient de sécurité n'est souvent considéré. Les charges latérales ne sont pas souvent critiques pour le châssis, car le moment d'inertie est important dans ce plan.

### III.5.5 Le chargement Longitudinal

Les charges longitudinales proviennent des forces d'inertie sur les composants lors des accélérations / décélérations consécutives à une augmentation de vitesse / freinage. Elles s'accompagnent également d'un transfert de charge sous les essieux.

En toute rigueur il faudrait connaître la masse et la hauteur de chaque organe et déterminer les efforts le long de la ligne moyenne du véhicule, mais cela est généralement impossible à cause du manque d'information. On se contente d'un modèle simplifié où toute la masse du véhicule est concentrée au centre de gravité.

Pour une accélération sur les roues avant : La flèche Rouge figure III.14

$$R_F = \frac{m.g(L - a) - mh(\frac{dV}{dt})}{L} \quad (\text{III.11})$$

Pour une accélération sur les roues arrières : La flèche bleue figure III.14

$$R_F = \frac{m.g(L - a) + mh(\frac{dV}{dt})}{L} \quad (\text{III.12})$$

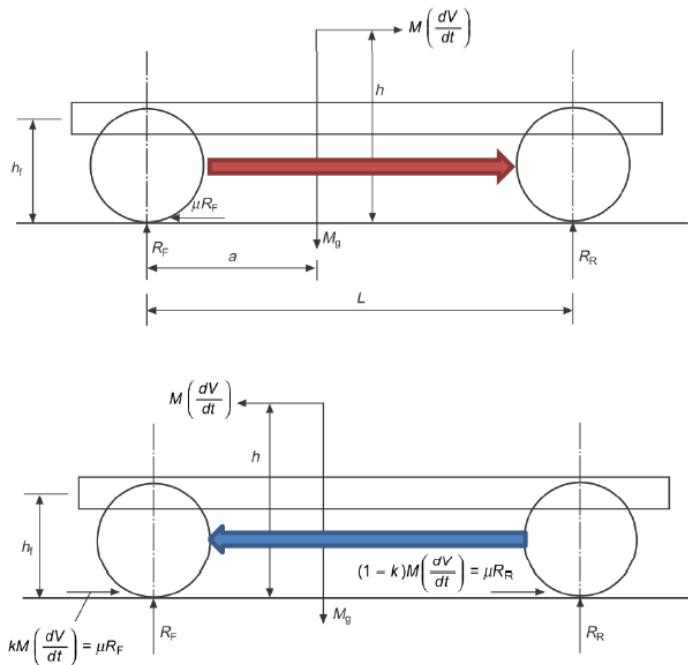


FIGURE III.14 – Le Chargement Longitudinal

### Pour un freinage :

La limitation des forces de freinage et de traction est contrôlée par le coefficient de friction entre les pneus et le sol.

Les forces de traction et de freinage appliquées au niveau du sol entraînent des moments de flexion sur la structure du véhicule à travers les mécanismes de suspension.

De manière similaire, le centre de gravité situé à une certaine hauteur par rapport au châssis conduit également à un moment de flexion.

### III.5.6 Le Chargement Asymétrique.

On assiste à un chargement asymétrique lorsque une roue percute un objet surélevé ou tombe dans un nid de poule et vient contre l'arrêté.

Le cas de figure III.15 entraîne une charge verticale et une charge horizontale appliquée à un coin du véhicule et résulte en un chargement très complexe de la structure. La force exercée dépend de la vitesse, de la raideur de la suspension, de la masse de la roue et de la masse non suspendue, etc.

Comme le choc a lieu sur une période de temps très petite, nous pouvons supposer que la roue poursuit sa trajectoire à vitesse constante et que le choc se transmet

au centre de la roue.

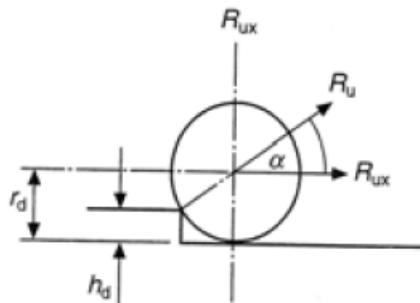


FIGURE III.15 – La roue percute un objet surélevé

Force horizontale : La force horizontale entraîne un moment additionnel de flexion dans le plan vertical xz et un moment autour de z sur la structure.

$$R_{ux} = R_u \cos \alpha \quad (\text{III.13})$$

Force verticale : La composante verticale cause une charge supplémentaire sur l'essieu, une charge d'inertie sur le centre de masse du véhicule et un moment de torsion sur la structure du véhicule

$$R_{uz} = R_u \sin \alpha \quad (\text{III.14})$$

Angle : Augmente pour des petites roues

$$\alpha \simeq \left( \frac{r_d - h_u}{r_d} \right) \quad (\text{III.15})$$

Le cas de charge asymétrique peut donc être traité comme la superposition de 4 cas de charge.

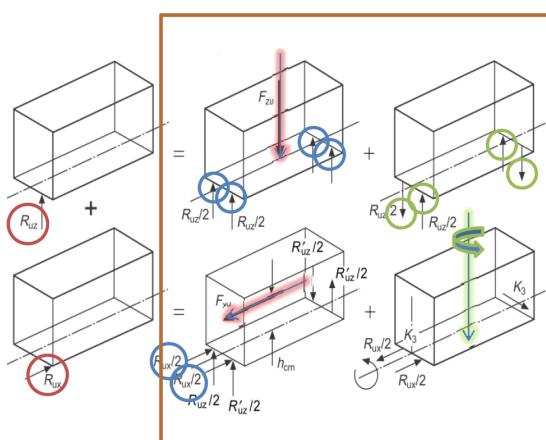


FIGURE III.16 – Superposition des chargements

## III.6 Les Conditions Résistance : Contraintes admissibles les Cas de Charges

Les cas de charge précédents conduisent à l'évaluation de contraintes à travers la structure. Dans les cas critiques, celles-ci doivent rester inférieures à une limite tolérable.

Nous considérons également des facteurs de sécurité :

- Facteur dynamique
- Facteur de sécurité : typiquement 1.5

Une approche similaire est appliquée pour la résistance à la fatigue, même si la résistance à la fatigue est examinée de préférence dans les endroits de concentration de contrainte, dans les joints de montage des suspensions.

## III.7 Sélection du Châssis

Jusqu'à présent nous avons déterminé les charges et les contraintes de la structures, ce qui nous indique si la structure est assez résistante. Un critère aussi important, certains disent plus important, est la raideur de la structure.

La structure peut être résistante mais trop souple, la raideur requise peut être déterminée par des questions de tolérancement, de vibrations, de tenue de roue, d'expérience du constructeur.

### III.7.1 La Rigidité Torsionnelle

#### Définition

Le facteur le plus important pour concevoir un châssis dans le monde de carrosserie c'est le **La rigidité torsionnelle** (Torsional Stiffness) figure III.17, qui aide aussi de trouver une configuration optimale de la suspension **anti-roll Stiffness<sup>1</sup>**, avec que la rigidité de torsion du châssis doit être élevé par rapport à la rigidité de système de suspension. Également la rigidité du châssis influe aussi sur l'équilibre de transfert de charge latérale entre les roues avant et arrière [6].

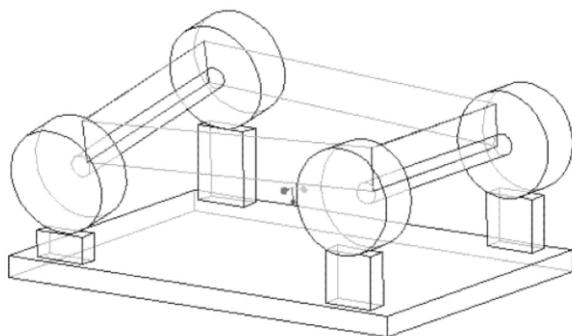


FIGURE III.17 – Schématisation du torsion longitudinal du châssis

1. **Anti-roll stiffness** : Est la rigidité d'un objet ou la mesure dans laquelle il résiste au roulement ou à la torsion en réponse à une force de rotation appliquée.

## Approche et Modélisation

Différentes approches existent qui lie la rigidité torsionnelle nécessaire du système de suspension (plus précisément l'élément **anti-roll bar**<sup>2</sup> figure III.18 et figure III.19) avec la rigidité du châssis. En général, les valeurs estimées de la rigidité du anti-roll bar (élément de suspension) varient de **2 à 10** fois la rigidité du châssis. par exemple si il est équipé d'une rigidité anti-roulis d'environ 50 kNm/rad en avant et en arrière. La rigidité du châssis la plus élevée (cas haut performance et aussi est pour une structure monocoque complète) est d'environ 300 kNm/rad .Alors La rigidité moyenne assimilé est de 140 kNm/rad pour un châssis de performance moyenne par exemple .



FIGURE III.18 – Exemple d'élément de suspension Anti-roll bar



FIGURE III.19 – Autre système Anti-roll bar

Une rigidité très élevée est généralement très favorable, mais une pénalité de poids sévère, donc la rigidité par kilogramme de châssis - ou rigidité spécifique - est une mesure plus appropriée.

En outre, augmenter la rigidité du châssis n'est pas très efficace au-dessus d'une certaine valeur alors **une valeur optimale** de la rigidité intervienne . Pour illustrer ce rapport, on modélise le véhicule comme trois tubes de torsion en série figure III.20; un tube avant et arrière représentant la rigidité du système de suspension en torsion  $K_{susp}$  et un pour le châssis avec la rigidité  $K_{chassis}$  . Leur rigidité respective peut être additionnée pour représenter la résistance totale du véhicule au torsion  $K_{veh}$  . Pour le rendre plus clair  $K_{veh}$  est ensuite divisé par la rigidité totale de la suspension pour indiquer la rigidité relative  $K_{rel}$  équations III.16 et III.17.

2. **Anti-roll bar** : Est nommé aussi roll bar, anti-sway bar, sway bar, stabilizer bar

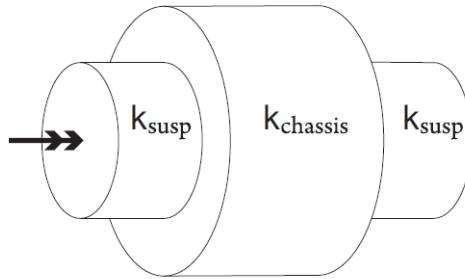


FIGURE III.20 – Modèle simplifié de la suspension et rigidité de torsion du châssis

$$\frac{1}{K_{veh}} = 2 \cdot \frac{1}{K_{sup}} + \frac{1}{K_{chassis}} \quad (\text{III.16})$$

Avec :

$$K_{rel} = \frac{K_{veh}}{\sum_1^n \frac{1}{K_{sup}}} = \frac{K_{veh}}{\frac{2}{K_{sup}}} \quad (\text{III.17})$$

D'après les équations III.16 et III.17 nous admettons en fin :

$$K_{rel} = \frac{1}{2} \left( \frac{K_{sup}^2 \times K_{chass}}{2 \cdot K_{chass} + K_{sup}} \right) \quad (\text{III.18})$$

En supposant que la résistance à la torsion assurée par système de suspension en avant et en arrière est représentée par la rigidité anti-roulis  $K_{susp} = 25 \text{ kNm/rad}$  avant et arrière , (c'est une valeur approchée pour un système similaire au projet ), nous pouvons tracer la rigidité totale du véhicule (rigidité relative ) en fonction de la rigidité du châssis Figure III.21. Il est clair que plus de **90%** des châssis, soit environ **4 fois** la rigidité anti-roulis, il devient moins intéressant de payer une pénalité de poids de plus en plus importante pour seulement de légères améliorations de la rigidité du véhicule.

La rigidité anti-rolis ou la rigidité de suspension  $K_{susp}$  est calculée normalement par la formule suivante :

$$K_{susp} = \frac{GJ}{r^2 L} \quad (\text{III.19})$$

Avec :

- **G** : Module d'élasticité transversal ou module de coulomb ( PA)
- **J** : Moment quadratique polaire (  $m^4$ )
- **r** : Longueur de cantilever (  $m$ ), c'est la longueur entre la bar de torsion (anti-roulis bar) et le châssis.
- **L** : La longueur de la bar anti-roll (  $m$ ) .

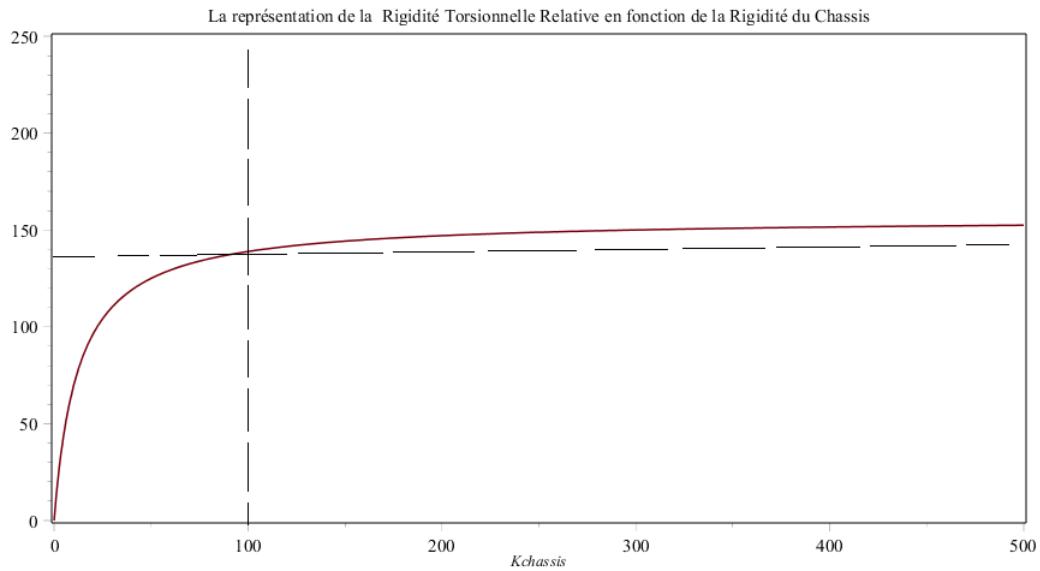


FIGURE III.21 – La rigidité relative en fonction de la rigidité du châssis et le point optimale de rigidité du châssis

### III.7.2 Typologie des Châssis

Dans cette partie nous nous intéressons à étudier des différents types de châssis avec l'appréciation de :

- De leur aptitude à supporter les charges.
- Des aspects de fabrication et des coûts de production.

Différents types de châssis :

1. Châssis Ladder ou Châssis en H / en échelle
2. Châssis cruciforme
3. Châssis avec tube de torsion
4. Châssis tubulaire
5. Châssis intégral ou monocoque

#### Châssis Ladder ou Châssis en H / en échelle :

Commençons la classification par un bon vieux châssis .Le châssis en échelle est connu pour se placer sur les modèles utilitaires. Il est toujours utilisé à l'heure actuelle et à toujours son succès. Il est appelé comme tel parce que, quand on le regarde, il ressemble tout simplement à une échelle. Deux longerons se placent de chaque côté latéral du châssis, et elles sont reliées par des traverses en différents endroits, servant à maintenir le bon écart entre les deux longerons.

Avantage majeur :

- Il s'accommode d'une très grande variété de formes et de types de carrosserie et de superstructure.
- Il est encore utilisé très couramment pour les véhicules utilitaires depuis les pick-up jusqu'aux camions.



FIGURE III.22 – Châssis Ladder ou Châssis en H

### Châssis cruciforme

Ce type de châssis est destiné pour augmenter la raideur en torsion, nous pouvons concevoir une structure en croix dans laquelle aucun élément n'est soumis à torsion. Les deux poutres de la croix sont uniquement sollicitées en flexion. Et la raideur en torsion de l'ensemble est bonne pourvu que la raideur du joint central soit élevée. Le moment de flexion maximal apparaît à cet endroit qui est dès lors critique.

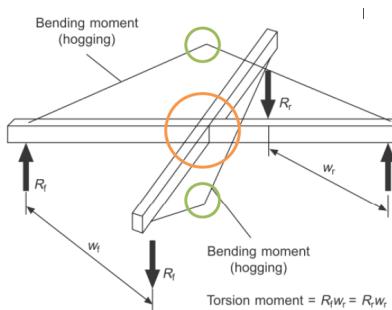


FIGURE III.23 – Châssis cruciforme

Nous combinons généralement les avantages des châssis en échelle et des châssis en croix dans une structure en échelle renforcée par une croix. Nous obtenons à la fois une bonne raideur en flexion et en torsion, les traverses avants et arrières participent à la reprise des efforts latéraux et des moments de torsion.

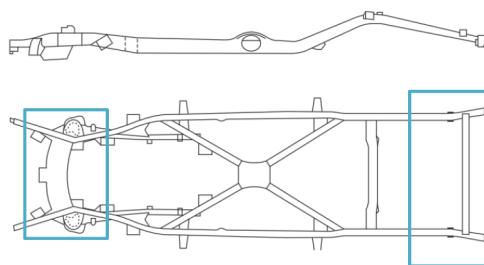


FIGURE III.24 – Châssis Combiné : chassis en H et cruciforme

### Châssis avec tube de torsion

Les sections fermées possèdent une raideur en torsion très importante. Cette propriété est utilisée dans les châssis en tube de torsion tels que ceux de la Lotus. La colonne vertébrale du châssis est un large tube unique à section fermée.



FIGURE III.25 – Châssis avec tube de torsion

Des tubes à l'avant et à l'arrière étendent le points de montage de la suspension tandis que des traverses permettent de mieux résister aux efforts latéraux. En outre la colonne vertébrale est soumise à des charges de torsion et à flexion. Les colonnes de fixation des suspensions sont soumises à de la flexion.

Les traverses travaillent en traction compression contre les efforts latéraux venant de la suspension.

### Châssis tubulaire

Les structures précédentes étaient essentiellement bidimensionnelles excepté l'épaisseur des composants. En recourant à une structure tridimensionnelle nous améliorons les propriétés de flexion et de torsion en augmentant les moments d'inertie.



FIGURE III.26 – Châssis tubulaire

Les structures en treillis 3D sont utilisées pour les voitures de course, les voitures à caractère sportif ou les voitures à faible volume de production. Cette structure 3D se marie aisément avec des carrosseries en matériaux composites.

Les éléments des structures en treillis doivent impérativement travailler en traction compression au risque de voir la raideur diminuer fortement, car c'est alors la raideur des joints (qui est faible) qui est sollicitée. Il est donc impératif de trianguler toutes les surfaces pour bloquer les degrés de liberté adéquats.

### Châssis intégral ou monocoque

Les voitures modernes sont presque exclusivement des structures intégrales faites des tôles d'acier embouties et soudées par points. Les composants jouent à la fois une fonction structurale et d'autres fonctions (aérodynamique par exemple).

La raideur de la structure (notamment en flexion et torsion) tire parti de tous les composants, spécialement les plus éloignés de la ligne neutre comme le toit.



FIGURE III.27 – Châssis Monocoque

L'analyse structurale d'une telle structure est évidemment compliquée et nécessite le recours à l'analyse par éléments finis. La structure est fortement indéterminé et le chemin des efforts peut être redistribué sur les différents composants.

La structure offre une plus grande raideur pour un poids donné par rapport à une solution avec un châssis et une carrosserie séparées. Le châssis peut être produit en grande série avec un coût modéré. Le confort (particulièrement acoustique) est supérieur.

### III.7.3 Le Châssis Choisi

D'après le cahier des charges fonctionnel et à l'égard de ce que nous avons vu précédemment sur la typologie et les caractéristiques de chaque type de châssis. Le châssis **LADER** ou **chassis en H** c'est la solution la plus adéquate pour répondre nos besoins ,il a une bonne résistance longitudinale en raison de ses rails continus de l'avant à l'arrière , mais une faible résistance à la torsion ou déformation ,pour résoudre cette problématique ce dernier sera renforcé par des traverses sont utilisées pour gagné plus de rigidité torsionnelle.

## III.8 Le Modèle 3D du Châssis Choisi

Avant de construire le modèle tridimensionnel du châssis il faut d'abord préciser le type du profilé de la poutre et la dimensionner. Vu que nous avons la flexion comme une sollicitation dominante et que la torsion est assez faible, nous pouvons choisir alors le profilé section en U ou poutre UPE c'est le plus adéquat et optimal pour notre châssis.

### III.8.1 Le Dimensionnement du châssis

Une approche basique adoptée pour dimensionner les châssis c'est de considérer le châssis comme une seule poutre soumise au chargement répartie le long de sa longueur ,et d'après la condition de résistance nous pouvons déterminer les dimensions de la poutre choisie. [7] et [11].

La figure suivante III.28 illustre la poutre étudiée appuyée sur deux appuis articulés pivot :

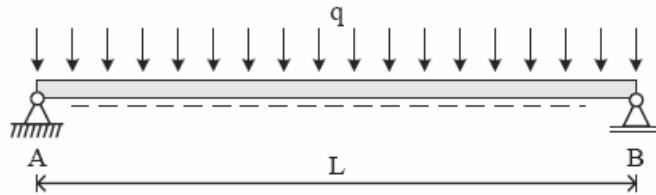


FIGURE III.28 – Modélisation du châssis par une poutre appuyée en deux appuis simples

Le moment  $M(x)$  décrit une fonction parabolique figure III.29 le long de la poutre.

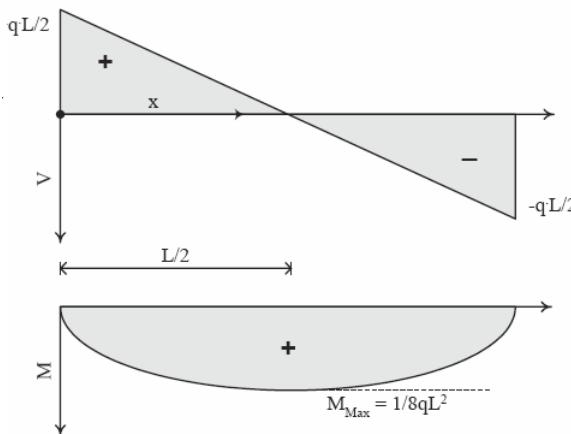


FIGURE III.29 – Diagrammes des efforts de cohésion

Sa valeur est maximale en  $x = \frac{L}{2}$  ou elle vaut :

$$M_{max} = M\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{L}{4}q\left(L - \frac{L}{2}\right) = \frac{1}{8}qL^2 \quad (\text{III.20})$$

$$M_{max} = \frac{1}{8} \times 1634 \times 0.6^2 \simeq 73.5 N.m$$

Avec :

- **q** : la densité linéaire  $q = \frac{Q}{L} = 1634 N/m$
- **L** : La Longueur du châssis L=0.6 m.
- **Q** : La résultante calculée précédemment figure III.8.

#### La condition de résistance de la flexion :

$$\sigma_{max} \leq R_{pe} \quad (\text{III.21})$$

$$\frac{M_{max}}{IG} \times c \leq R_{pe}$$

Dans le marché il existe plusieurs poutres UPE d'aluminium en dimensions variées annexe A tableaux A.6,A.7 et [5] , nous choisissons alors le plus petit profilé disponible c'est UPE 80 et puis on vérifie si ce dernier peut satisfaire la condition de résistance ou non, équation III.9.

#### Les propriétés et les dimensions de la poutre UPE 80 :

- Propriétés mécanique d'aluminium
  - la masse volumique  $\rho = 2700 kg/m^3$
  - La limite élastique pratique  $R_{pe} = 125 MPa$
- Propriétés de la section UPE 80 :
  - Le moment d'inertie  $IG = 2.680 cm^4$  .
  - $h=80 mm$ .
  - $b=50 mm$ .
  - $a=4 mm$ .
  - $e=7 mm$ .
  - Position de l'axe neutre  $c=20 mm$ .

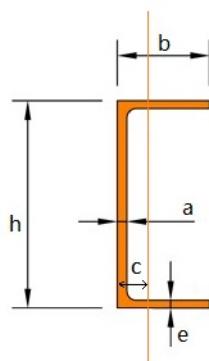


FIGURE III.30 – Caractéristiques géométriques UPE 80

nous calculons la contrainte maximale  $\sigma_{max}$  :

$$\sigma_{max} = \frac{73.5 \times 10^3}{2.680 \times 10^4} \times 20 \simeq 55 MPa$$

La valeur  $\sigma_{max} = 55 MPa$  est inférieur à  $Rpe = 135 MPa$ , nous pouvons dire alors que l'UPE 80 est adéquat pour la construction de châssis, sans oublier que le châssis contiendra deux traverse en parallèle plus une cruciforme au milieu pour résister le torsion ,ce qui montre que le châssis sera beaucoup rigide et bien dimensionné .

## Conclusion

Le chapitre a présenté la première forme extérieure du robot ainsi le critère dû choix de son châssis et le dimensionnement de sa poutre principale . Le prochain chapitre attaquera l'aspect théorique du calcul cinématique en précisant les formulations et les approches choisis des robots similaires.

## CHAPITRE

## IV

ETUDE CINÉMATIQUE DU  
ROBOT

Ce chapitre présente une description détaillée du mouvement du robot ainsi son schéma cinématique .Les objectifs de cette étude c'est d'établir les vitesses du robot  $[\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta}]$  en fonction des vitesses de rotations des roues  $\dot{\varphi}_i$  et les paramètres géométrique  $\beta_i$  comme des paramètres cinématiques du contrôle pour l'asservissement automatique . ainsi la création du schéma cinématique du robot.

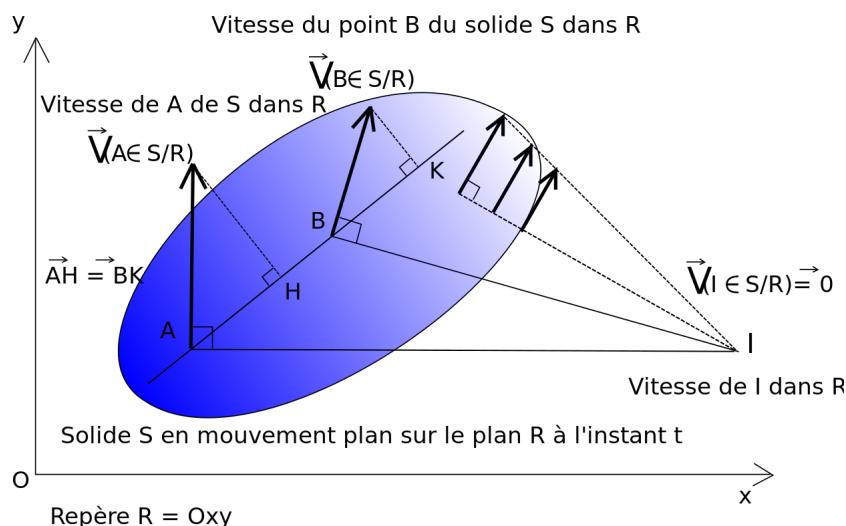
## IV.1 Terminologie et Définition :

### IV.1.1 Le Centre Instantané de Rotation CIR

#### Définition

Le centre instantané de rotation est un terme utilisé en cinématique pour désigner l'axe autour duquel tourne un solide à un instant donné par rapport à un référentiel.

Le centre instantané de rotation ou CIR est un point qui pour tout solide en mouvement plan a une vitesse nulle à un instant considéré. Ce point ne se situe pas forcément sur le solide en question. On peut trouver ce point si l'on connaît entièrement un vecteur vitesse (c'est-à-dire sa direction, son sens et sa norme) et si l'on connaît la direction d'un autre vecteur vitesse figure IV.1.



Le point I est le centre instantané de rotation (CIR) à

FIGURE IV.1 – Le centre instantané de rotation

#### Propriété importante

Le CIR est situé à l'intersection des perpendiculaires de tous les vecteurs vitesse d'un solide. Cette propriété peut nous permettre à l'inverse de trouver les caractéristiques d'un vecteur vitesse inconnue.

## IV.2 Cinématique Inverse et Directe

#### Définition

La cinématique inverse (souvent abrégée IK, de l'anglais inverse kinematics) désigne l'ensemble des méthodes de calcul des positions et rotations d'un modèle articulaire afin d'obtenir une pose désirée. Les méthodes de cinématique inverse sont principalement utilisées en infographie, en robotique, en animation ou encore en chimie. Le terme cinématique inverse renvoie au fait que la résolution des calculs est généralement basée sur les équations cinématiques du modèle articulaire .

Les principes de la cinématique inverse sont les suivants :

- Les membres sont des solides indéformables, de longueur donnée, reliés entre eux par des articulations.
- Les articulations supportent une certaine torsion maximale, qui varie selon la direction ou la vitesse .
- Les mouvements sont supposés suffisamment réguliers pour paraître naturels.

La cinématique directe (FK Forward kinematics) se réfère à l'utilisation des équations cinématiques d'un robot pour calculer la position nommée "End Effector" à partir de valeurs spécifiées des paramètres d'entrée spécifiés figure IV.2.

### IV.2.1 Le Jacobien

#### Définition

En analyse vectorielle, la matrice jacobienne est la matrice des dérivées partielles du premier ordre d'une fonction vectorielle en un point donné. Son nom vient du mathématicien Charles Jacobi. Le déterminant de cette matrice, appelé jacobien, joue un rôle important pour l'intégration par changement de variable et dans la résolution de problèmes non linéaires figure IV.2

Les dérivées partielles de ces fonctions en un point M, si elles existent, peuvent être rangées dans une matrice à m lignes et n colonnes, appelée matrice jacobienne de F :

$$J_F(M) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{pmatrix}.$$

Avec F :

$$F : \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} f_1(x_1, \dots, x_n) \\ \vdots \\ f_m(x_1, \dots, x_n) \end{pmatrix}.$$

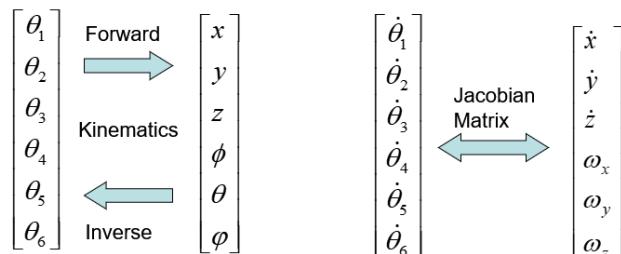


FIGURE IV.2 – Figure synthétique des terminologies cinématiques

## IV.3 Modélisation Mathématique

### IV.3.1 La géométrie et la cinématique du robot

Les paramètres géométriques et cinématiques de ce robot différentiel sont définis, le vecteur position-d'orientation et le vecteur vitesse respectivement , [19] :

$$\boldsymbol{p} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix}, \dot{\boldsymbol{p}} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.1})$$

**Hypothèses :**

1. Les roues roulent sans glissement (RSG)
2. L'axe de guidage (Steering Axis ) est perpendiculaire au plan du mouvement
3. Le point Q concide avec le centre de gravité G  $\|\vec{QG}\| = 0$ .

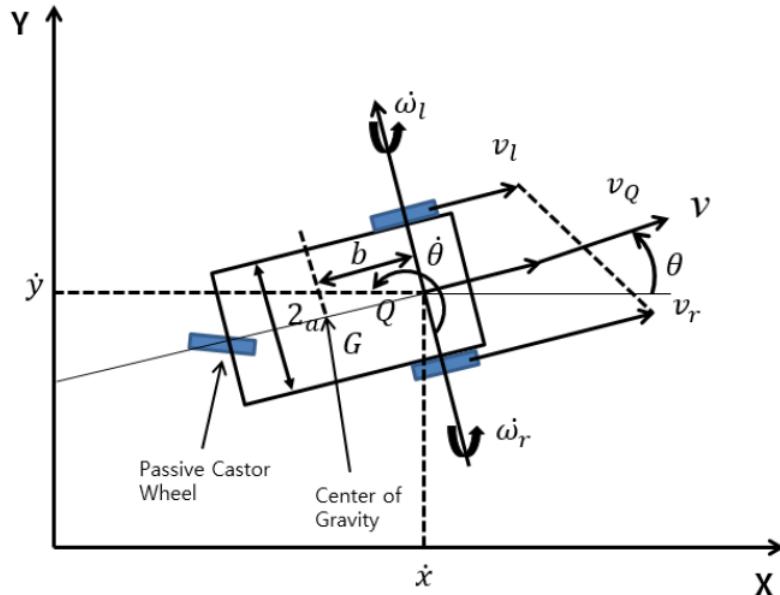


FIGURE IV.3 – Les paramètres géométriques cinématiques du robot

#### Remarque

Le point Q et G sont représentés décalés par une distance b pour la raison de la réutilisation dans les parties suivantes.

Nous posons  $v_l$  et  $v_r$  les vitesses linéaires de la roue gauche et droite respectivement et  $v_Q$  est la vitesse de mi-point du robot .

$$v_r = v_Q + a\dot{\theta}, v_l = v_Q - a\dot{\theta} \quad (\text{IV.2})$$

L'addition et la soustraction de  $v_l$  et  $v_r$  donne :

$$v_Q = \frac{1}{2}(v_r + v_l), 2a\dot{\theta} = v_r - v_l \quad (\text{IV.3})$$

Alors le modèle cinématique du robot est décrit par les relations suivantes :

$$\dot{x} = \frac{r}{2}(\dot{\omega}_r \cos \theta + \dot{\omega}_l \cos \theta) \quad (\text{IV.4})$$

$$\dot{y} = \frac{r}{2}(\dot{\omega}_r \sin \theta + \dot{\omega}_l \sin \theta) \quad (\text{IV.5})$$

$$\dot{\theta} = \frac{r}{2a}(\dot{\omega}_r + \dot{\omega}_l) \quad (\text{IV.6})$$

Le modèle peut être aussi écrit par sous la **forme affine sans dérive**.

$$p = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} \cos \theta \\ \frac{r}{2} \sin \theta \\ \frac{r}{2a} \end{bmatrix} + \dot{\omega}_r + \begin{bmatrix} \frac{r}{2} \cos \theta \\ \frac{r}{2} \sin \theta \\ -\frac{r}{2a} \end{bmatrix} \dot{\omega}_l \quad (\text{IV.7})$$

Or

$$\dot{p} = J\dot{q}$$

Avec  $p = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix}$ ,  $\dot{p} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$  et  $J$  est la Jacobien du Robot :

$$J = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} \cos \theta & \frac{r}{2} \cos \theta \\ \frac{r}{2} \sin \theta & \frac{r}{2} \sin \theta \\ \frac{r}{2a} & -\frac{r}{2a} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.8})$$

Nous avons un robot sous contrainte nonholonomique ce qui donne :  $-s \sin \theta + y \sin \theta = 0$ . Alors la vitesse  $v_Q$  est :

$$v_Q = \dot{x} \cos \theta + \dot{y} \sin \theta \quad (\text{IV.9})$$

La matrice jacobien  $J$  a trois lignes et 2 deux colonnes est non réversible , alors  $\dot{q}$  est donné par :

$$\dot{q} = J^{-1}\dot{p} \quad (\text{IV.10})$$

Tel que  $J^{-1}$  est l'inverse de  $J$ .Et l'équation IV.5 devient :

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_r \\ \dot{v}_l \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & a \\ \cos \theta & \sin \theta & -a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.11})$$

Ainsi la contrainte nonholonomique peut être écrit :

$$M\dot{p} = 0, M = \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.12})$$

### IV.3.2 Le principe de guidage du robot

Généralement, le robot change ses mouvements en fonction de la vitesse de chaque roue. Quand le robot se déplace le long d'un chemin droit, ses deux roues ont la même vitesse. En revanche, lorsque le robot est tourné, la direction de rotation et la courbure sont déterminés en tenant compte de la proportion entre les vitesses des deux roues. Dans le cas où le robot subit un mouvement de rotation. il existe un point central appelé le CIR (centre instantané de rotation).

La figure IV.4 montre l'emplacement et la vitesse du robot mobile tournant avec un rayon de rotation  $R$  , basé sur son CIR (centre de rotation instantané).

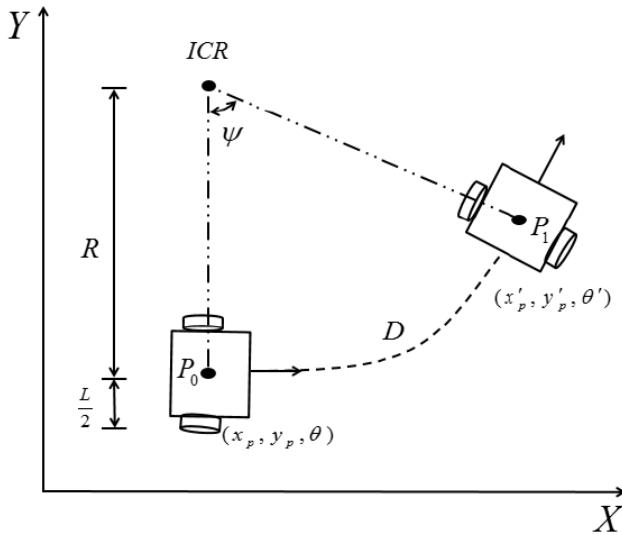


FIGURE IV.4 – Le CIR du robot

Il y a un point central en cas de mouvement de rotation du robot . Le rayon instantané R est donné par :

$$R = \frac{L}{2} \left( \frac{v_r + v_l}{v_r - v_l} \right), v_r \geq v_l \quad (\text{IV.13})$$

Dans la figure IV.4 lorsque le robot mobile se déplace du point  $P_0$  (temps =t) au point  $P_1$  (temps =t+Δt) ses emplacements sont donnés par  $(x_p, y_p, \theta)$  et  $(x'_p, y'_p, \theta')$  respectivement .Les coordonnées du CIR sonr exprimées par :

$$CIR = [x_p - R \cdot \sin \theta \quad y_p + R \cdot \cos \theta] \quad (\text{IV.14})$$

Pour un pas de temps de  $\Delta t$  l'emplacement du robot  $(x'_p, y'_p, \theta')$  est exprimé par l'équation IV.15 moyennant l'emplacement initiale et la vitesse angulaire du robot et l'emplacement du CIR .

$$\begin{bmatrix} x'_p \\ y'_p \\ \theta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi \cdot \Delta t) & -\sin(\psi \cdot \Delta t) & 0 \\ \sin(\psi \cdot \Delta t) & \cos(\psi \cdot \Delta t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p - ICR_x \\ y_p - ICR_y \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} ICR_x \\ ICR_y \\ \psi \cdot \Delta t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \sin(\psi \cdot \Delta t) + ICR_x \\ -R \cos(\psi \cdot \Delta t) + ICR_y \\ \theta + \psi \cdot \Delta t \end{bmatrix} \quad (\text{IV.15})$$

En outre, les expressions numériques de la distance totale de déplacement , D , du robot de.  $P_0$  à  $P_1$  et l'angle de rotation,  $\phi$  , sont exprimés comme suit :

$$D = \int_t^{t+\Delta t} V dt = \int_t^{t+\Delta t} \frac{v_l + v_r}{2} dt \quad (\text{IV.16})$$

$$\phi = \frac{D}{R} = \frac{\int_t^{t+\Delta t} (v_l + v_r) dt}{L(v_l + v_r)} \cdot (v_r - v_l) \quad (\text{IV.17})$$

L'équation ci-dessus peut être utilisé pour mesurer le rayon de rotation, la distance de déplacement, le. l'angle de rotation et la vitesse linéaire et la vitesse de rotation du robot .

### IV.3.3 Rayon de rotation et distance de déplacement en fonction de l'emplacement des points des positions souhaitées "Target points"

Lorsque le robot essaie de se déplacer vers les emplacements cibles , la courbure doit être déterminée en fonction de la distance et de l'angle de la cible. En termes du commande de suivi de robot, comme le rayon de rotation augmente, la distance à traverser par le robot aussi augmente, ainsi le temps nécessaire du mouvement.Si le rayon de rotation diminue, les roues du robot ont tendance à glisser plus.

Par conséquent, il est nécessaire de choisir un rayon de rotation approprié pour le robot . Dans cette étude, lorsque le robot mobile se déplace à l'emplacement des cibles, son rayon de rotation est déterminé en fonction de la distance et de l'angle de la cible.

#### Détermination du rayon de rotation

Pour déterminer le rayon de rotation du robot , R et CIR peuvent être calculés quand les cibles sont situées à une distance temporaire D avec une pente R en direction direct .

La figure IV.5 montre la méthode de détermination du rayon de rotation en fonction de la distance et de l'angle entre le robot et les cibles. Le CIR existe sur la même ligne des deux roues du robot .

$$R = \frac{D}{2 \cdot \cos(\frac{\pi}{2} - \theta_r)} \quad (\text{IV.18})$$

Avec :  $\theta_r \in [0 - \frac{\pi}{2}]$  .

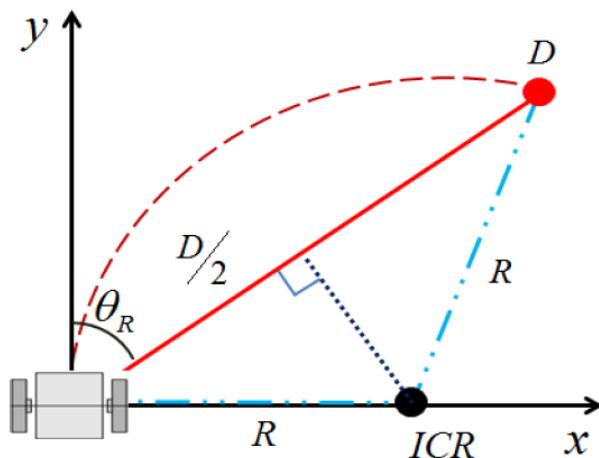


FIGURE IV.5 – Rayon de rotation en fonction de la position de la cible

#### Distance de la courbure du mouvement

La distance de déplacement, est calculée par la formule :

$$S = 2\pi R \left( \frac{2\theta_r}{360} \right) \quad (\text{IV.19})$$

### Contrôle de la vitesse et l'accélération du robot

**Détermination de la vitesse en fonction du rayon de rotation** Le suivi de courbure du robot a été déterminé en fonction de la proportion entre les vitesses de ses deux roues. Lorsque la vitesse angulaire est constante, la vitesse linéaire de chaque roue est proportionnelle à son rayon de rotation. Par conséquent, il est possible de calculer les vitesses de la roue droite et gauche pour une courbure spécifique en utilisant l'équation suivante :

$$v_L : v_R = R - \frac{L}{2} : R + \frac{L}{2} \quad (\text{IV.20})$$

Nous aurons aussi le rayon de rotation R peut être exprimé par :

$$R = \frac{L}{2} \frac{v_R + v_L}{v_R - v_L} \quad (\text{IV.21})$$

D'après l'équation ci-dessus, lorsque  $v_R = v_L$ ,  $R = \infty$ . Par conséquent, le robot se déplace en ligne droite . Si  $v_R \neq v_L$  le robot navigue le long d'une ligne courbe (une orbite ronde) ainsi comme le différence. entre  $v_R$  et  $v_L$  augmente R diminue.

$$v_R = \left(1 + \frac{L/2}{R}\right).V \quad (\text{IV.22})$$

$$v_L = \left(1 - \frac{L/2}{R}\right).V \quad (\text{IV.23})$$

### Limitations cinématique du robot

Pour suivre un objet en mouvement efficacement, il est essentiel de mettre en place le chemin du robot. Pour une planification optimale de trajectoire et minimisation des erreurs liées au suivi, les conditions suivantes sont définies en tenant compte de la stabilité :

$$|v_L|, |v_R| \leq v_{max} \quad (\text{IV.24})$$

$$|a_L|, |a_R| \leq a_{max} \quad (\text{IV.25})$$

Les vitesses des roues gauche et droite du robot mobile sont indiquées par  $v_L$  et  $v_R$ , et leurs accélérations sont respectivement notées  $a_L$  et  $a_R$ .

## IV.4 Schéma cinématique du robot

Le schéma cinématique donne quant à lui une représentation simplifiée permettant une meilleure compréhension du fonctionnement (aspect cinématique). Le schéma cinématique revêt deux fonctions principales en mécanique :

- aide à la conception en donnant le principe cinématique de fonctionnement.
- aide à la compréhension du dispositif existant.

Nous pouvons aussi dire que c'est une représentation d'un mécanisme qui met en évidence les possibilités de mouvements relatifs entre les groupes cinématiquement liés. Les liaisons sont positionnées dans l'espace en situation de fonctionnement. On ne représente ni les épaisseurs de pièces, ni les solutions technologiquement développées.

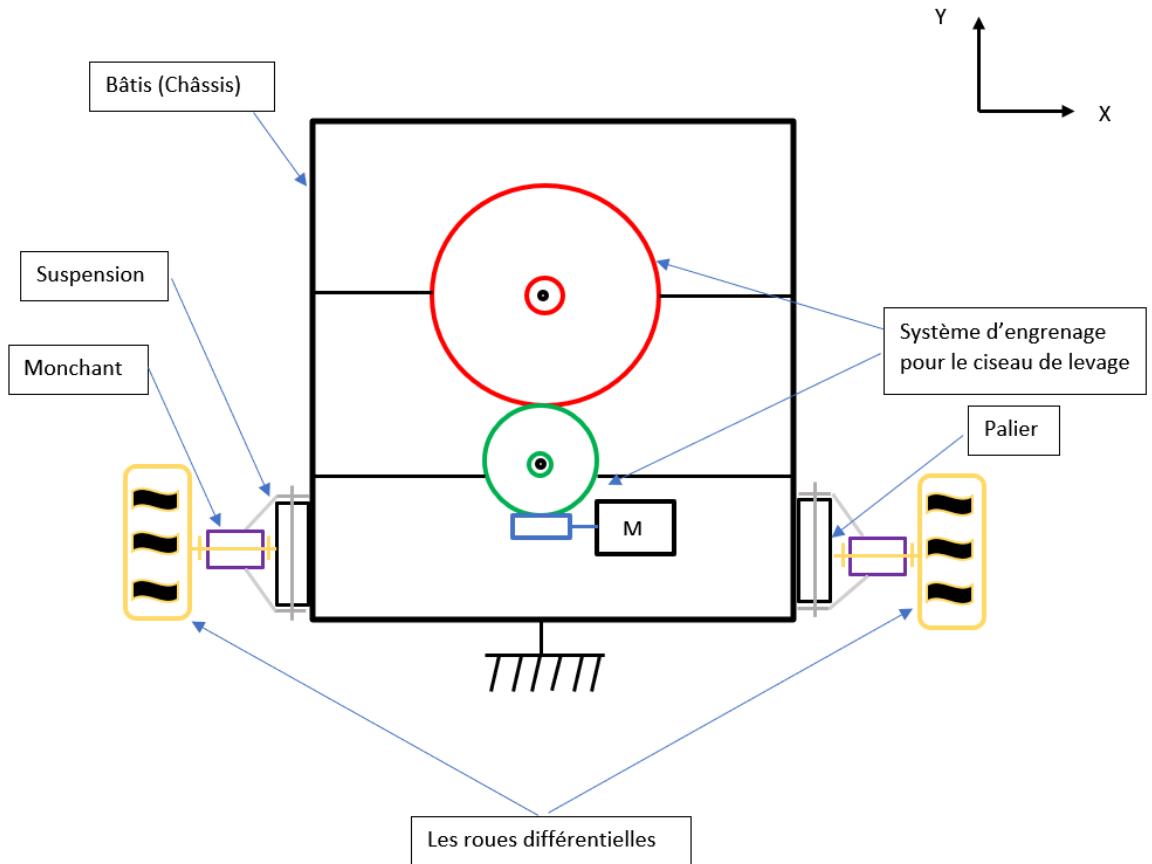


FIGURE IV.6 – Le schéma cinématique du robot vue de dessus

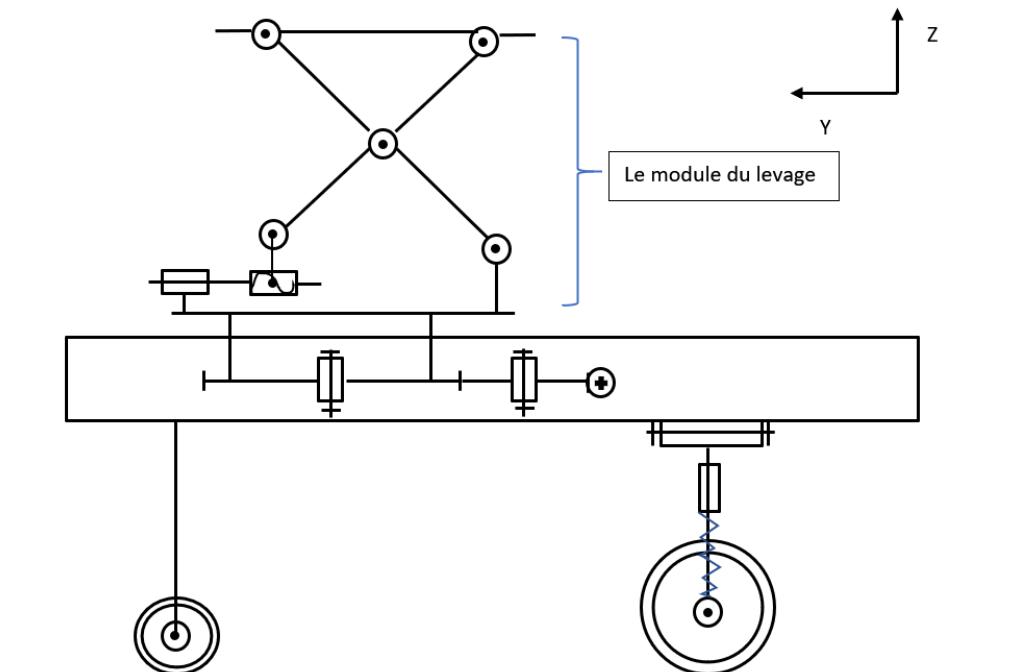


FIGURE IV.7 – Le schéma cinématique du robot vue de gauche

## Conclusion

Dans ce chapitre, pour mieux comprendre l'aspect théorique de la cinématique, nous avons traité les notions de base du calcul qui sera entamé pour la partie d'automatisation du robot (la relation entre les paramètres d'entrée - sortie du robot . Ce chapitre présente les différents types de calcul , parmi eux, la cinématique inverse et directe , finalement nous avons présenté le schéma cinématique relative du robot .

## CHAPITRE

## V

ETUDE DYNAMIQUE ET  
STATIQUE DU ROBOT

Le but principal de ce chapitre est d'effectuer une étude dynamique et vibratoire de la partie châssis ainsi qu'une analyse des contraintes. Pour pouvoir les réaliser , les objectifs suivants ont été fixés :

- L'étude de la puissance d'entraînement
- Étude des modes vibratoires et analyse des contraintes.
- Développement du modèle dynamique du robot et du châssis (2-D simplifié, 2- D, 3-D).
- Conception du système de suspension

## V.1 Calcul de la Puissance

Dans cette partie on va déterminer l'aspect énergétique du système d'entraînement du robot , c'est les calculs de puissance,vitesses,couples et l'accélération et la vérification de ces valeurs trouvés avec celles des moteurs électrique qu'on a déjà dans l'atelier .Pour se faire on suit la méthodologie suivante [15] :

1. Déterminer le poids total et les exigences de traction.
2. Calculer la fréquence de rotation des roues de traction
3. Calculer la puissance/le couple du moteur de traction
4. Conclusion .

### V.1.1 Détermination du poids total et les exigences de traction

Comme on peut pas donner le poids total  $m_t$  du robot par ce qu'on a pas encore déterminé les autres composants et systèmes relatives du robot , on peut que donner des estimations des poids , alors on prend les valeurs qu'on a déjà posé au cours de traitement du cahier des charges ( chapitre II , figure II.1 )  $m_R$  et  $m_C$  .Bien sûr, dans le scénario réel, on doit prendre le poids de chaque partie ou composant du robot.

En évitant d'utiliser des moteurs très puissants et une grosse batterie en limitant la vitesse maximale et l'accélération.on estime également la force de frottement entre la surface d'appui et la charge pour éviter que la charge ne glisse pas vers le bas.

Pour notre objectif, on suppose que la vitesse nominale est de 10 km/h. Cela doit être suffisant. La vitesse maximale dépendra d'autres facteurs qui restent à déterminer. Cependant, on peut s'attendre à ce que la vitesse maximale soit comprise entre 15 et 20 km/h.

Ce Robot n'est pas un véhicule tout-terrain mais on veut qu'il puisse grimper sur la pente figure V.1. soit disant que l'inclinaison maximale de la pente est de 15 % (angle d'inclinaison =  $\tan^{-1}(0,15) \approx 8,5^\circ$ ).

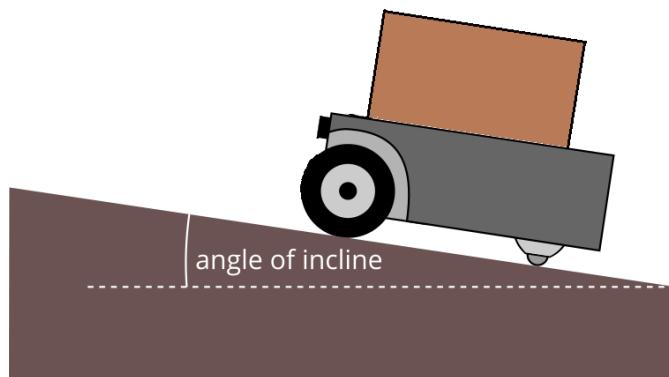


FIGURE V.1 – Le cas d'un terrain incliné

On peut également préciser que le temps d'accélération jusqu'à ce que la vitesse nominale soit atteinte sera de 0,2 s.

En Récapitulant toutes les valeurs :

- Masse du robot  $m_R = 20kg$
- Masse de chargement  $m_C = 100kg$
- Vitesse Nominal  $V_N = 10Km/h$
- Temps d'accélération (pour atteindre la vitesse max )  $t_A = 0.5s$

### V.1.2 Calculer la fréquence de rotation des roues de traction

Il est assez facile de calculer la fréquence de rotation nécessaire. Tout ce qu'on a besoin c'est le diamètre de la roue  $D_R$  et la vitesse nominale du robot  $V_N$ . Supposons un diamètre de roue de  $D_R = 165.1mm$ , et on calcul la fréquence de rotation des roues  $N_R$  :

on sait que la fréquence de rotation équation V.1 et vitesse de rotation angulaire V.2 équation sont exprimées par :

$$N = \frac{\omega \cdot 30}{\pi} \quad (\text{V.1})$$

$$V = \frac{D_R \cdot \omega}{2} \iff \omega = \frac{2 \cdot V}{D_R} \quad (\text{V.2})$$

D'après les deux équations V.1 et V.2 on admet :

$$N = \frac{60 \cdot V_N}{\pi \cdot D_R} = \frac{60 \cdot 10 \cdot 10^3}{\pi \cdot 3600 \cdot 165 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} \simeq 321.33 tr/min \quad (\text{V.3})$$

Avec :

- La vitesse nominale :  $V_N = 10Km/h$
- Le diamètre de la roue  $D_R = 165.1mm$

### V.1.3 Calculer la puissance/le couple du moteur de traction

Si on néglige la friction, on peut estimer alors le couple moteur nécessaire pour monter sur la pente maximale précédemment spécifiée. moyennant le Principe Fondamental de la Dynamique PFD et sous l'hypothèse du mouvement rectiligne uniforme sur la pente , La force de traction  $F_T$ , nécessaire pour dépasser la gravité sur la pente, est la suivante :

$$F_T = g \cdot k(m_R + m_C) = 9.81 \times 0.15(20 + 100) \simeq 177N \quad (\text{V.4})$$

Avec :

- Gravité  $g = 9.81m/s^2$
- Pente Maximal  $K = 15\%$  ( $k = 0.15$ )
- Masse du robot  $m_R = 20kg$
- Masse de chargement  $m_C = 100kg$

Si on veut déplacer le robot vers le haut avec la vitesse nominale, la puissance mécanique nécessaire pour le faire est :

$$P_U = F_T \cdot V_N = 177 \times \frac{10 \cdot 10^3}{3600} \simeq 492W \quad (\text{V.5})$$

Avec :

- La Force de traction  $F_T = 177N$
- La vitesse nominale :  $V_N = 10Km/h$

Alors  $P_U$  C'est la puissance mécanique pour l'ensemble du robot, nous avons donc la moitié de cette puissance 246 w par moteur de traction (par roue différentiel ).

Nous exprimons la puissance cette fois par la formule :

$$P_U = C \cdot \omega = F_T \cdot V_N \quad (\text{V.6})$$

Et moyennant la relation entre la vitesse linéaire et l'angulaire l'équation V.2 on obtient :

$$C = \frac{F_T \cdot V_N}{\omega} = F_T \cdot \frac{D_R}{2} \quad (\text{V.7})$$

Le couple correspondant pour une seule roue de traction est le suivant :

$$C_R = \frac{F_T \cdot V_N}{\omega} = F_T \cdot \frac{D_R}{4} = \frac{177 \times 165 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{4} \simeq 7,4N.m \quad (\text{V.8})$$

Nous avons maintenant estimé les paramètres les plus importants qui sont nécessaires pour pouvoir choisir les moteurs de traction. Bien sûr, pour l'instant, on a négligé la friction, le rendement des moteurs et la boîte de vitesses. De plus, cette estimation n'inclut pas l'accélération à partir de  $v = 0$  et on suppose que le robot est déjà en mouvement.

En fait, pour démarrer le robot nous avons besoin de plus de puissance qu'on a calculé. on récapitule alors ces paramètres :

- La Fréquence de rotation  $N = 321.33tr/min$
- Le Couple par roue  $C_R = 7,4N.m$
- La Puissance par roue  $P_U = 246watts$

#### V.1.4 Conclusion

Au cours de cette étude (les roues différentielles ) on a travaillé sous les hypothèses suivantes :

- Il n'y a pas de pertes entre le mouvement de rotation de l'arbre de sortie et le mouvement linéaire du robot ( la roue roule sans glissement RSG ).
- Le robot fonctionne dans des conditions de charge maximale
- les exigences d'accélération sont négligés

La puissance calculé au chargement critique (poids maximal et pente de 15 %) est de 246 watts par roue . La puissance fournie par la roue différentielle qu'on possède est de 350 watts par roue

Alors le choix qu'on fais est correcte avec une marge énergétique assez importante .

## V.2 Méthodologie de l'étude Dynamique

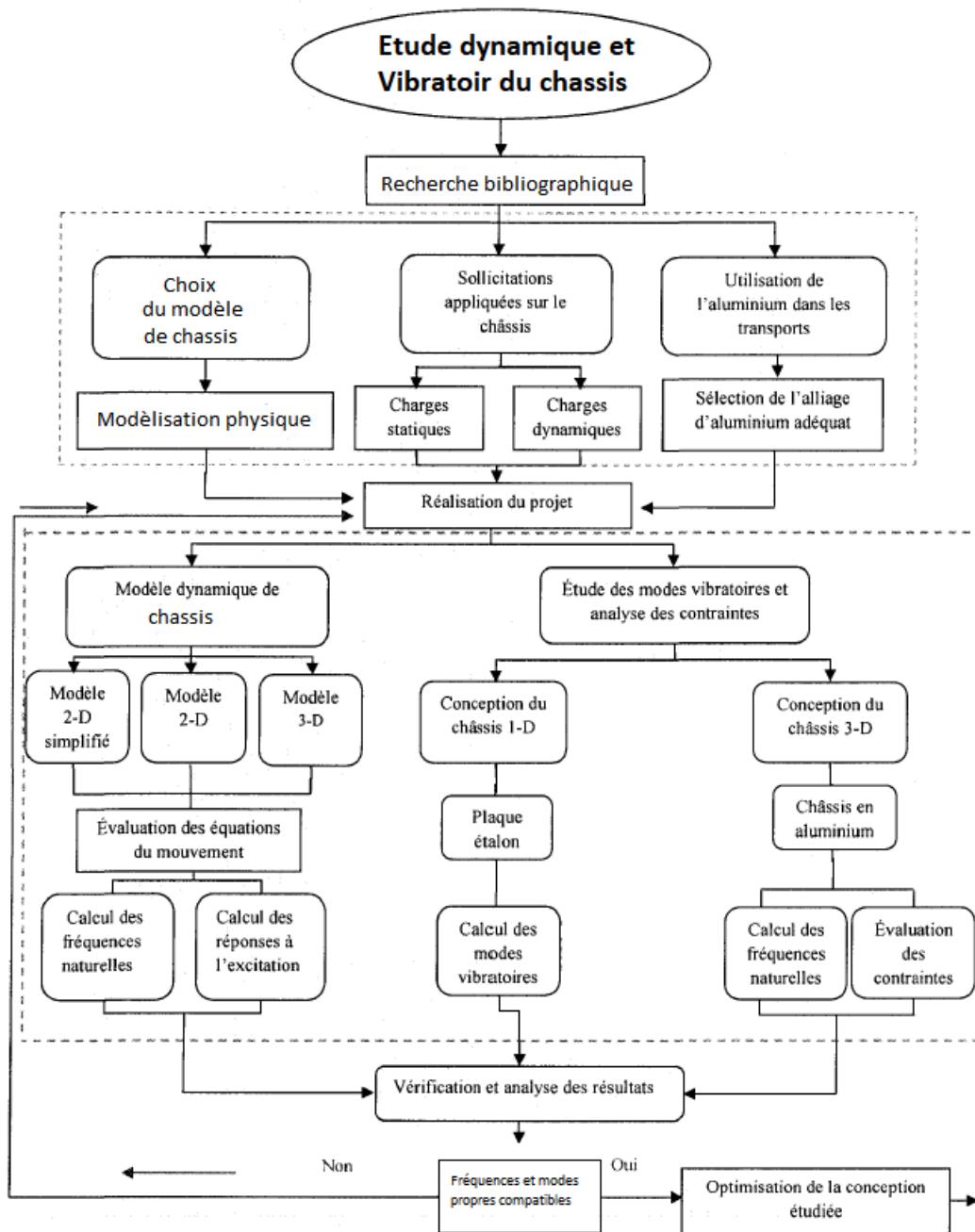


FIGURE V.2 – Organigramme de la méthodologie.

### V.3 Développement du Modèle Dynamique

Le comportement dynamique du châssis sera étudié dans ce chapitre. Au départ, un modèle simplifié du robot à une dimension sera analysé. Ce modèle comprend la partie qui est directement reliée au châssis. Un deuxième modèle du châssis sera étudié, mais cette fois-ci, les masses des ensembles de suspension seront prises en considération qui est le modèle à deux dimensions. Un troisième modèle sera évalué en prenant encore plus de paramètres en considération. C'est le modèle à trois dimensions. Cette approche d'analyse dynamique est la plus courante dans le monde de la conception des châssis [12].

Les différents types de mouvement du châssis causé par l'excitation de la route seront étudiés. Dans les modèles à une et à deux dimensions, le bondissement et le tangage du châssis seront évalués. Le mouvement du roulis sera étudié dans le cas du modèle à trois dimensions en plus des deux autres mouvements évalués avec les deux premiers systèmes.

Ces trois systèmes seront traités en détail dans les parties qui suivront. Les différents angles de rotations que subit le châssis durant son exploitation sont représentés ci-dessous :

#### Roulis

C'est un mouvement qui correspond à des oscillations selon l'axe longitudinal, il est provoqué par les sollicitations agissant sur le côté du châssis. La figure V.3 montre le mouvement du roulis.

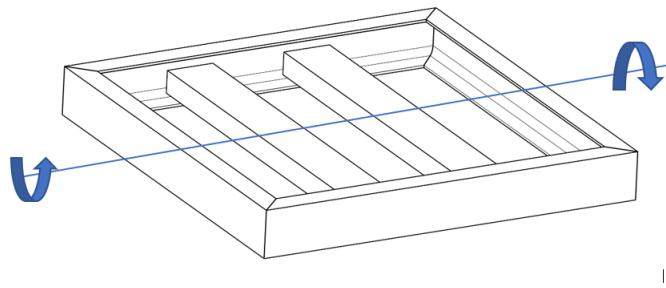


FIGURE V.3 – Mouvement du roulis Rotation suivant l'axe longitudinal

#### Tangage

Ce mouvement est induit par les sollicitations qui agissent suivant l'axe transversal. C'est un mouvement du haut vers le bas. il est provoqué par l'augmentation de l'amplitude. La figure V.4 illustre le mouvement du tangage.

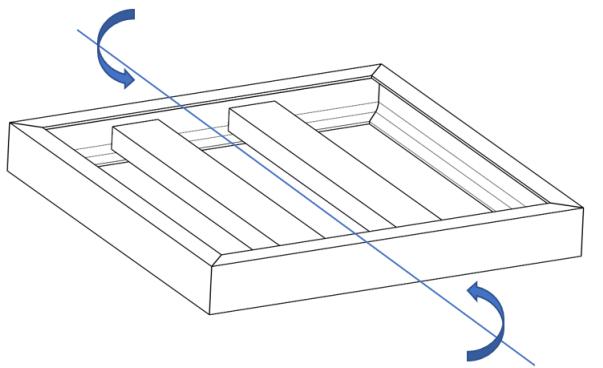


FIGURE V.4 – Mouvement du Tangage Rotation suivant l'axe transversal

### Lacet

Le mouvement du lacet est induit par le roulis, il est suivant l'axe vertical. La figure V.5 représente le mouvement du lacet.

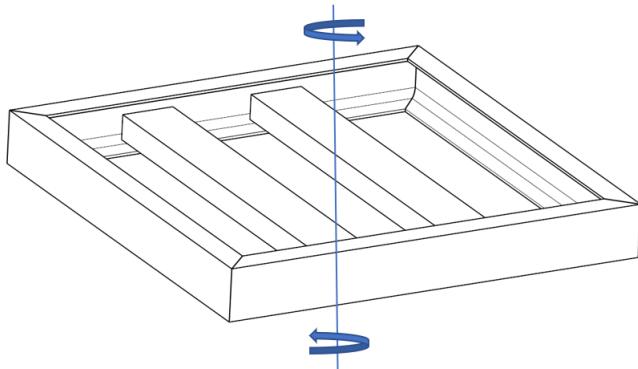


FIGURE V.5 – Mouvement du Lacet Rotation suivant l'axe vertical.

Dans cette présente étude, les mouvements du roulis, tangage et bondissement seront pris en compte.

#### V.3.1 Modèle dynamique du châssis

Le châssis est excité par des forces provenant de la route qui peuvent être de nature sinusoïdales, échelons ou aléatoires. Ces forces agiront à travers les suspensions pour arriver au cadre du châssis.

Le modèle de suspension choisi pour cette étude comprend une masse suspendue sur un ressort de raideur  $k_i$  et reliée au châssis par un amortisseur  $b_i$  et un ressort  $K_i$ .

### V.3.2 Modèle à deux dimensions simplifié

Le modèle du robot a été simplifié en une poutre soumise à un déplacement vertical et à une rotation. Le schéma représentatif de ce système est montré à la figure V.6.

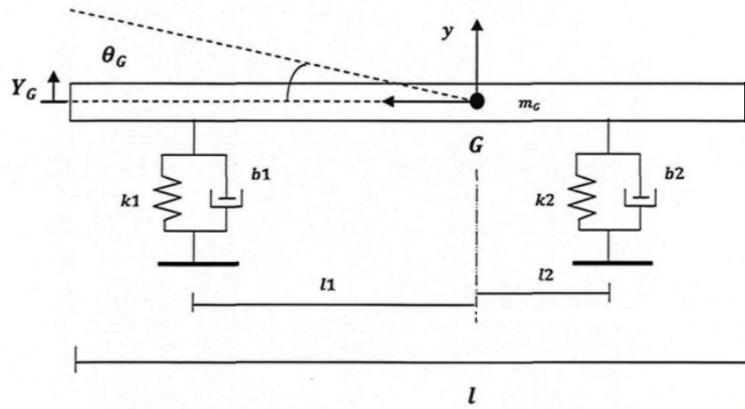


FIGURE V.6 – Schéma 2-D simplifié du robot.

Le diagramme des corps libres de ce modèle est présenté à la figure V.7. Les forces dues à l'amortissement et à la raideur des ressorts ont été représentées ainsi que les forces de bondissement et de tangage .

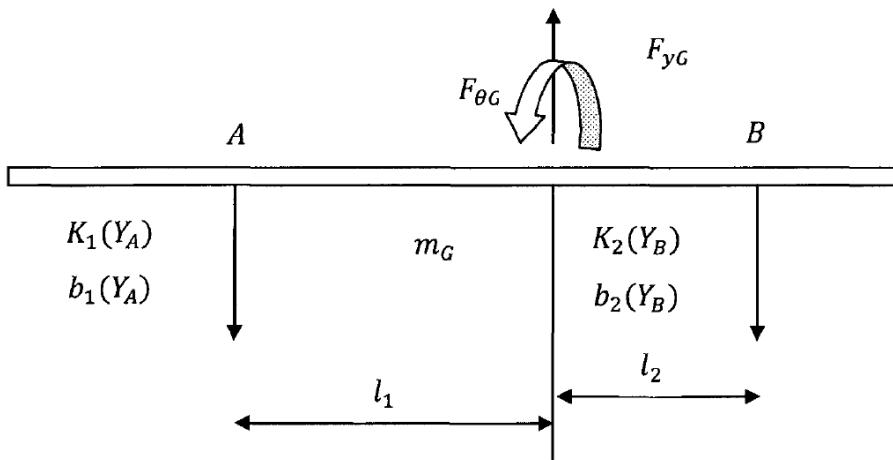


FIGURE V.7 – Diagramme des corps libres.

**Équations de mouvement du nouveau système :**

**Noeud A :**

$$F_{k1} = k_1[(y_G + l_1\theta_G) - U_1] \quad (\text{V.9})$$

$$F_{b1} = b_1[(y_G + l_1\dot{\theta}_G) - U_1] \quad (\text{V.10})$$

**Noeud B :**

$$F_{k2} = k_2[(y_G + l_2\theta_G) - U_2] \quad (\text{V.11})$$

$$F_{b2} = b_2[(y_G + l_2\dot{\theta}_G) - U_2] \quad (\text{V.12})$$

D'après le chargement statique effectué au chapitre III, nous avons estimé les inerties dues au tangage et au roulis du robot au complet. Ces inerties ont été calculées à l'aide du logiciel CATIA et elles ont été prises en considération dans les calculs Annexe A. Durant la conception, les inerties ont été estimées en prenant en compte le chargement statique représenté à la figure III.9 . Où :

- $I_X = 0.061 \text{ Kg.m}^2$  (Inertie due au tangage).
- $I_Y = 0.011 \text{ Kg.m}^2$  (Inertie due au roulis).
- $I_Z = 0.05 \text{ Kg.m}^2$

Les équations générales dues aux mouvements de translation et de rotation du robot sont données ci-dessous :

**Mouvement de translation :**

$$m_G \ddot{y}_G = -k_1[(y_G + l_1\theta_G) - U_1] - b_1[(y_G + l_1\dot{\theta}_G) - U_1] - k_2[(y_G + l_2\theta_G) - U_2] - b_2[(y_G + l_2\dot{\theta}_G) - U_2] \quad (\text{V.13})$$

**Mouvement de rotation :**

$$I_G \ddot{\theta}_G = -l_1[k_1((y_G + l_1\theta_G) - U_1) + b_1((y_G + l_1\dot{\theta}_G) - U_1)] + l_2[k_2((y_G + l_2\theta_G) - U_2) + b_2((y_G + l_2\dot{\theta}_G) - U_2)] \quad (\text{V.14})$$

On pose :

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 = y_G \\ x_2 = \dot{y}_G \\ x_3 = \theta_G \\ x_4 = \dot{\theta}_G \end{array} \right.$$

Alors, les équations du mouvement s'écriront comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = x_2 \\ m_G \dot{x}_2 = -ax_1 - bx_2 - cx_3 - dx_4 + K_1 U_1 + K_2 U_2 + b_1 \dot{U}_1 + b_2 \dot{U}_2 \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ I_G x_4 = -a' x_1 - b' x_2 - c' x_3 - d' x_4 + l_1(K_1 U_1 + b_1 \dot{U}_1) - l_2(K_2 U_2 + b_2 \dot{U}_2) \end{array} \right.$$

Le système obtenu est de la forme suivante :

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (\text{V.15})$$

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-1}{m_G}a & \frac{-1}{m_G}b & \frac{-1}{m_G}c & \frac{-1}{m_G}d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{-a'}{I_G} & \frac{-b'}{I_G} & \frac{-c'}{I_G} & \frac{-d'}{I_G} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_1 & k_2 & b_1 & b_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_1 l_1 & k_2 l_2 & b_1 l_1 & b_2 l_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{pmatrix} \quad (\text{V.16})$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} a = k_1 + k_2 \\ b = b_1 + b_2 \\ c = k_1 l_1 - k_2 l_2 \\ d = b_1 l_1 - b_2 l_2 \end{array} \right.$$

Et :

$$\left\{ \begin{array}{l} a' = k_1 l_1 - k_2 l_2 \\ b' = b_1 l_1 - b_2 l_2 \\ c' = k_1 l_1^2 - k_2 l_2^2 \\ d' = b_1 l_1^2 - b_2 l_2^2 \end{array} \right.$$

Le tableau V.1 suivant représenté ci-dessous, montre tous les paramètres du modèle étudié avec leurs valeurs numériques.

Définition	Symbole	Unité	Valeur
Masse du Robot	$m_G$	Kg	100
Moment d'inertie du tangage	$I_G$	$kg.m^2$	0.061
Distance roue 1	$l_1$	m	0.1335
Distance roue 2	$l_2$	m	0.2665
Rigidité de suspension 1	$K_1$	N/m	5000
Rigidité de suspension 2	$K_2$	N/m	2500
Amortissement suspension 1	$b_1$	N.s/m	1500
Amortissement suspension 2	$b_2$	N.s/m	600

TABLE V.1 – Paramètres du modèle 2-D simplifié.

### Remarques :

- Les valeurs  $K_i$  et  $b_i$  sont choisis d'après les systèmes similaires qui travaillent dans les mêmes conditions, référence [9],[10] et [14].
- Les Valeurs de  $K_1$  et  $b_1$  sont calculées d'après les formules suivantes les équations V.17 et V.18 (car les roues 1 et 3 sont en parallèles par contre la roue 2 est seule) :

$$K_1 = K_{roue1} + K_{roue3} \quad (\text{V.17})$$

$$K_1 = 2500 + 2500 = 5000 \text{ N/m}$$

$$\frac{1}{b_1} = \frac{1}{b_{roue1}} + \frac{1}{b_{roue3}} \quad (\text{V.18})$$

$$b_1 = \frac{b_{roue1} \times b_{roue3}}{b_{roue1} + b_{roue3}} = 1500 \text{ N.s/m}$$

Le système de l'équation V.16 a été résolu sur Matlab par la **Transformée de Laplace**, en déterminant les fonctions ou matrice de transfert Annexe C. La figure V.8 correspond à la fonction de transfert de  $x_1$ . Sachant que  $x_1$  représente la position verticale du robot. La fréquence maximale obtenue à cette position est de 1.025 Hz. La figure V.9 présente la fréquence maximale de la fonction de transfert de  $x_3$  qui est égale à 1.135 Hz. C'est la fréquence propre du robot 2-D simplifié dû au tangage.

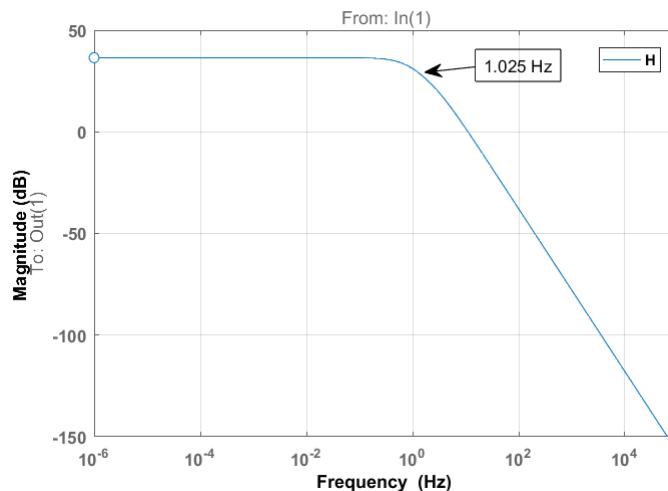


FIGURE V.8 – Amplitude du châssis ,la position Vertical

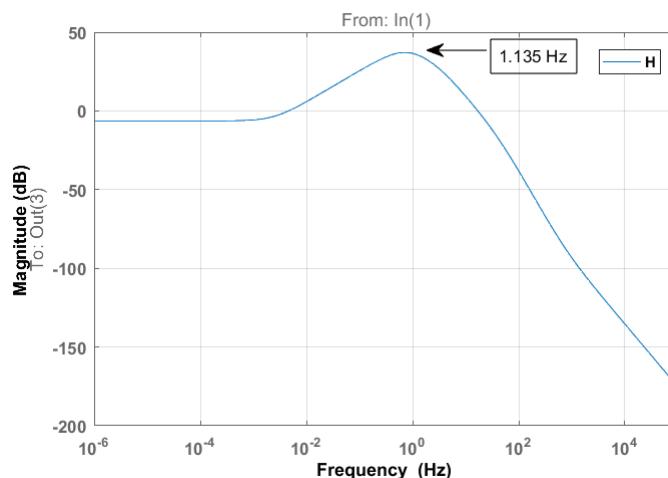


FIGURE V.9 – Amplitude du châssis ,Tangage

### V.3.3 Modèle à deux dimensions

Dans cette section, nous allons étudier le modèle à deux dimensions du robot. Ce modèle comprend quatre degrés de liberté. Deux degrés de liberté revenant au robot qui sont le déplacement vertical et le déplacement angulaire (tangage) et deux degrés de liberté revenant aux déplacements verticaux des suspensions. Le modèle 2-D du système est représenté à la figure V.10. Les différents paramètres de ce modèle sont représentés sont présentées au tableau V.2.

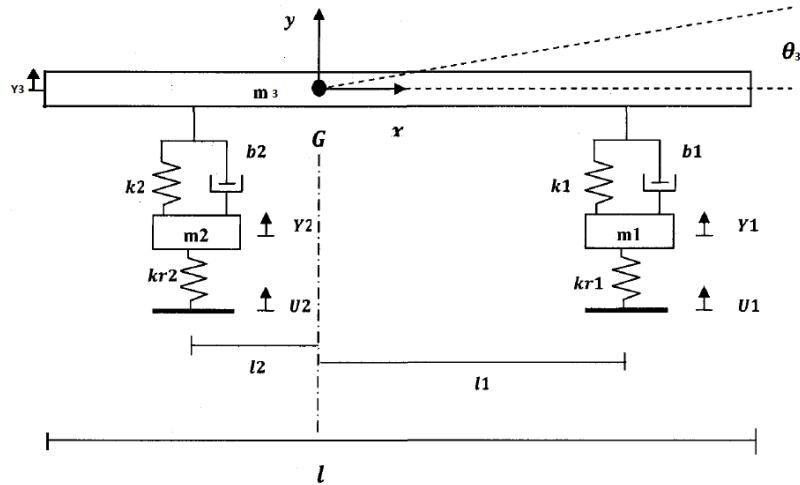


FIGURE V.10 – Schéma 2-D du Robot.

Tel que :

- $l$  : longueur totale du châssis du robot.
- $l_1$  : distance longitudinale séparant le centre de masse du châssis et l'ensemble roue 1.
- $l_2$  : distance séparant le centre de masse du châssis et l'ensemble roue 2.
- $m_1$  : masse de l'ensemble roue 1.
- $m_2$  : masse de l'ensemble roue 2.
- $m_3$  masse du robot sous chargement statique.
- $k_i$  : rigidité du ressort pour la suspension de l'ensemble roue i.
- $kr_i$  : rigidité du ressort du pneu de l'ensemble roue i (caoutchouc).
- $b_i$  : amortissement de la suspension des ensembles roue i.
- $\theta_i$  : angle de rotation de l'élément i. (tangage).
- $U_i$  position de la chaussée à la roue i.
- $Y_{1,2}$  : déplacement vertical des essieux.
- $Y_3$  : déplacement vertical du robot.

On mentionne que certain valeurs sont déjà présentés dans le tableau V.1 . Le tableau suivant tableau V.2 contient les valeurs qu'on a pas présentés précédemment :

Définition	Symbole	Unité	Valeur
Rigidité du pneu (caoutchouc)	$K_{ri}$	N/m	244 605
Masse de la roue + suspension 1	$m_1$	kg	3.5
Masse de la roue + suspension 2	$m_2$	kg	3.5

TABLE V.2 – Paramètres du modèle 2-D .

**Remarque :**

La rigidité du caoutchouc est une valeur moyenne d'après la référence [13] Annexe A figure A.5.

**Équation du mouvement**

Nous allons écrire les équations du mouvement des deux ensembles de roues séparément puis le châssis au complet.

**A-Équations du mouvement de l'ensemble roue 1**

Nous sommes dans le cas d'un seul degré de liberté, car nous avons le déplacement vertical seulement. Les équations du mouvement peuvent donc s'écrire en utilisant la deuxième loi de Newton suivante :

$$\sum F = m_i \ddot{y}_i \quad (\text{V.19})$$

Dans le cas d'un déplacement positif des masses( $m_1, m_4$ ) et d'une rotation positive  $\theta_3$ , les forces vont agir sur l'ensemble roue 1 de la figure V.11 comme suit :

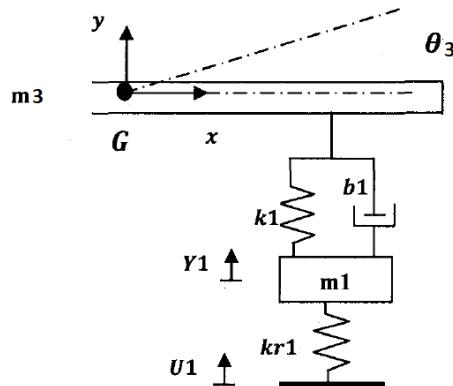


FIGURE V.11 – Modèle 2-D, ensemble roue 1.

**Pour le pneu :**

$$F_{kr1} = K_{ri}(y_1 - U_1) \quad (\text{V.20})$$

**Pour la suspension :**

$$F_{k1} = K_1[(y_1 - (y_3 + l_1 \theta_3))] \quad (\text{V.21})$$

$$F_{b1} = b_1[(\dot{y}_1 - (\dot{y}_3 + l_1 \dot{\theta}_3)]$$

### Équation du mouvement de la masse 1 :

Les forces appliquées au niveau de la roue 1 et de la suspension sont négatives, car elles s'opposent au mouvement.

$$\sum F = m_1 \ddot{y}_1 \quad (\text{V.22})$$

$$-K_{r1}(y_1 - U_1) - K_1[(y_1 - (y_3 + l_1 \theta_3))] - b_1[(\dot{y}_1 - (\dot{y}_3 + l_1 \dot{\theta}_3))] = m_1 \ddot{y}_1$$

### **B-Équations du mouvement de l'ensemble roue 2**

La figure V.12 montre l'ensemble roue 2 du robot. Dans le cas d'un déplacement positif des masses ( $m_2, m_3$ ) et d'une rotation positive  $\theta_3$ , les forces vont agir comme suit :

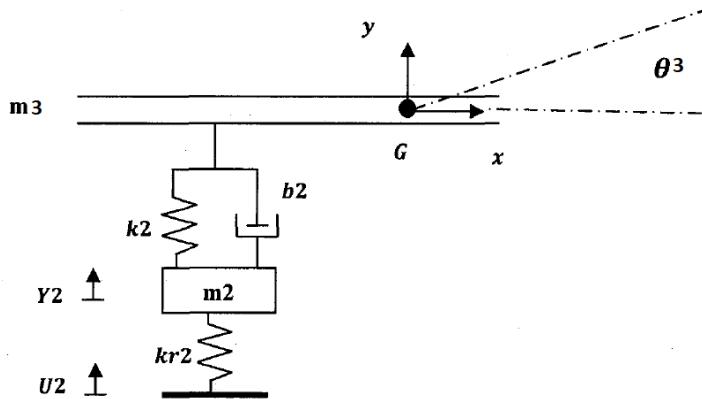


FIGURE V.12 – Modèle 2-D, ensemble roue 2

### Pour le pneu :

$$F_{kr2} = K_{r2}(y_2 - U_2) \quad (\text{V.23})$$

### Pour la suspension :

$$F_{k2} = K_2[(y_2 - (y_3 - l_2 \theta_3))] \quad (\text{V.24})$$

$$F_{b2} = b_2[(\dot{y}_2 - (\dot{y}_3 - l_2 \dot{\theta}_3)]$$

### Équation du mouvement de la masse 2 :

Les forces appliquées au niveau de la roue 2 et de la suspension sont négatives, car elles s'opposent au mouvement.

$$\sum F = m_2 \ddot{y}_2 \quad (\text{V.25})$$

$$-K_{r2}(y_2 - U_2) - K_2[(y_2 - (y_3 - l_2\theta_3)) - b_2[(\dot{y}_2 - (\dot{y}_3 - l_2\dot{\theta}_3))] = m_2 \ddot{y}_2$$

### C-Équations du mouvement de la masse 3

Nous avons deux degrés de liberté. Un mouvement de translation et un autre de rotation qui est le tangage. La deuxième loi de Newton peut s'appliquer dans ce cas par rapport au centre de masse du robot. La figure V.10 présente le modèle 2-D du robot.

$$\sum F = m_3 \ddot{y}_3 \quad (\text{V.26})$$

$$\sum M = I_3 \ddot{\theta}_3 \quad (\text{V.27})$$

Pour un déplacement positif des masses ( $m_1$ ,  $m_2$  et  $m_3$ ) et une rotation positive  $\theta_3$ , les forces agissant sur le châssis du robot sont :

#### Mouvements de translation

##### Suspension 1 :

$$F_{k1} = K_1[((y_3 + l_1\theta_3) - y_1)] \quad (\text{V.28})$$

$$F_{b1} = b_1[(\dot{y}_3 + l_1\dot{\theta}_3) - \dot{y}_1]$$

##### Suspension 2 :

$$F_{k2} = K_2[((y_3 - l_2\theta_3) - y_2)] \quad (\text{V.29})$$

$$F_{b2} = b_2[(\dot{y}_3 - l_2\dot{\theta}_3) - \dot{y}_2]$$

Si nous considérons le déplacement positif de la masse 3, de plus grande amplitude par rapport aux autres masses, alors tous les éléments vont tendre à s'opposer à ce mouvement. Les forces agissantes sont donc négatives. Le mouvement de translation est donc décrit par :

$$\begin{aligned} m_3 \ddot{y}_3 &= K_1[(y_3 + l_1\theta_3) - y_1] - b_1[(\dot{y}_3 + l_1\dot{\theta}_3) - \dot{y}_1] - K_2[(y_3 - l_2\theta_3) - y_2] \\ &\quad - b_2[(\dot{y}_3 - l_2\dot{\theta}_3) - \dot{y}_2] \end{aligned} \quad (\text{V.30})$$

## Mouvements de Rotation

### Suspension 1 :

$$Mk1 = K_1 l_1 [((y_3 + l_1 \theta_3) - y_1)] \quad (\text{V.31})$$

$$M_{b1} = b_1 l_1 [(\dot{y}_3 + l_1 \dot{\theta}_3) - \dot{y}_1]$$

### Suspension 2 :

$$Mk2 = K_2 l_2 [((y_3 - l_2 \theta_3) - y_2)] \quad (\text{V.32})$$

$$M_{b2} = b_2 l_2 [(\dot{y}_3 - l_2 \dot{\theta}_3) - \dot{y}_2]$$

Pour un déplacement plus grand de la masse 3, tous les autres éléments tendent à favoriser la rotation positive du châssis du robot sauf les éléments de la première suspension qui s'opposent à cette rotation. Le mouvement de rotation est donc décrit par :

$$I_3 \ddot{\theta}_3 = -l_1 [K_1(y_3 + l_1 \theta_3 - y_1) - b_1(\dot{y}_3 + l_1 \dot{\theta}_3 - \dot{y}_1)] + l_2 [K_2(y_3 - l_2 \theta_3 - y_2) + b_2(\dot{y}_3 - l_2 \dot{\theta}_3 - \dot{y}_2)] \quad (\text{V.33})$$

Nous avons les systèmes d'équations suivants :

$$\begin{aligned} I_3 \ddot{\theta}_3 &= -l_1 [K_1(y_3 + l_1 \theta_3 - y_1) - b_1(\dot{y}_3 + l_1 \dot{\theta}_3 - \dot{y}_1)] + l_2 [K_2(y_3 - l_2 \theta_3 - y_2) \\ &\quad - b_2(\dot{y}_3 - l_2 \dot{\theta}_3 - \dot{y}_2)] \\ m_3 \ddot{y}_3 &= -K_1[(y_3 + l_1 \theta_3) - y_1] - b_1[(\dot{y}_3 + l_1 \dot{\theta}_3) - \dot{y}_1] - K_2[(y_3 - l_2 \theta_3) - y_2] \\ &\quad - b_2[(\dot{y}_3 - l_2 \dot{\theta}_3) - \dot{y}_2] \\ m_2 \ddot{y}_2 &= -K_{r2}(y_2 - U_2) - K_2[(y_2 - (y_3 - l_2 \theta_3))] - b_2[(\dot{y}_2 - (\dot{y}_3 - l_2 \dot{\theta}_3))] \\ m_1 \ddot{y}_1 &= -K_{r1}(y_1 - U_1) - K_1[(y_1 - (y_3 + l_1 \theta_3))] - b_1[(\dot{y}_1 - (\dot{y}_3 + l_1 \dot{\theta}_3))] \end{aligned} \quad (\text{V.34})$$

En effectuant le changement de variable :

$$\begin{array}{llll} x_1 = y_1 & x_2 = \dot{y}_1 & x_3 = y_2 & x_4 = \dot{y}_2 \\ x_5 = y_4 & x_6 = \dot{y}_4 & x_7 = \theta_3 & x_8 = \dot{\theta}_3 \end{array}$$

Le système d'équations du modèle 2-D du châssis est présenté à l'annexe C. Ce système d'équations a été résolu sur Matlab. Il est sous la même forme que le modèle à une dimension sauf qu'ici nous avons 8 inconnus. Tels que,  $x_1$  et  $x_3$  représentent les déplacements verticaux des essieux avant et arrières.  $x_5$  et  $x_7$  représentent respectivement le déplacement vertical et angulaire (tangage) du robot.

La fréquence maximale due au déplacement de l'essieu avant de la figure V.13 est de 9.38 Hz. La figure V.14 présente la fréquence maximale due au déplacement

vertical du robot 2-D qui est égale à 29.1 Hz. Le déplacement vertical de ce dernier correspond à la fonction de transfert de  $x_5$ . L'amplitude du robot 2-D suivant la position angulaire est montrée à la figure V.15. La fréquence maximale dans ce cas-là est de 1.43 Hz.

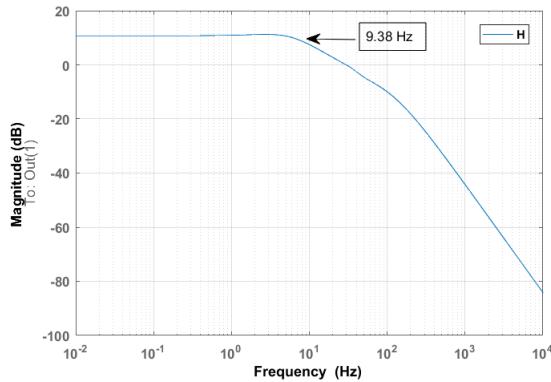


FIGURE V.13 – Amplitude de la roue 1

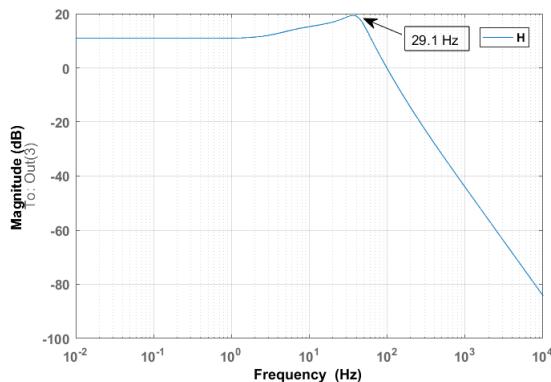


FIGURE V.14 – Amplitude du châssis ,Position vertical

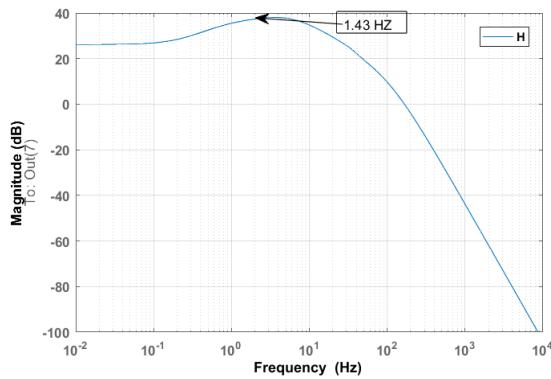


FIGURE V.15 – Amplitude du châssis ,Position angulaire

### V.3.4 Modèle à trois dimensions

Dans cette section, nous allons étudier le modèle à trois dimensions du robot. Ce modèle comprend six degrés de liberté. Trois degrés de liberté revenant au robot qui sont le déplacement vertical et les déplacements angulaires (tangage et roulis) et trois degrés de liberté revenant aux déplacements verticaux des suspensions. Le modèle 3-D du système est représenté à la figure V.16. Les différents paramètres de ce modèle sont représentés ci-dessous, leurs valeurs sont présentées au tableau V.3.

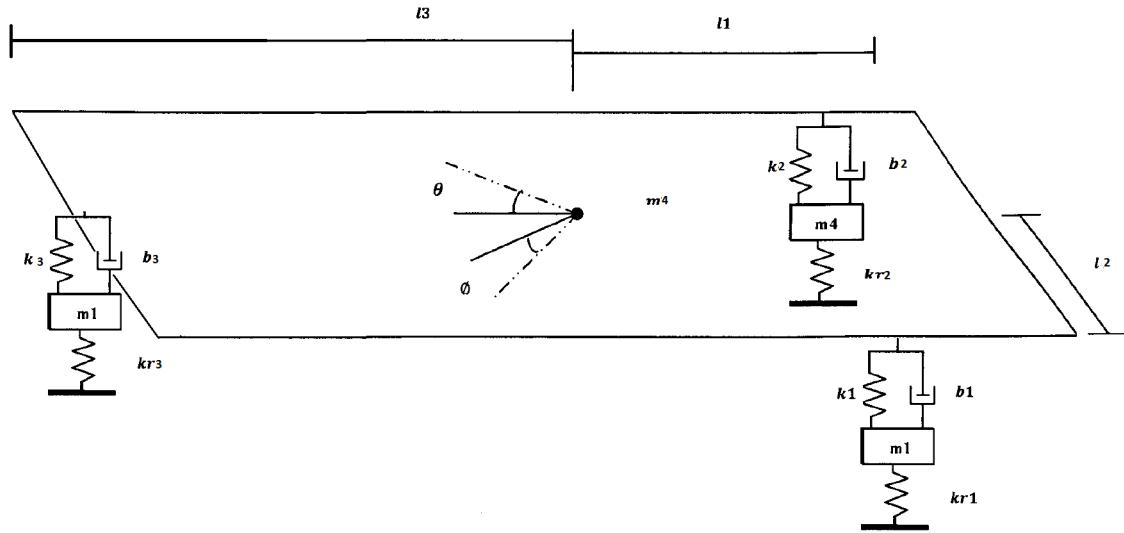


FIGURE V.16 – Modèle 3-D du robot.

Tel que :

- $l_i$  : distance longitudinale séparant le centre de masse du châssis et la roue i.
- $l_2$  : distance latérale entre le centre de masse du châssis et les roues.
- $m_i$  : masse de l'ensemble roue i.
- $m_4$  masse du robot sous chargement statique.
- $k_i$  : rigidité du ressort pour la suspension de l'ensemble roue i.
- $k_{ri}$  : rigidité du ressort du pneu de l'ensemble roue i (caoutchouc).
- $b_i$  : amortissement de la suspension des ensembles roue i.
- $\theta_i$  : angle de rotation de l'élément i. (tangage).
- $U_i$  position de la chaussée à la roue i.
- $\phi_i$  : angle de rotation de l'élément i (roulis).
- $Y_{1,2,3}$  : déplacement vertical des essieux.
- $Y_4$  : déplacement vertical du robot.

Définition	Symbole	Unité	Valeur
Masse du Robot	$m_G$	Kg	100
Moment d'inertie du tangage	$I_G$	$kg \cdot m^2$	0.064
Distance roue 1	$l_1$	m	0.1335
Distance roue 3	$l_3$	m	0.2665
Distance latérale	$l_2$	m	0.3
Rigidité de suspension 1	$K_1$	N/m	2500
Rigidité de suspension 2	$K_2$	N/m	2500
Rigidité de suspension 3	$K_3$	N/m	2000
Amortissement suspension 1	$b_1$	N.s/m	600
Amortissement suspension 2	$b_2$	N.s/m	600
Amortissement suspension 3	$b_3$	N.s/m	600
Rigidité du pneu (caoutchouc)	$K_{ri}$	N/m	2445
Masse suspension 1	$m_1$	kg	3.5
Masse suspension 2	$m_2$	kg	3.5
Masse suspension 3	$m_3$	kg	3.5

TABLE V.3 – Paramètres du modèle 2-D simplifié.

### A-Équation de mouvement de l'ensemble roue 1

Le robot ayant trois degrés de liberté, soit le bondissement, le tangage et le roulis, il faut adapter l'équation développée précédemment. Il s'agit ici de la même équation que celle du modèle à deux dimensions à laquelle est ajoutée une composante de position relative au roulis du robot. La roue n'ayant qu'un seul degré de liberté, soit une translation, son mouvement peut être décrit par la seconde loi de Newton :

$$\sum F = m_1 \ddot{y}_1 \quad (\text{V.35})$$

Pour un déplacement positif des masses 1 et 2 et pour une rotation positive de  $\theta_4$  et de  $\Phi_4$ , les forces qui agissent sur la partie avant du châssis du côté de la roue 1 sont présentées à la figure V.17.

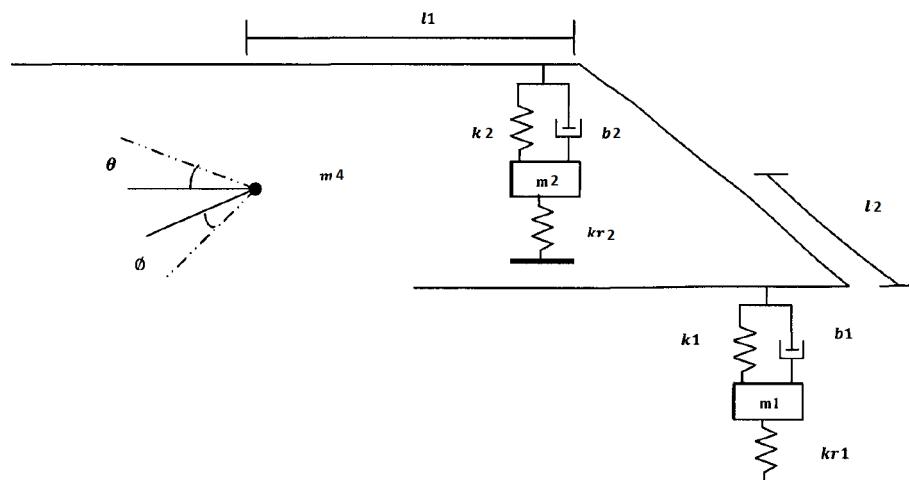


FIGURE V.17 – Modèle 3-D d'ensemble roue 1

Pour le pneu :

$$F_{kr1} = K_{r1}(y_1 - U_1) \quad (\text{V.36})$$

Pour la suspension :

$$F_{k1} = K_1[(y_1 - (y_4 + l_1\theta_4 + l_2\phi_4))] \quad (\text{V.37})$$

$$F_{b1} = b_1[(\dot{y}_1 - (\dot{y}_4 + l_1\dot{\theta}_4 + l_2\dot{\phi}_4))]$$

Équation du mouvement pour l'ensemble roue 1 :

Les forces s'opposant toutes au mouvement, elles sont donc négatives.

$$\sum F = m_1\ddot{y}_1 \quad (\text{V.38})$$

$$m_1\ddot{y}_1 = -K_{r1}(y_1 - U_1) - K_1[(y_1 - (y_4 + l_1\theta_4 + l_2\phi_4))] - b_1[(\dot{y}_1 - (\dot{y}_4 + l_1\dot{\theta}_4 + l_2\dot{\phi}_4))]$$

**B-Équation du mouvement de la roue 2**

Pour le pneu :

$$F_{kr2} = K_{r2}(y_2 - U_2) \quad (\text{V.39})$$

Pour la suspension :

$$F_{k2} = K_2[(y_2 - (y_4 + l_2\theta_4 - l_2\phi_4))] \quad (\text{V.40})$$

$$F_{b2} = b_2[(\dot{y}_2 - (\dot{y}_4 + l_2\dot{\theta}_4 - l_2\dot{\phi}_4))]$$

Équation du mouvement pour l'ensemble roue 2 :

Les forces s'opposant toutes au mouvement, elles sont donc négatives.

$$\sum F = m_2\ddot{y}_2 \quad (\text{V.41})$$

$$m_2\ddot{y}_2 = -K_{r2}(y_2 - U_2) - K_2[(y_2 - (y_4 + l_2\theta_4 - l_2\phi_4))] - b_2[(\dot{y}_2 - (\dot{y}_4 + l_2\dot{\theta}_4 - l_2\dot{\phi}_4))]$$

**C-Équation du mouvement de la roue 3**

Pour le pneu :

$$F_{kr3} = K_{r3}(y_3 - U_3) \quad (\text{V.42})$$

Pour la suspension :

$$F_{k3} = K_3[(y_3 - (y_4 - l_3\theta_4))] \quad (\text{V.43})$$

$$F_{b3} = b_3[(\dot{y}_3 - (\dot{y}_4 - l_3\dot{\theta}_4))] \quad (\text{V.43})$$

Équation du mouvement de la roue 3 :

Les forces appliquées au niveau de la roue 2 et de la suspension sont négatives, car elles s'opposent au mouvement.

$$\sum F = m_3\ddot{y}_3 \quad (\text{V.44})$$

$$m_3\ddot{y}_3 = -K_{r3}(y_3 - U_3) - K_3[(y_3 - (y_4 - l_3\theta_4))] - b_3[(\dot{y}_3 - (\dot{y}_4 - l_3\dot{\theta}_4))] \quad (\text{V.44})$$

#### D-Équation de mouvement du châssis (masse 4)

Le châssis du robot de la figure V.16 est un corps rigide possédant trois degrés de liberté, soit un bondissement, un roulis et un tangage. Par conséquent, il faut appliquer la deuxième loi de Newton suivant chacune de ces possibilités de mouvement :

$$\sum F = m_4\ddot{y}_4 \quad (\text{V.45})$$

$$\sum M_\theta = I_{\theta 4}\ddot{\theta}_4 \quad (\text{V.46})$$

$$\sum M_\phi = I_{\phi 4}\ddot{\phi}_4 \quad (\text{V.47})$$

#### Mouvement de translation

$$F_{k1} = K_1[(y_4 + l_1\theta_4 + l_2\phi_4) - y_1] \quad (\text{V.48})$$

$$F_{k2} = K_2[(y_4 + l_2\theta_4 - l_2\phi_4) - y_2]$$

$$F_{k3} = K_3[(y_4 - l_3\theta_4) - y_3] \quad (\text{V.48})$$

$$F_{b1} = b_1[(\dot{y}_4 + l_1\dot{\theta}_4 + l_2\dot{\phi}_4) - \dot{y}_1]$$

$$F_{b2} = b_2[(\dot{y}_4 + l_2\dot{\theta}_4 - l_2\dot{\phi}_4) - \dot{y}_2]$$

$$F_{b3} = b_3[(\dot{y}_4 - l_3\dot{\theta}_4) - \dot{y}_3]$$

### Équation du mouvement en translation du châssis

Pour un mouvement positif en translation du robot, la totalité des éléments s'y opposent. Par conséquent, ces forces sont négatives et l'équation de mouvement est donnée par :

$$\begin{aligned} m_4\ddot{y}_4 &= -K_1[(y_4 + l_1\theta_4 + l_2\phi_4) - y_1] - b_1[(\dot{y}_4 + l_1\dot{\theta}_4 + l_2\dot{\phi}_4) - \dot{y}_1] \\ &\quad - K_2[(y_4 + l_2\theta_4 - l_2\phi_4) - y_2] - b_2[(\dot{y}_4 + l_2\dot{\theta}_4 - l_2\dot{\phi}_4) - \dot{y}_2] \\ &\quad - K_3[(y_4 - l_3\theta_4) - y_3] - b_3[(\dot{y}_4 - l_3\dot{\theta}_4) - \dot{y}_3] \end{aligned} \quad (\text{V.49})$$

### Mouvement de tangage

$$\begin{aligned} M_{\theta k1} &= l_1 K_1[(y_4 + l_1\theta_4 + l_2\phi_4) - y_1] \\ M_{\theta k2} &= l_2 K_2[(y_4 + l_2\theta_4 - l_2\phi_4) - y_2] \\ M_{\theta k3} &= l_3 K_3[(y_4 - l_3\theta_4) - y_3] \end{aligned} \quad (\text{V.50})$$

$$\begin{aligned} M_{\theta b1} &= l_1 b_1[(\dot{y}_4 + l_1\dot{\theta}_4 + l_2\dot{\phi}_4) - \dot{y}_1] \\ M_{\theta b2} &= l_2 b_2[(\dot{y}_4 + l_2\dot{\theta}_4 - l_2\dot{\phi}_4) - \dot{y}_2] \\ M_{\theta b3} &= l_3 b_3[(\dot{y}_4 - l_3\dot{\theta}_4) - \dot{y}_3] \end{aligned}$$

### Équation de mouvement en tangage du châssis

Pour un mouvement positif du robot suivant le tangage, la totalité des éléments des suspensions s'y opposent. Par conséquent, les composantes en tangage des forces doivent être négatives :

$$\begin{aligned} I_{\theta 4}\ddot{\theta}_4 &= l_1 K_1[(y_4 + l_1\theta_4 + l_2\phi_4) - y_1] - l_1 b_1[(\dot{y}_4 + l_1\dot{\theta}_4 + l_2\dot{\phi}_4) - \dot{y}_1] \\ &\quad - l_2 K_2[(y_4 + l_2\theta_4 - l_2\phi_4) - y_2] - l_2 b_2[(\dot{y}_4 + l_2\dot{\theta}_4 - l_2\dot{\phi}_4) - \dot{y}_2] \\ &\quad - l_3 K_3[(y_4 - l_3\theta_4) - y_3] - l_3 b_3[(\dot{y}_4 - l_3\dot{\theta}_4) - \dot{y}_3] \end{aligned} \quad (\text{V.51})$$

### Mouvement de roulis

$$\begin{aligned}
 M_{\phi k1} &= l_2 K_1 [(y_4 + l_1 \theta_4 + l_2 \phi_4) - y_1] \\
 M_{\phi k2} &= l_2 K_2 [(y_4 + l_2 \theta_4 - l_2 \phi_4) - y_2] \\
 M_{\phi k3} &= l_2 K_3 [(y_4 - l_3 \theta_4) - y_3] = 0 \quad (\text{V.52}) \\
 M_{\phi b1} &= l_2 b_1 [(\dot{y}_4 + l_1 \dot{\theta}_4 + l_2 \dot{\phi}_4) - \dot{y}_1] \\
 M_{\phi b2} &= l_2 b_2 [(\dot{y}_4 + l_2 \dot{\theta}_4 - l_2 \dot{\phi}_4) - \dot{y}_2] \\
 M_{\phi b3} &= l_2 b_3 [(\dot{y}_4 - l_3 \dot{\theta}_4) - \dot{y}_3] = 0
 \end{aligned}$$

### Équation de mouvement en roulis du châssis

Pour un mouvement positif du robot suivant le roulis, la totalité des éléments des suspensions s'y opposent. Par conséquent, les composantes en roulis des forces doivent être négatives :

$$\begin{aligned}
 I_{\phi 4} \ddot{\phi}_4 &= -l_2 K_1 [(y_4 + l_1 \theta_4 + l_2 \phi_4) - y_1] - l_2 b_1 [(\dot{y}_4 + l_1 \dot{\theta}_4 + l_2 \dot{\phi}_4) - \dot{y}_1] \quad (\text{V.53}) \\
 &\quad - l_2 K_2 [(y_4 + l_2 \theta_4 - l_2 \phi_4) - y_2] - l_2 b_2 [(\dot{y}_4 + l_2 \dot{\theta}_4 - l_2 \dot{\phi}_4) - \dot{y}_2]
 \end{aligned}$$

En effectuant le changement de variables suivant :

$$\begin{array}{llll}
 x_1 = y_1 & x_2 = y_2 & x_3 = y_3 & x_4 = y_4 \\
 x_5 = \dot{y}_1 & x_6 = \dot{y}_2 & x_7 = y_3 & x_8 = \dot{y}_4 \\
 x_9 = \theta_4 & x_{10} = \phi_2 & x_{11} = \dot{\theta}_4 & x_{12} = \dot{\phi}_4
 \end{array}$$

Le système d'état du modèle 3-D du châssis est présenté à l'annexe C. Ce système est constitué de 12 inconnus. Tels que,  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  et  $x_4$ , représentent les déplacements verticaux des trois roues du robot. Le déplacement vertical ainsi que l'angulaire du robot (bondissement, tangage et roulis) correspondent respectivement aux fonctions de transfert liées à  $x_3$ ,  $x_9$  et  $x_{11}$ . La figure V.18 repréprésente l'amplitude de l'ensemble roue 1. La fréquence maximale dans ce cas est égale à 13.2 Hz.

La courbe correspondant à l'amplitude en fonction de la fréquence de la position verticale du robot 3-D est montrée à la figure V.19. La fréquence maximale est égale à 1.68 Hz. Pour les figures V.20 et V.21 qui représentent le tangage et le roulis du robot 3-D, les valeurs des fréquences maximales obtenues sont égales à 1.7 Hz et 1.55 Hz respectivement.

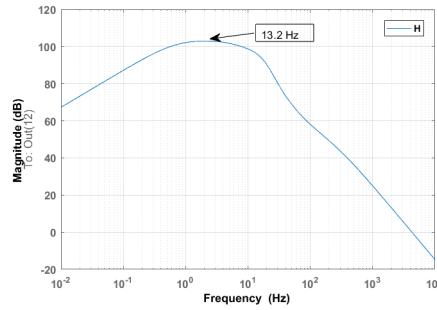


FIGURE V.18 – Amplitude de l'ensemble roue 1.

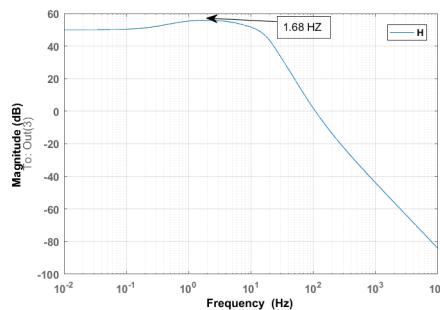


FIGURE V.19 – Amplitude du châssis , (Position verticale).

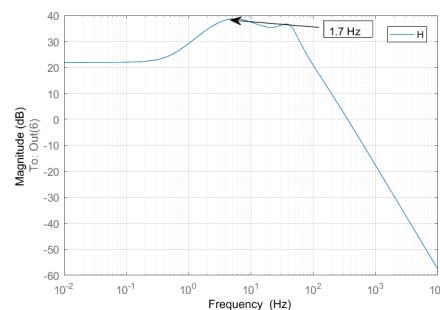


FIGURE V.20 – Amplitude du châssis (Tangage).

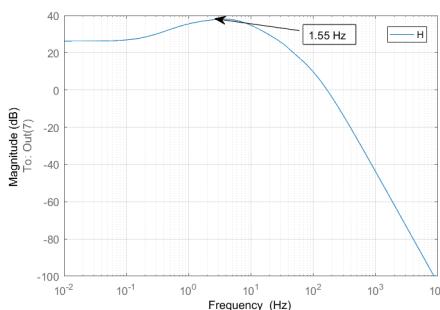


FIGURE V.21 – Amplitude du châssis (Roulis).

### V.3.5 Conclusion

Les résultats des fréquences du bondissement et du tangage obtenus pour les cas 2-D simplifié et 2-D étaient assez similaires. Dans le système 2-D, nous avons vu l'apparition de la fréquence de l'essieu avant. Pour les essieux restants, leurs fréquences étaient proches de celle de l'essieu avant. En ce qui concerne les résultats du cas 3-D, les fréquences ont un peu amplifié. Cela est dû à l'effet du roulis que nous avons négligé au début.

Tous les résultats des fréquences obtenus varient entre 1,3 Hz et 29 Hz. Donc, nous sommes bien dans les vibrations à basse fréquence qui caractérisent le domaine du transport terrestre qui est dans l'intervalle [1Hz-40 Hz].

D'un autre côté, les mêmes systèmes ont été repris (2-D simplifié, 2-D et 3- D), mais cette fois-ci nous avons pris en considération la masse du châssis seulement au lieu de celle du robot . Les inerties ont été calculées par rapport au châssis. Les résultats obtenus nous ont servi pour la comparaison avec le cas numérique qui sera présenté dans les sections suivantes.

## V.4 Étude Des Modes Vibratoires et Analyse Des Contraintes Pour Un Châssis 1-D

### V.4.1 Modélisation du châssis du robot

Afin de pouvoir effectuer une étude vibratoire sur le châssis du robot, la structure de départ a été simplifiée par une structure discrète simple illustrée à la figure V.22.

Cette structure droite isostatique à parois minces se compose de deux travées sans articulations et un croix. Elle repose sur deux appuis simples qui représentent les roues du robot. Le choix de la poutre principale du châssis est porté sur le modèle représenté à la figure V.23, car l'effet du moment de torsion dans le cas d'un châssis de robot est non uniforme ce qui conduit à l'utilisation des profilés ouverts au lieu de ceux fermés.

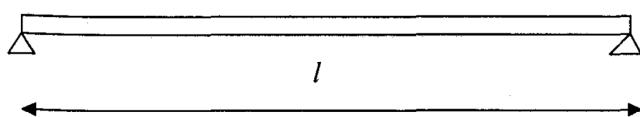


FIGURE V.22 – Structure simplifiée du châssis.

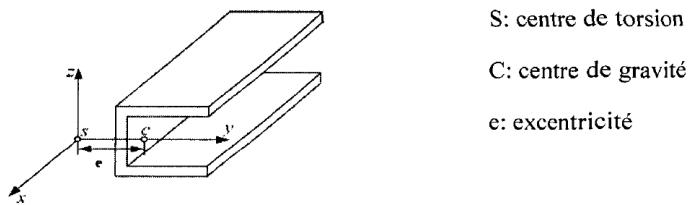


FIGURE V.23 – Poutre principale du châssis.

#### V.4.2 Calcul analytique des modes vibratoires

En général, le centre de torsion ne coïncide pas avec le centre de gravité, ce qui est le cas des poutres minces. Ce genre de poutres est soumis en même temps à la flexion ainsi qu'à la torsion. Ces sollicitations causent des vibrations couplées.

Afin de pouvoir calculer les différents types de vibrations agissant sur une poutre à parois minces, les méthodes de **Timoshenko** et de **Bernoulli-Euler** vont être utilisées [18] et [2]. Ces deux méthodes diffèrent selon les paramètres qu'elles prennent en considération :

- La méthode de Bernoulli-Euler énonce que la flexion d'une poutre se comporte de telle manière que la section transversale reste normale à l'axe neutre après flexion.
- Dans le cas de la méthode de Timoshenko, la section transversale de la poutre reste normale à l'axe neutre avant flexion, mais elle ne le sera plus après la flexion.
- La théorie de Bernoulli-Euler ne prend pas en considération les contraintes transversales dues aux cisaillements ce qui est le contraire pour le cas de la théorie de Timoshenko.

#### Méthode de Bernoulli-Euler

On considère une poutre de section constante dont la vibration transversale est donnée par sa flèche  $y(x,t)$  par rapport à l'axe neutre longitudinal  $x$  et au temps  $t$ .

L'équilibre dynamique est établi sur un élément de poutre de longueur  $dx$  à la figure V.24. Les propriétés de la poutre sont définies comme suit :

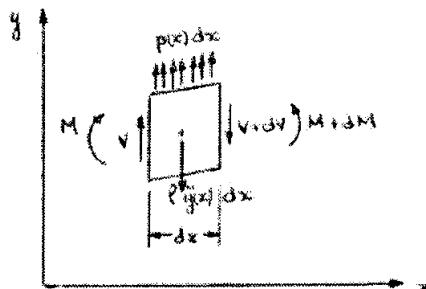


FIGURE V.24 – Équilibre dynamique d'un élément de poutre.

#### V.4. Étude Des Modes Vibratoires et Analyse Des Contraintes Pour Un Châssis 1-D

Tel que :

- P : masse linéique.
- L : longueur de la poutre.
- E : module d'élasticité.
- I : moment d'inertie selon l'axex.
- P(x) : chargement linéaire.

$$M = EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (\text{V.54})$$

$$V = \frac{dM}{dx} = EI \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} \quad (\text{V.55})$$

Équilibre dynamique en y :

$$p(x) - \frac{dV}{dx} = \rho \ddot{y} \quad (\text{V.56})$$

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = p(x)$$

Tel que :

- M : moment fléchissant.
- V : effort tranchant.
- $\rho \ddot{y}$  : inertie de l'élément de poutre (N/m).
- y(x, t) : flèche de la poutre à partir de sa position d'équilibre statique.

#### Hypothèses appliquées :

- Longueur de la poutre constante dans le temps.
- Inertie de rotation négligée.
- Déformation en cisaillement négligée.
- Section constante dans le temps sur toute la longueur de la poutre.
- Rigidité constante sur toute la longueur de la poutre.

Pour simplifier l'étude on suppose que la poutre est en vibration libre (pas de force d'excitation),  $p(x)=0$ .

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{V.57})$$

Pour trouver la flèche Y(x), on suppose que le mouvement est harmonique. Y(x) = amplitude des vibrations selon l'axe x.

$$y(x, t) = Y(x) \times G(t) \quad (\text{V.58})$$

avec :

$$G(t) = G_1 \sin(\omega t) + G_2 \cos(\omega t) \quad (\text{V.59})$$

L'équation du mouvement de la poutre devient :

$$EIG(t) \frac{\partial^4 Y}{\partial x^4} + \rho Y(x) \frac{\partial^2 G}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{V.60})$$

Puisque  $\ddot{G}(t) = -\omega^2 G(t)$ , on obtient :

$$EI \frac{\partial^4 Y}{\partial x^4} - \rho \omega^2 Y = 0 \quad (\text{V.61})$$

La solution de cette équation s'écrit comme suit :

$$Y_n(x) = A \cos \beta_n x + B \sin \beta_n x + C \cosh \beta_n x + D \sinh \beta_n x \quad (\text{V.62})$$

avec  $\beta_n$  nombre d'onde (rad/m) :

$$\beta_n = \sqrt[4]{\frac{\rho \omega^2 n}{EI}} \quad (\text{V.63})$$

On reprend maintenant le modèle suivant :

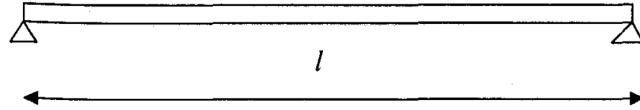


FIGURE V.25

#### Conditions aux limites :

$$\begin{array}{ll} \text{Pour } x=0 & W(0)=0 \quad \frac{d^2 W}{dx^2}(0)=0 \\ \text{Pour } x=L & W(L)=0 \quad \frac{d^2 W}{dx^2}(L)=0 \end{array}$$

$$\begin{aligned} W(x) = & C_1(\cos \beta_x + \cosh \beta_x) + C_2(\cos \beta_x - \cosh \beta_x) \\ & + C_3(\sin \beta_x + \sinh \beta_x) + C_4(\sin \beta_x + \sinh \beta_x) \end{aligned} \quad (\text{V.64})$$

En appliquant les conditions aux limites  $C_1 = C_2 = 0$

$$C_2(\sin \beta_l + \sinh \beta_l) + C_4(\sin \beta_l - \sinh \beta_l) = 0 \quad (\text{V.65})$$

$$-C_3(\sin \beta_l - \sinh \beta_l) - C_4(\sin \beta_l + \sinh \beta_l) = 0$$

La solution non triviale nous donne :

$$-(\sin \beta_l + \sinh \beta_l)^2 + (\sin \beta_l - \sinh \beta_l)^2 = 0 \quad (\text{V.66})$$

Cette équation peut être simplifiée comme suit :

$$\sin \beta_l \sinh \beta_l = 0 \quad (\text{V.67})$$

Les fréquences naturelles obtenues dans ce cas sont :

$$\omega_n = (\beta_n l)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho Al^4}} \quad (\text{V.68})$$

$$\beta_n l = n\pi \quad (\text{V.69})$$

La pulsation  $\omega_n$  en fonction de la fréquence  $f_n$  est :

$$\omega_n = 2 \times \pi \times f_n \quad (\text{V.70})$$

Les caractéristiques de la poutre :

- La masse volumique  $\rho = 2700 \text{ Kg/m}^3$
- Le module de Young  $E = 71000 \text{ MPa}$
- Le coefficient de poisson  $\nu = 0.33$
- Le moment d'inertie  $I = 107.2 \text{ cm}^4$
- la longueur  $l = 600 \text{ mm}$ .
- $A = 10.1 \text{ cm}^2$

#### Application numérique :

Modes	Fréquences (Hz)
Mode 1	2.624
Mode 2	10.49
Mode 3	23.618

TABLE V.4 – Fréquences de flexion de la poutre .

#### Méthode de Timoshenko

Les effets de la déformation due à la torsion et de l'inertie de rotation sont pris en compte. L'étude vibratoire d'une poutre en C soumise à des sollicitations agissant sur le centre de torsion sera effectuée dans cette partie. La figure V.26 montre la section en U (UPE) de la poutre.  $00'$  représente le centre de torsion et  $GG'$  le centre de gravité de la poutre.

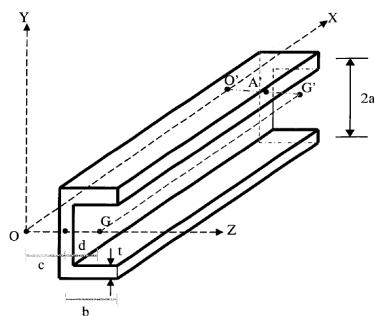


FIGURE V.26 – Section de la poutre UPE.

Nous supposons que la poutre de la figure 5.18 est soumise à une charge répartie  $f(x)$  agissant sur l'axe  $GG'$ . Le chargement ne passe pas par le centre de cisaillement ce qui implique que la poutre sera soumise à la flexion ainsi qu'à la torsion. Pour étudier le mouvement couplé résultant de ces deux sollicitations, la charge se trouvant sur l'axe du centre de gravité  $GG'$  sera remplacée par la même charge ainsi qu'un moment  $fe$  réparti le long de l'axe de torsion  $OO'$  comme montré à la figure V.27. Les caractéristiques géométriques de cette poutre sont illustrées ci-dessous :

$e = c + d$ , tel que :

$$c = \frac{a^2 b^2 t}{I_z} \quad (\text{V.71})$$

$$d = \frac{b^2}{2(a+b)} \quad (\text{V.72})$$

$$I_z = \frac{2}{3}a^3t + 2\left(\frac{1}{12}bt^3 + bta^2\right) \simeq \frac{2}{3}a^3t + 2a^2bt \quad (\text{V.73})$$

$$I_y = \frac{2}{3}b^3t + 2\left(\frac{1}{12}at^3 + atb^2\right) \simeq \frac{2}{3}b^3t + 2b^2at \quad (\text{V.74})$$

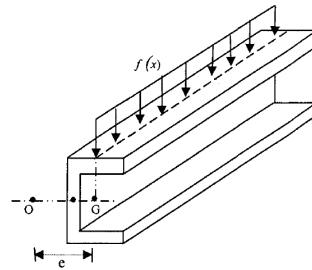


FIGURE V.27 – Chargement de la poutre agissant sur l'axe  $GG'$ .

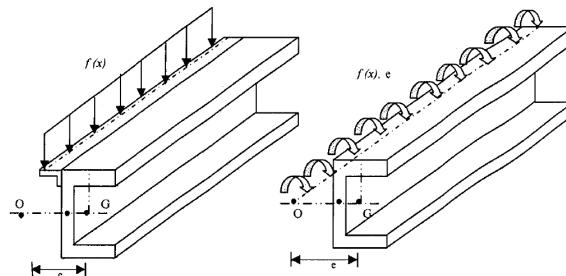


FIGURE V.28 – Charge et moment agissants sur le moment de torsion

### Équations de flexion et de torsion

Le chargement agissant sur l'axe de torsion provoque une flexion ainsi qu'une torsion de la poutre. L'équation de flexion de la poutre est comme suit :

$$EI_z \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} = f \quad (\text{V.75})$$

Avec :

- $EI_z$  : rigidité à la flexion suivant l'axe Z.
- $v$  : flèche de la poutre dans le sens Y.

La forme de l'équation de torsion de la poutre en U est une somme du couple de Saint-Venant  $T_{sv}$  et le couple résultant de la contrainte de gauchissement  $T_w$ .

$$T(x) = T_{sv}(x) + T_w(x) = G.J \frac{d\Phi}{dx} - EJ_w \frac{d^3\Phi}{dx^3} \quad (\text{V.76})$$

tel que :

- $\Phi$  angle de torsion (rotation).
- $G.J$  rigidité de la torsion dans le cas d'une torsion uniforme (absence des contraintes de déformations).
- $EJ_w$  : rigidité de la déformation.
- $J_w$  : moment d'inertie de la section transversale.

$$J = \frac{1}{3} \sum b_i t_i^3 = \frac{1}{3} (2bt^3 + 2at^3) = \frac{2}{3} t^3 (a + b) \quad (\text{V.77})$$

$$J_w = \frac{a^2 b^3 t}{3} \frac{4at + 3bt}{2at + 6bt} \quad (\text{V.78})$$

En dérivant l'équation V.76 par rapport à x ( $\frac{dT}{dx} = f_e$ ) on aura :

$$GJ \frac{d^2\Phi}{dx^2} - EJ_w \frac{d^4\Phi}{dx^4} = f_e \quad (\text{V.79})$$

La résolution de l'équation V.75 et de l'équation V.79 nous donne la flèche du à la flexion  $v(x)$  ainsi que la flèche de torsion  $\Phi(x)$  de la poutre sous le chargement statique  $f(x)$ .

Pour les vibrations libres de la poutre, les forces d'inertie qui agissent suivant y et  $\Phi$  sont données ci-dessous :

$$-\rho A \frac{\partial^2}{\partial t^2} (v - e\phi) \quad (\text{V.80})$$

$$-\rho I_G \frac{\partial^2\phi}{\partial t^2} \quad (\text{V.81})$$

Où :

- $v - e\phi$  : deflexion transversale nette de la poutre suivant l'axe Y.
- $\rho$  densité ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )
- A : section transversale de la poutre ( $\text{m}^2$ ).
- $I_G$  : moment d'inertie polaire par rapport au centre de gravité ( $\text{m}^4$ ).

Les équations de vibration couplées (flexion et torsion) de la poutre en C peuvent être écrites en utilisant l'équation V.80 à la place du f et en incluant la force d'inertie dans l'équation V.79 :

$$EI_z \frac{d^4v}{dx^4} = -\rho A \frac{\partial^2}{\partial t^2} (v - e\Phi) \quad (\text{V.82})$$

$$GJ \frac{d^2\Phi}{dx^2} - EJ_w \frac{d^4\Phi}{dx^4} = -\rho A \frac{\partial^2}{\partial t^2} (v - e\phi) + \rho I_G \frac{d^2\phi}{\partial t^2} \quad (\text{V.83})$$

Les calculs qui suivront seront appliqués au modèle de poutre de la figure V.22.

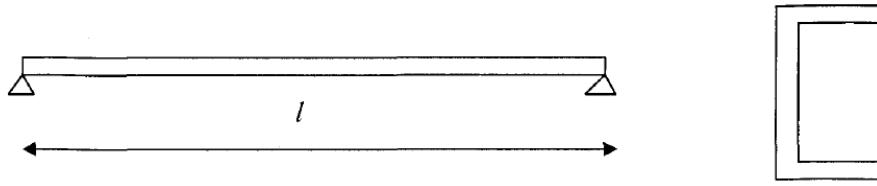


FIGURE V.29 – Poutre simplement appuyée des deux côtés.

Dans le cas des vibrations libres de la poutre, la solution est sous la forme :

$$\nu(x, t) = V(x)C_1 \cos(\omega t + \theta_1) \quad (\text{V.84})$$

$$\phi(x, t) = \Phi(x)C_2 \cos(\omega t + \theta_2) \quad (\text{V.85})$$

Où  $V(x)$  et  $\Phi(x)$  sont les modes normales,  $\omega$  c'est la fréquence naturelle de vibration,  $C_1$  et  $C_2$  sont des constantes et les angles de phase  $\theta_1$  et  $\theta_2$ . En remplaçant les équations V.84 et V.85 dans les équations V.82 et V.83 le résultat sera :

$$EI_z \frac{d^4\nu}{dx^4} = \rho A \frac{\partial^2}{\partial t^2}(V - e\Phi) \quad (\text{V.86})$$

$$GJ \frac{d^2\Phi}{dx^2} - EI_w \frac{d^4\Phi}{dx^4} = -\rho A \frac{\partial^2}{\partial t^2}(V - e\Phi) + \rho I_G \frac{d^2\Phi}{dt^2} \quad (\text{V.87})$$

Conditions aux limites :

$$V(x) = 0 \quad \text{Pour} \quad x = 0 \quad x = l$$

$$\frac{d^2V}{dx^2} = 0 \quad \text{Pour} \quad x = 0 \quad x = l$$

$$\Phi(x) = 0 \quad \text{Pour} \quad x = 0 \quad x = l$$

$$\frac{d^2\Phi}{dx^2} = 0 \quad \text{Pour} \quad x = 0 \quad x = l$$

Ces conditions aux limites peuvent être satisfaites par :

$$V_j(x) = A_j \sin \frac{j\pi x}{l} \quad (\text{V.88})$$

$$\Phi_j(x) = B_j \sin \frac{j\pi x}{l} \quad (\text{V.89})$$

$$j = 1, 2, 3, \dots$$

Où  $A_j$  et  $B_j$  sont des constantes. Nous pouvons ainsi trouver les fréquences naturelles en remplaçant les équations V.88 et V.89 dans les équations V.86 et V.87 :

$$-GJ\left(\frac{j\pi}{l}\right)^2B_j - EJ_w\left(\frac{j\pi}{l}\right)^4B_j = \rho A e \omega_j^2(A_j - e B_j) - \rho I_w \omega_j^2 B_j \quad (\text{V.90})$$

Nous pouvons les réécrire sous la forme suivante :

$$(p^2 - \omega_j^2)A_j + (\omega_j^2 e)B_j = 0 \quad (\text{V.91})$$

$$(q^2 \omega_j^2)A_j + (r^2 - \omega_j^2)B_j = 0 \quad (\text{V.92})$$

Sachant que :

$$p^2 = \frac{EI_z j^4 \pi^4}{\rho Al^4} \quad q^2 = \frac{Ae}{I_z + Ae^2} \quad r^2 = \frac{GJl^2 j^2 \pi^2 + EJ_w j^4 \pi^4}{\rho l^4 (I_G + Ae^2)}$$

$$\det = \begin{bmatrix} p^2 - \omega_j^2 & \omega_j^2 e \\ q^2 \omega_j^2 & r^2 - \omega_j^2 \end{bmatrix} = 0$$

Alors on aura l'équation suivante :

$$wj^4(1 - q^2 e) - \omega_j^2(p^2 + r^2) + p^2 r^2 = 0 \quad (\text{V.93})$$

Les pulsations Alors :

$$wj^2 = \frac{p^2 + r^2 \pm [(p^2 - r^2)^2 + 4p^2 r^2 q^2 e]^{0.5}}{2(1 - eq^2)} \quad (\text{V.94})$$

La pulsation  $\omega_j$  en fonction de la fréquence  $f_j$  est :

$$\omega_j = 2 \times \pi \times f_j \quad (\text{V.95})$$

Les caractéristiques de la poutre :

- La masse volumique  $\rho = 2700 \text{Kg/m}^3$
- Le module de Young  $E = 71000 \text{MPa}$
- Le coefficient de poisson  $\nu = 0.33$
- Le moment d'inertie  $I = 107.2 \text{cm}^4$
- la longueur  $l = 600 \text{ mm}$ .
- $A = 10.1 \text{cm}^2$

Le tableau V.5 montre les résultats des modes de torsion de la poutre simplement appuyée des deux côtés en utilisant la méthode de Timoshenko et à l'aide du logiciel de calcul MATLAB.

Application numérique :

Modes	Fréquences (Hz)
Mode 1	3.34
Mode 2	9.620
Mode 3	16.25

TABLE V.5 – Fréquences de torsion de la poutre .

#### V.4.3 Calcul numérique des modes vibratoires

Dans cette section, nous allons refaire les calculs des modes vibratoires des poutres à parois minces étudiées précédemment dans la partie analytique afin de comparer les résultats obtenus.

Le modèle de la poutre de la figure V.22 sera utilisé pour le calcul des modes vibratoires dus à la flexion en utilisant le logiciel de simulation Abaqus. Une comparaison entre les fréquences de flexion analytiques trouvées par la méthode de Bernoulli-Euler et les résultats de la simulation numérique est présentée au tableau V.6. En ce qui concerne la partie torsion les fréquences numériques sont présentées au tableau V.7 .

Les simulations numériques ont été réalisées en utilisant 35 032 éléments tétraèdres de type C3D4 avec un espace de 4 mm entre chaque noeud. Le maillage comprenait 18 465 noeuds. La méthode Lanczos a été utilisée pour le calcul des modes vibratoires. Les figures 5.23 et 5.24 montrent les trois premiers modes de flexion et de torsion de la poutre simplement appuyée des deux côtés. Pour les conditions aux limites, vu que c'est des appuis simples que nous avons sur les côtés, alors le déplacement vertical a été annulé.

#### Modes flexion

Modes	Fréquences sur Abaqus (Hz)	Fréquences de Bernoulli- Euler (Hz)
1	3.12	2.624
2	11.5	10.49
3	21.56	23.618

TABLE V.6 – Fréquences de flexion .

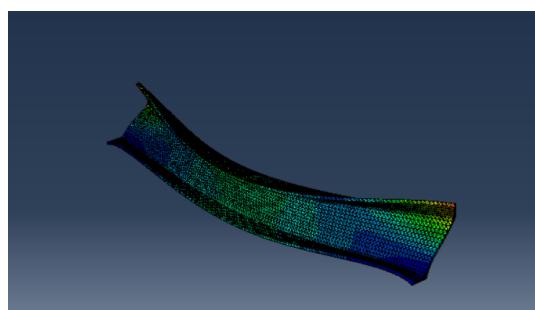




FIGURE V.30 – Modes de flexion de la poutre simplement appuyée des deux côtés.

### Modes torsion

Modes	Fréquences sur Abaqus (Hz)	Fréquences de Timoshenko (Hz)
1	4.11	3.34
2	10.25	9.620
3	14.5	16.25

TABLE V.7 – Fréquences de torsion .

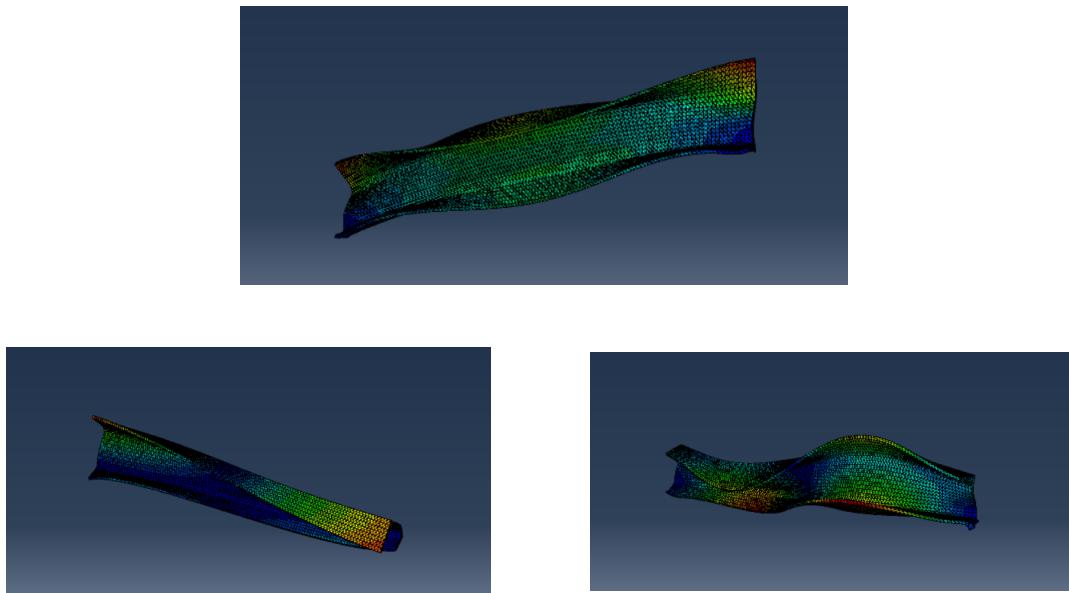


FIGURE V.31 – Modes de torsion de la poutre simplement appuyée des deux côtés.

### Remarque :

Puisque les fréquences d'excitation de la route varient de 0 à 20 Hz, c'est pour cela, l'intérêt a été porté seulement aux premiers modes de vibration.

#### V.4.4 Conclusion

L'étude de la poutre étalon a démontré que les résultats obtenus par le logiciel de simulation Abaqus sont valides , car les résultats obtenus dans le cas de la flexion et

de la torsion de la poutre par la simulation sur le logiciel Abaqus sont très proches aux résultats obtenus analytiquement par la méthode de Bernoulli-Euler ( le cas de flexion ) et de Timoshenko (pour la torsion).

## V.5 Étude Des Modes Vibratoires et Analyse Des Contraintes Pour Un Châssis 3-D

Vu que dans le chapitre précédent, la validation des résultats numériques a été faite avec ceux de l'analytique donc, dans cette partie, toutes les études que nous réaliserons seront numériques.

Au départ, les comportements vibratoires et dynamiques du châssis au complet ont été traités. Ces études sont nécessaires pour prévenir le phénomène de résonance qui engendre la fatigue des structures. Par la suite, l'évaluation des contraintes a aussi été réalisée durant cette section afin de pouvoir détecter les parties les plus contraignantes et celles qui le sont moins. Durant la conception, le logiciel CATIA a été utilisé pour la modélisation du châssis. D'autre part, la simulation des différents comportements a été effectuée en utilisant le logiciel Abaqus.

### V.5.1 Analyse vibratoire

Les modes propres du châssis en aluminium ont été calculés sur Abaqus en utilisant le module des perturbations linéaires. Le châssis a été maillé avec les éléments tétraèdres (C3D8R, C3D6, C3D4). Ce sont les éléments les plus appropriés pour ce modèle de châssis. Il est composé de 150 589 éléments. La méthode Lanczos a été utilisée pour le calcul des modes vibratoires. Le déplacement vertical a été annulé.

#### Représentation du chargement et conditions aux limites

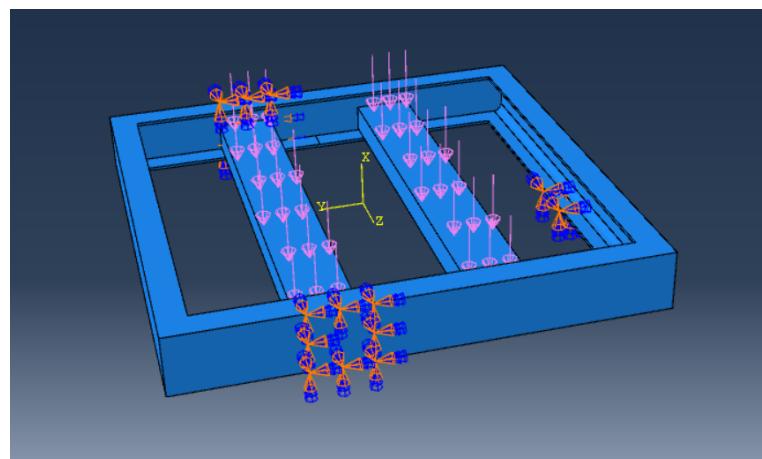


FIGURE V.32 – chargement et conditions aux limites

### Modes flexion

Modes	Fréquences sur Abaqus (Hz)	Fréquences de Bernoulli-Euler (Hz)
1	3.33	2.624
2	12.01	10.49
3	20.65	23.618

TABLE V.8 – Fréquences de flexion du châssis.

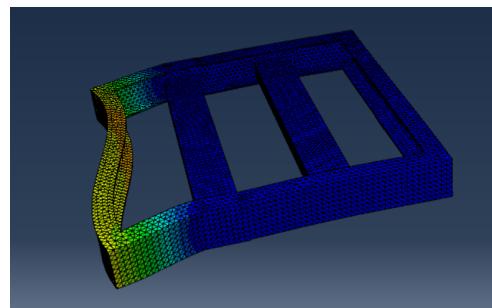
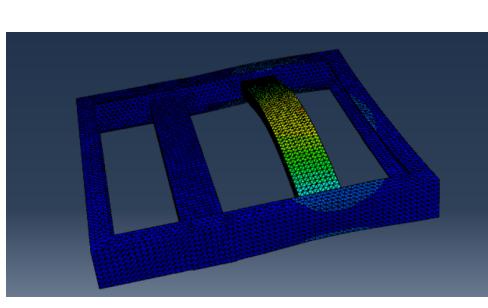
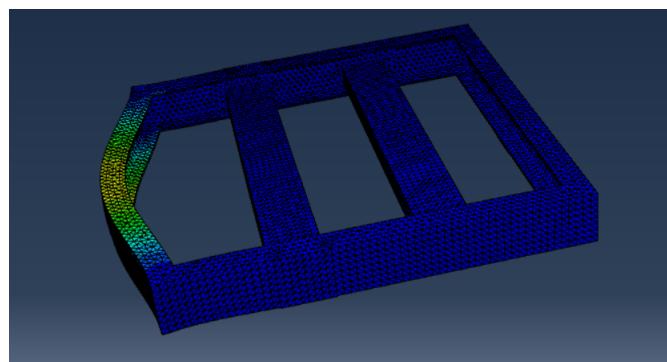


FIGURE V.33 – Modes de flexion du châssis 3D.

### Modes torsion

Modes	Fréquences sur Abaqus (Hz)	Fréquences de Timoshenko (Hz)
1	4.66	3.34
2	7.88	9.620
3	16.16	16.25

TABLE V.9 – Fréquences de torsion du châssis.

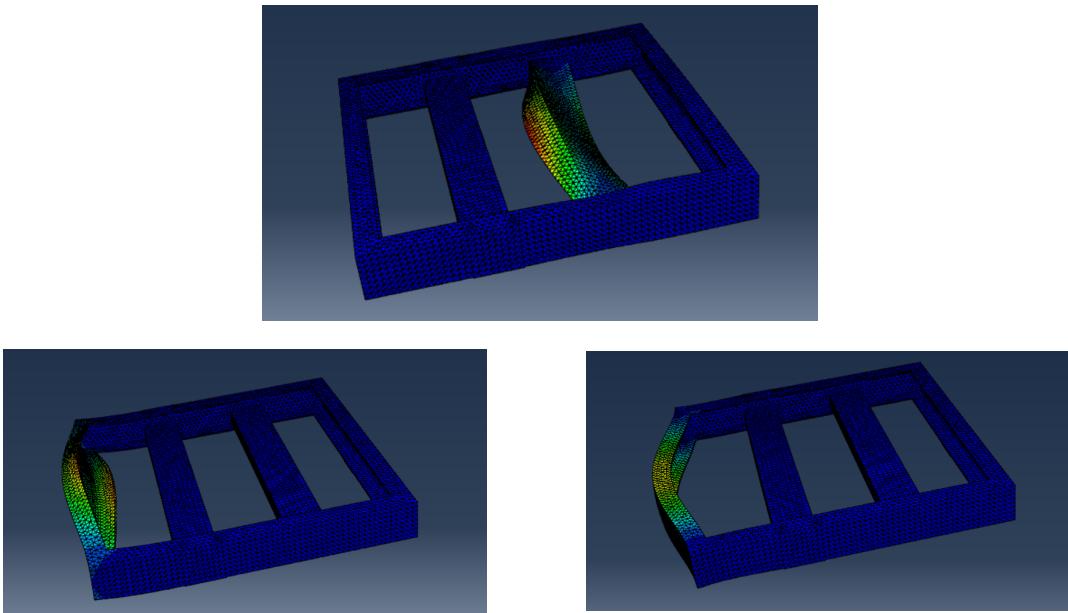


FIGURE V.34 – Modes de torsion du châssis 3D.

### Calcul d'erreur

le calcul d'erreur se fait par la formule suivante :

$$\text{Erreur} = 100\% \times |f_i^{\text{Numr}} - f_i^{\text{Theor}}| / |f_i^{\text{Theor}}| \quad (\text{V.96})$$

### Erreur pour les modes de flexion

Modes	Fréquences sur Abaqus (Hz)	Fréquences de Bernoulli-Euler (Hz)	Erruers
1	3.33	2.624	0.22
2	12.01	10.49	0.12
3	20.65	23.618	0.14

### Erreur pour les modes de torsion

Modes	Fréquences sur Abaqus (Hz)	Fréquences de Timoshinko (Hz)	Erruers
1	4.66	3.34	0.28
2	7.88	9.620	0.22
3	16.16	16.25	0.056

### Résultat et commentaire

En analysant les fréquences obtenues analytiquement et numériquement pour le cas de la poutre étalon , les résultats sont très proches. Les fréquences de la poutre sont assez proches que le châssis 3D, même si leurs dimensions sont assez différentes. Les fréquences de flexion pour le châssis sont très proches sauf pour le troisième mode où la différence est de 3 Hz. Elle est due aux positions différentes des essieux du châssis. Par contre les fréquences de torsion sont un peu décalé l'erreur est élevé par rapport au flexion , c'est le cas des châssis à trois roues qui ont toujours ce type de résultats au niveau de torsion et aussi demeurent moins stable par rapport aux châssis à quatre roues .

## V.5.2 Calcul des contraintes

Avant de commencer l'analyse des contraintes, certaines approximations doivent être effectuées en s'appuyant sur la mécanique des milieux continus qui repose sur des principes de la physique qui sont montrés ci-dessous :

### 1. Loi de bilan

Il faut bien traduire le fait qu'il n'y a pas de transformation de la masse du milieu étudié même si localement il peut y avoir une modification de la masse volumique. Dans le système d'étude, la masse de la plaque étalon sera considérée constante tout au long de cette étude. La loi de conservation de la masse est donnée ci-dessous :

$$\frac{dm}{dt} \simeq 0 \quad (\text{V.97})$$

### 2. Loi de comportement

Les analyses seront effectuées dans un milieu élastique. L'équation de comportement dans ce cas est une relation biunivoque entre le tenseur des contraintes et le tenseur Eulérien de déformation.

$$\bar{\sigma} = f(\bar{E}) \quad (\text{V.98})$$

### 3. Hypothèse d'existence de l'état naturel

Avant tout, il faudrait admettre qu'il existe un état naturel du matériau dénué de toutes contraintes, tel que :

$$\bar{\sigma} = 0 \quad (\text{V.99})$$

Cet état sert aussi de référence pour les déformations, donc :

$$\bar{E} = 0 \quad (\text{V.100})$$

Toutes les relations entre les contraintes et les déformations sont écrites à partir de l'état naturel.

### 4. Hypothèse de linéarité

À partir de l'état naturel, l'hypothèse de linéarité permet de relier les variations des composantes du tenseur des contraintes  $\sigma_{ij}$ , aux composantes du tenseur des déformations infinitésimales  $\varepsilon_{ij}$  par des fonctions linéaires :

$$\sigma_{ij} = \lambda_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (\text{V.101})$$

$$i, j, k, l = 1, 2, 3$$

Les quantités  $\lambda_{ijkl}$  ne dépendent que des propriétés du milieu et sont des fonctions du point  $x$ . Elles apparaissent comme des composantes d'un tenseur du quatrième ordre, dit tenseur d'élasticité au point  $x$ . Ce tenseur d'élasticité  $\lambda_{ijkl}$  est nécessairement symétrique en  $i, j$  puisque  $\sigma_{ij}$  l'est. Il est aussi symétrique en  $k, l$  puisque  $\varepsilon_{kl}$  l'est.

### 5. Hypothèse d'isotropie

D'un point de vue macroscopique, de nombreux matériaux de construction tels que l'aluminium dans notre cas répondent assez bien à l'hypothèse d'isotropie : ils n'admettent aucune direction privilégiée. Le tenseur d'élasticité qui ne dépend que des propriétés du milieu doit donc être un tenseur isotrope. Les composantes dans une base euclidienne arbitraire doivent être invariantes par une transformation orthogonale arbitraire. Un tenseur isotrope symétrique d'ordre 4 vérifie :

$$\lambda_{ijkl} = \lambda_{klji} \quad (\text{V.102})$$

Et ses composantes sont de la forme :

$$\varepsilon_{ijkl} = \varepsilon \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \quad (\text{V.103})$$

$\lambda$  et  $\mu$  sont les coefficients d'élasticité de Lamé. Le matériau qui sera utilisé est l'aluminium. L'hypothèse de linéarité permet d'étudier la déformation due à un champ uniaxial des contraintes.

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} \varepsilon_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} \varepsilon_{kl} + \delta_{il} \delta_{jk} \varepsilon_{kl}) \quad (\text{V.104})$$

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + \mu (\delta_{ik} \varepsilon_{kj} + \delta_{il} \varepsilon_{lj})$$

Alors :

$$\sigma_{ij} = \lambda e \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}$$

Avec :

$$e = \text{trace}(\varepsilon)$$

### 6. Hypothèse d'homogénéité

D'un point de vue macroscopique, le milieu considéré est homogène, au moins par morceaux. Le châssis du robot peut être décomposé en sous-domaines homogènes (méthode des éléments finis). Les coefficients d'élasticité  $\lambda$  et  $\mu$  sont constants en tout point.

Dans cette section, nous allons analyser les contraintes que subit le châssis du robot suivant le chargement statique .

#### Remarque

Concernant le calcul dynamique, ce dernier nécessite une machine très puissante, nous avons essayé plusieurs fois de lancer le calcul après le paramétrage et le maillage mais sans résultat.

### Chargement statique

Le calcul des contraintes que subissent le châssis a été effectué sous le chargement statique énoncé précédemment dans le chapitre V.80 section III.4.1. Ce calcul est très important, pour la validation du modèle du châssis conçu et aussi pour l'amélioration de ce dernier [3] , [1] et [16].

Lors de la modélisation, le châssis a été encastré au niveau des trois roues. Pour les charges, elles étaient appliquées uniformément sur toute la surface des traverses du châssis telle que montrée à la figure V.35.

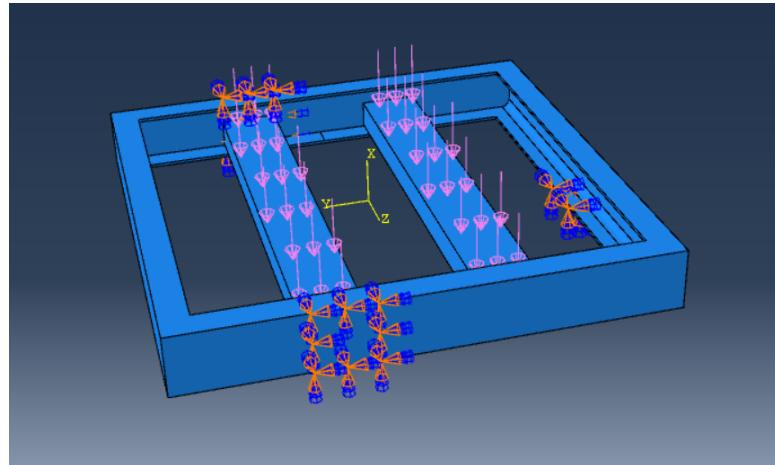


FIGURE V.35 – Modélisation du chargement et conditions au limites sur Abaqus

Les résultats obtenus pour la distribution des contraintes de Von Mises de châssis sont montrés aux figure V.36.

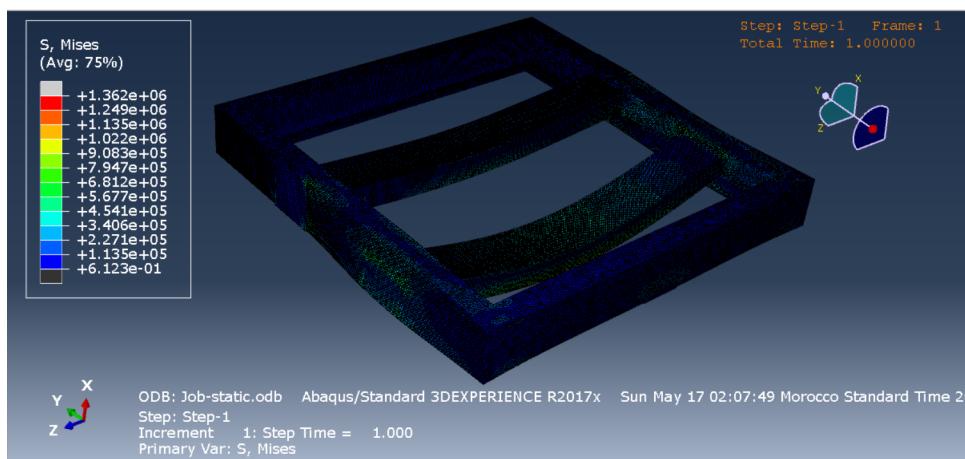


FIGURE V.36 – Distribution des contraintes du châssis en

La contrainte maximale obtenue pour le châssis est de 136 MPa qui est inférieur à la limite élastique du matériau ( $R_e = 275$  MPa). Cette contrainte est au niveau de la soudure des traverses et aussi au section dangereuse de cette dernière (le milieu de la traverse). La figure V.37 présente la position de cette contrainte maximale.

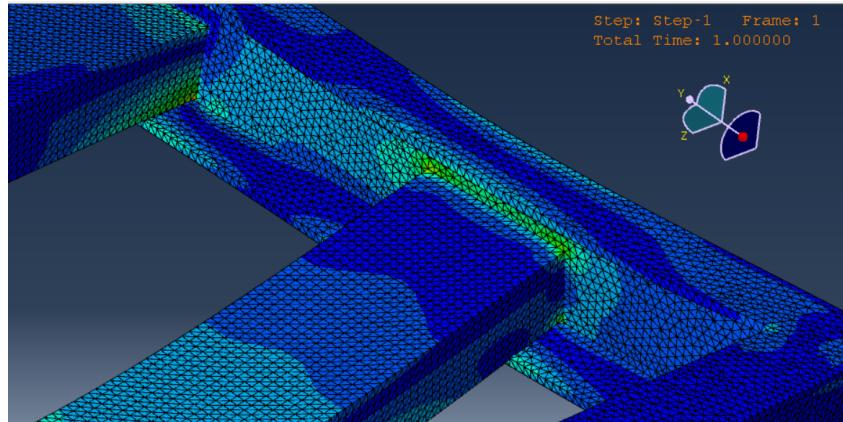


FIGURE V.37 – la zone la plus contraignant du châssis

Le déplacement du châssis sous chargement statique est montré à la figure . Un déplacement maximal d'une valeur de 2.13 mm est causé par la charge des composants (système de levage) et le chargement. Cette valeur est considérée très admissible et qu'elle aura aucune influence sur les autres éléments montée sur cette traverse (composants électronique et cartes électroniques ).

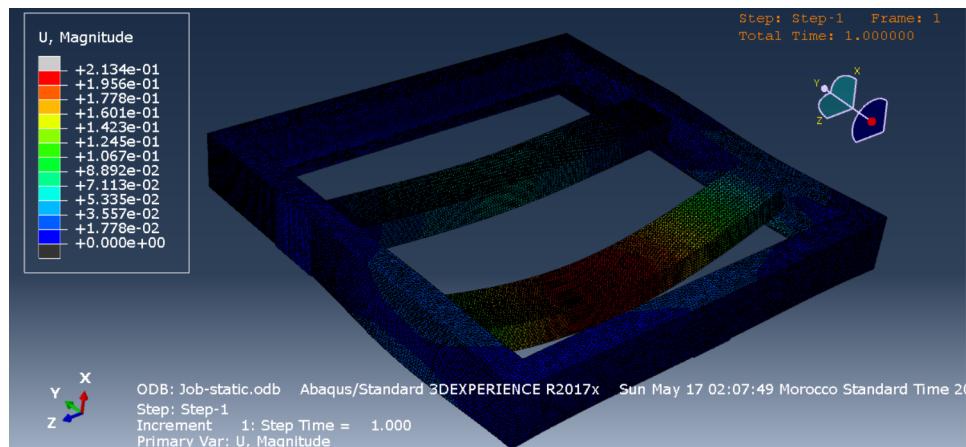


FIGURE V.38 – Déplacement maximal du châssis sous chargement statique.

## Conclusion

Dans ce chapitre, pour mieux comprendre l'aspect théorique du calcul dynamique et statique , nous avons traité les notions de base du calcul qui sera entamé pour l'étude du projet. Ce chapitre présente les différents types de calculs des structures, parmi eux, l'analyse des modes propres et les fréquences de vibration. Dans ce qui suit, on va traiter les solutions technologiques des autres composants et aussi la démarche de construction 3D du modèle.

## CHAPITRE

## VI

**CONSTRUCTION ET  
FABRICATION DU MODÈLE**

Dans cette partie du rapport, nous détaillerons les étapes successives de la construction mécanique de notre robot ainsi la fabrication des pièces procédés et méthodes en prenant en considération plusieurs paramètres comme le critère économique et le bon fonctionnement . Elle se termine par une approche d'estimation du coût de production unitaire du robot.

## VI.1 Construction Du Robot

Comme une dernière étape nous avons construit le modèle final du robot figures VI.1 , VI.2 et VI.3. Le modèle est divisé sur quatre parties principales :

- Système du levage
- Système de suspension
- Fabrication du châssis
- Tôle du robot

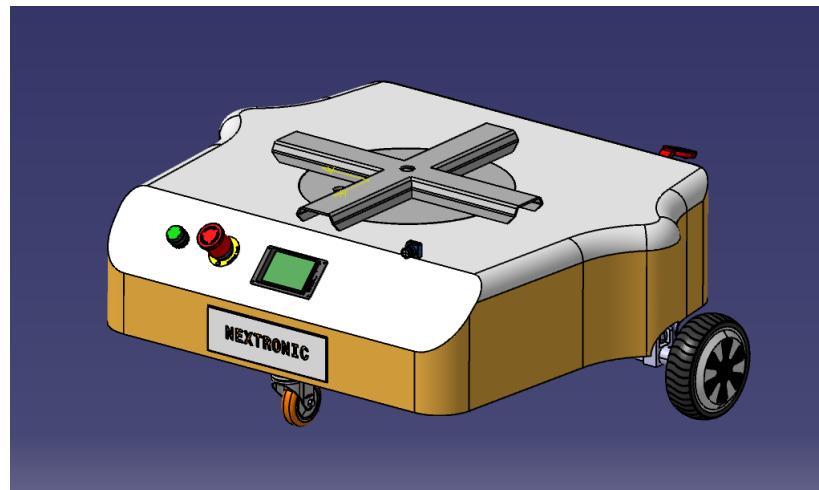


FIGURE VI.1 – Le modèle 3D final du robot

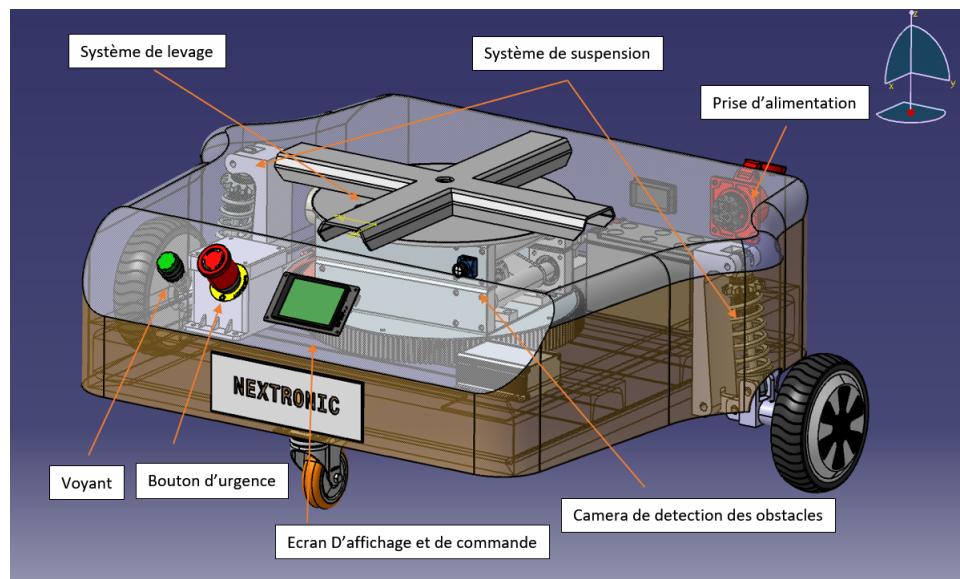


FIGURE VI.2 – Le modèle 3D final du robot détaillé

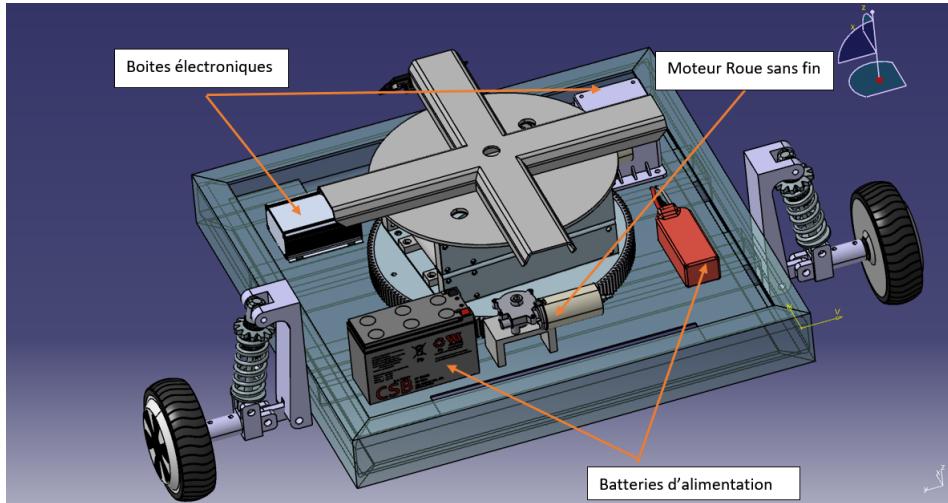


FIGURE VI.3 – Le modèle 3D final du robot détaillé vue interne

## VI.2 Système du levage

Pour répondre à cette exigence ergonomique plusieurs solutions sont présentées, la plus optimale (au niveau de consommation d'énergie) convenable pour nous (un bon rapport qualité-prix et fonctionnement) était la configuration ciseaux figures VI.4 , VI.5 et VI.6, ce système est un module complet dont se constitue par une palette de positionnement, moteur, arbre fileté de transmission , les manchons ou paliers, système d'engrenage pour la rotation et finalement les roulements de guidage .

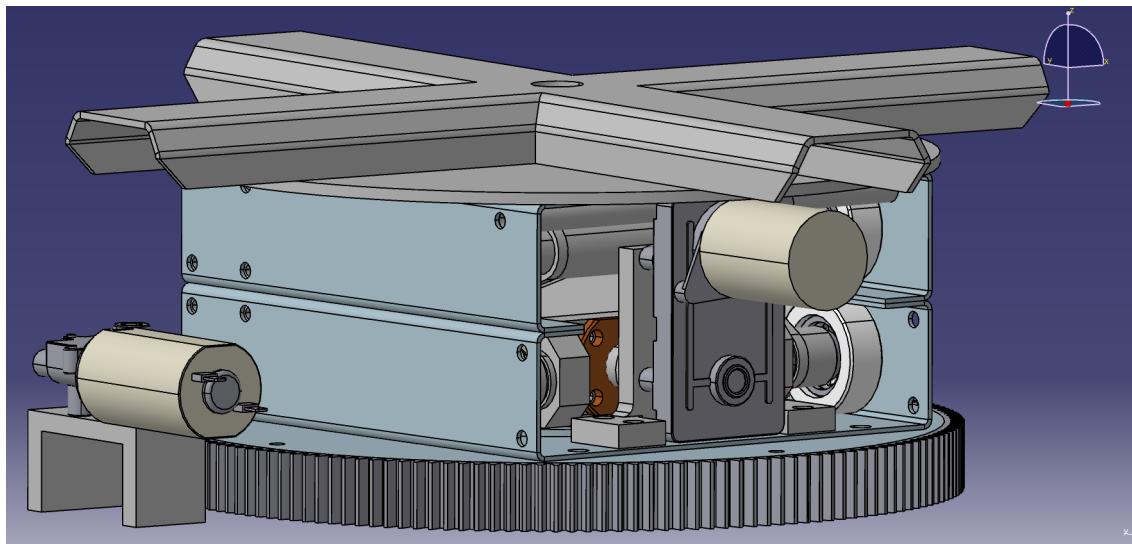


FIGURE VI.4 – Module de levage vue de gauche

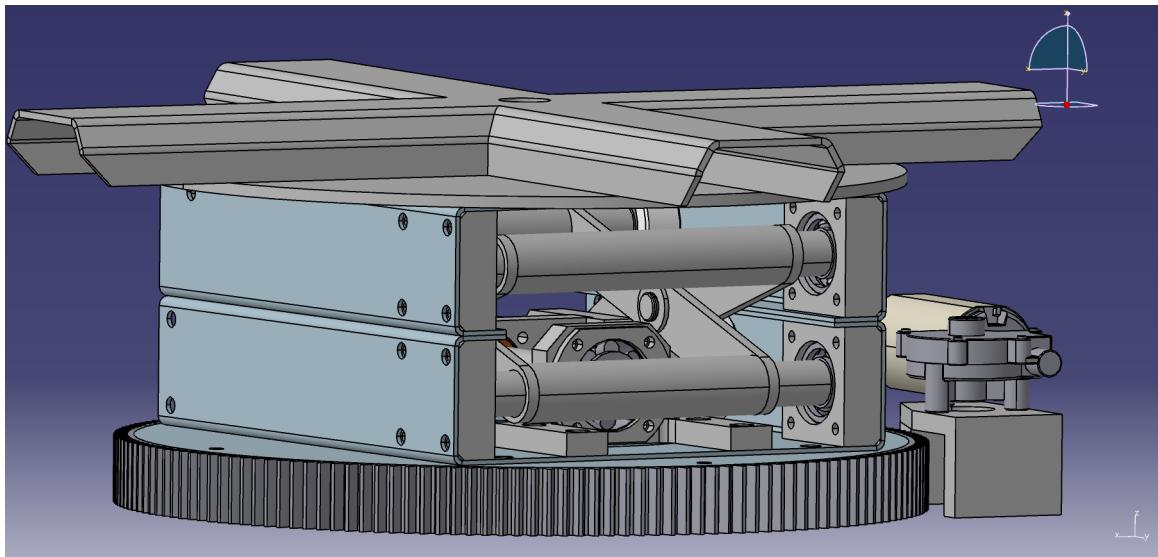


FIGURE VI.5 – Module de levage vue de droite

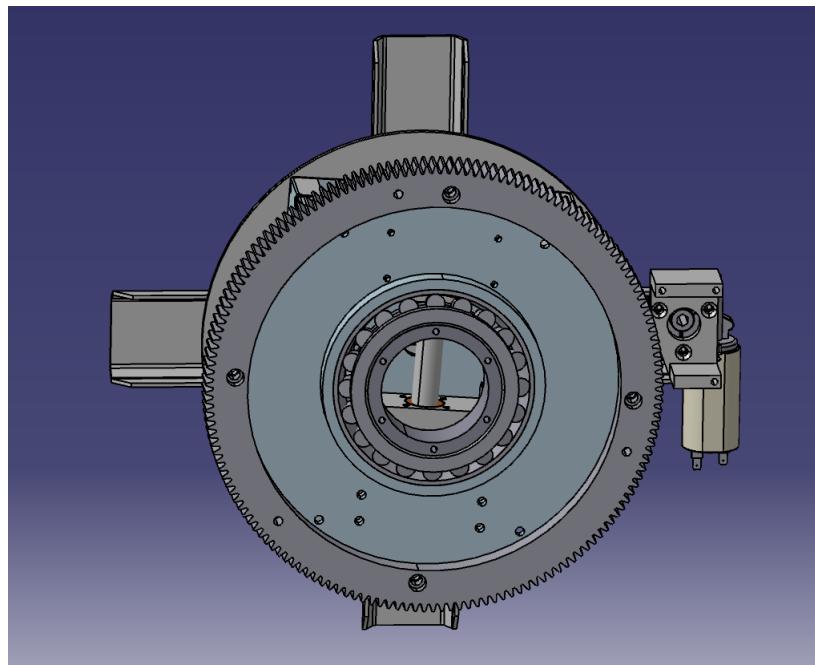


FIGURE VI.6 – Module de levage vue de dessous

### VI.3 Système de suspension

Nous savons bien citer le rôle de suspension dans la partie d'étude dynamique et aussi le critère de choix des amortisseurs. Ainsi dans le chapitre III nous avons présenté la relation entre la rigidité de suspension nécessaire en fonction de la rigidité de châssis dont la valeur de rigidité optimale était quatre fois par rapport au rigidité de châssis .

L'ensemble est se constitue par un palier principal , amortisseur , bielle et une monchiant qui a deux trous de fixation de la roue , figure VI.7.

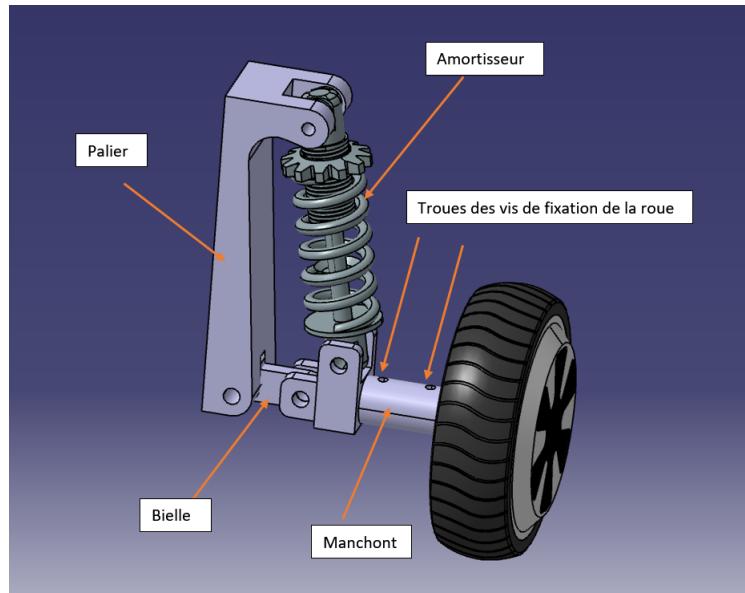


FIGURE VI.7 – Système de suspension

### VI.3.1 La fabrication des pièces du système de suspension

Avant de développer cette partie nous présentons d'abord quelques notion fondamentale de la fabrication et aussi la relation classique entre les deux bureaux , le bureau d'étude et de méthode (flux document entre les deux ).

Le B.M est la structure responsable de l'étude et de la préparation de la fabrication. Il s'agit de prévoir, lancer puis superviser le processus de fabrication permettant de réaliser des pièces conformes aux spécifications du dessin de définition tout en respectant un programme de production donné (nombre de pièces et délai de livraison), dans un contexte technique, humain et financier déterminé. Pour atteindre ces objectifs, le B.M peut intervenir de deux manières différentes :

1. Le B.M étudie l'usinage des pièces définies par des dessins (travail unitaire ou petite série en sous-traitance).
2. Le B.M participe à l'élaboration du dessin de définition avec le B.E, puis en étudiant l'usinage. (Travail en grande série : pièces conçues et fabriquées dans la même entreprise)

Comme un bureau d'études figure VI.8 nous devons alors élaborer les dessins de définition des pièces correspondantes annexe C et aussi l'estimation du coût final du produit en collaborant avec les sous-traitants ( peut être considéré ici comme un BM).

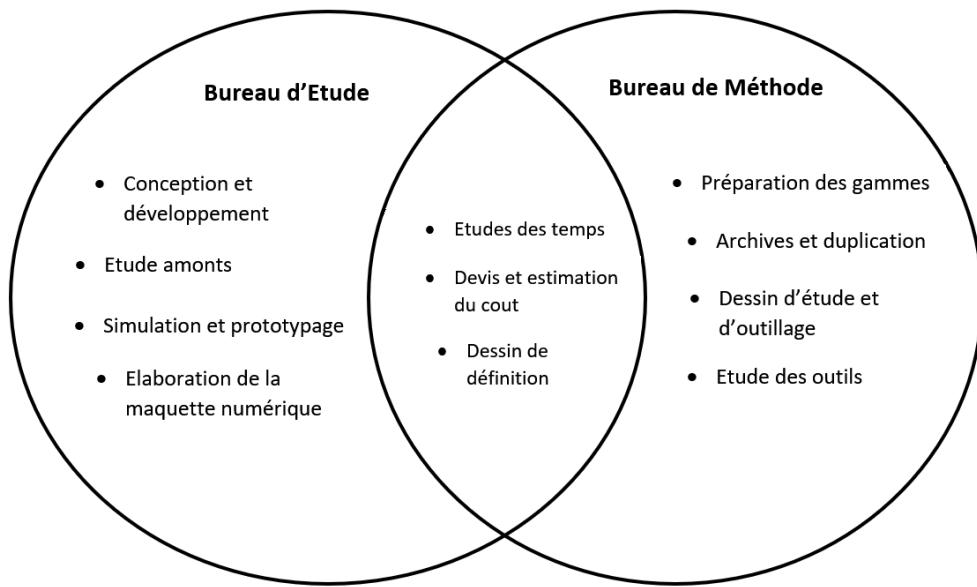


FIGURE VI.8 – L'intersection entre les bureaux d'étude et de méthode

## VI.4 Fabrication du châssis

Après le choix des profilets du châssis et le dimensionnement, nous avons déterminé le procédé d'assemblage du châssis , nous suggérons le soudage par friction malaxage. Cette méthode apporte une faible diminution des caractéristiques mécaniques de l'alliage d'aluminium utilisé par rapport aux autres méthodes standard de soudage. Par contre, actuellement cette technique est en évolution et il est difficile de l'utiliser pour des pièces de formes complexes.

## VI.5 Product Structure Variante PSV

### VI.5.1 Définition

Le PSV est un format amélioré pour afficher la structure du produit pour les produits qui ont de nombreuses variantes. Il est particulièrement adaptée aux produits qui se composent d'un grand nombre de matériaux individuels et qui sont fabriqués et configurés à la commande figure VI.9.

#### Remarque

La couleur bleue réfère que la pièce ou l'assemblage n'est pas fabriqué localement, par exemple le système de levage est un module complet acheté d' une autre fournisseur.

- **SC** : Poste de sciage.
- **PER** : Poste de perçage.
- **SD** : Poste de Soudage.
- **TR** : Poste de Tournage.
- **FR** :Poste de fraisage.
- **DéC** : Poste de découpage.

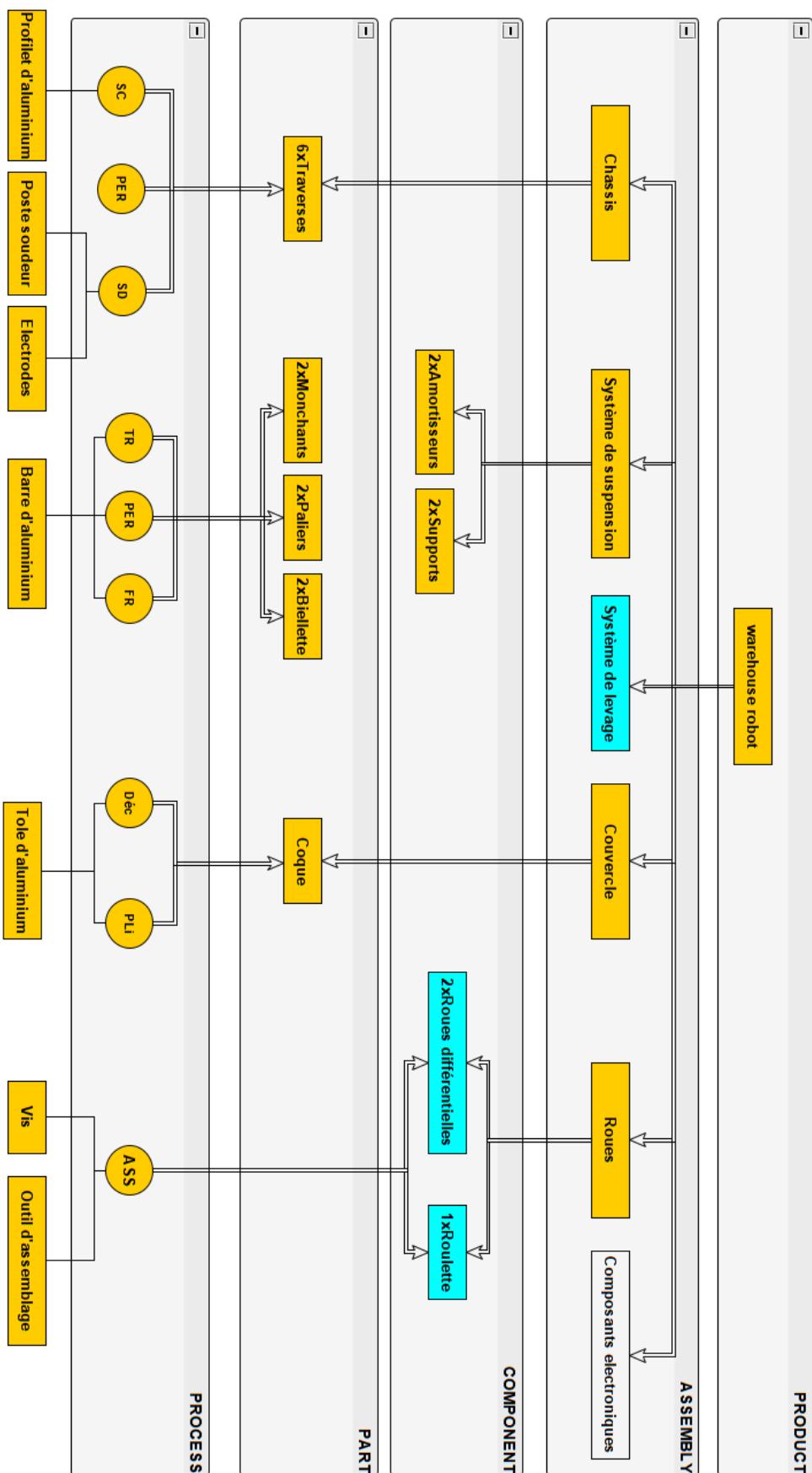


FIGURE VI.9 – Product Structure Variant PSV du robot

- **PLi** : Poste de Pliage.
- **ASS** : Assemblage

## **VI.6 Estimation du coût**

Après avoir identifié le PSV, nous pouvons alors estimer le coût facilement mais encore nous avons besoin seulement des prix approximatifs de la matière première et des autres composants nécessaires, alors après le confinement cette opération peut être effectuée et par la suite nous donnera un coût approché de notre robot.

## **Conclusion du Chapitre**

En guise de conclusion à cette Partie , nous pouvons affirmer que le robot a été conçu correctement, simple à fabriquer car les solution technologique adopté sont connus et basiques mais des améliorations et des modifications sûrement seront affectés sur le modèle après la phase suivante "prototypage ".

CHAPITRE

VII

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Pour la première fois, nous avons pu réaliser le fruit de notre travail de conception, de design et d'écriture. Nous avons mis au point un robot répondant à un cahier des charges très strict. Mais avant toute chose, ce projet fut un exemple parfait de ce que sera notre vie après le passage à l'École. Gestion de groupe, de planning, prises de décision, expérimentations, validations, commandes, coups de téléphone, envois d'e-mails, réunions de crise, état d'avancement,... ce projet nous a plongé totalement dans le monde de l'ingénieur moderne. Ce fut pour nous tous une expérience inédite et formidable dont peu d'étudiants Ingénieurs en Conception Mécanique peuvent se prévaloir.

De plus, nous avons également appris à nous servir de nos mains en complément de nos méninges. Les blessures, usures, décharges et autres coups ne sont que fadaises par rapport à la satisfaction ressentie une fois l'objectif atteint.

Lors de la réalisation de ce projet, plusieurs parties ont été traitées. Au départ, le choix conceptuel dont l'apparition du premier modèle et le dimensionnement de châssis. Et après nous avons entamés l'étude cinématique pour définir les lois d'entrée sortie de système ,définition des relation entre les vitesses et les paramètres géométriques du robot .Ensuite l'étude du comportement dynamique et vibratoire du châssis a été effectuée. Cette étude a permis de faire une comparaison des fréquences naturelles obtenues avec les modèles 2-D simplifié, 2-D et 3-D du robot. Le bondissement et le tangage de ce dernier ont été étudiés dans les trois systèmes. Les résultats de fréquence obtenus sont très similaires.Vu que les résultats de fréquences obtenus pour le robot varient de 1 à moins de 40 Hz , nous pouvons dire que ces fréquences correspondent aux vibrations de basse fréquence.

D'un autre côté, les fréquences naturelles de flexion et de torsion et les modes vibratoires ont été calculés pour la poutre étalon avec des conditions aux limites bien définies .Cette partie nous a servi à la validation de la partie numérique, vu que le châssis au complet a été étudié numériquement. Ces calculs ont été effectués en utilisant la méthode de Bernoulli Euler pour le calcul des fréquences de flexion et la méthode de Timoshenko pour celles dues à la torsion. Ces résultats de fréquences ont été comparés avec ceux obtenus de l'analyse faite numériquement sur Abaqus. Une très grande similarité est apparue au niveau des fréquences analytiques et numériques.

Ensuite, le châssis au complet a été simulé numériquement sur Abaqus. Une étude vibratoire et une analyse des contraintes ont été réalisées pour le même modèle du châssis.Les contraintes que subit le châssis suivant un chargement statique ont aussi étaient évaluées. La valeur de la contrainte maximale obtenue pour le châssis en aluminium est de 136 MPa qui est inférieur à la limite élastique du matériaux Re=275 MPa.

En outre nous avons l'intention de perfectionner ce projet ultérieurement par l'ajout des parties fondamentales comme la simulation Crash-Test ,création du manuel d'utilisation et le plus important c'est l'élaboration d'un plan de maintenance préventive du robot .

Les études réalisées dans le cadre de ce projet m'a permis donc d'acquérir un bagage technique, d'améliorer mes acquis, d'approfondir mes connaissances dans le domaine robotique, de confronter la théorie à la pratique, de s'adapter à la vie professionnelle et de se préparer afin d'être à la hauteur des responsabilités qui me seront confiées dans le futur.

## Annexe A

### PRODUCT SPECIFICATIONS

Color	Gold
Motherboard system	Original Taotao motherboard system
Battery	Samsung lithium-ion   36V/4,4Ah (20 cells)
Battery range	Up to 15 km
Charger	With stop function & UL certified
Charging time	2 hours
Motor power	700 watts (2x 350 watts)
Top speed	15 km/h
Wheel size	6,5 inch
Maximum load	120 kg
Weight hoverboard	10 kg
Lights	Blue led lights
Quality marks	CE, ROHS, FCC & UL2272
Warranty	2 years

FIGURE A.1 – Spécifications techniques des roues choisies

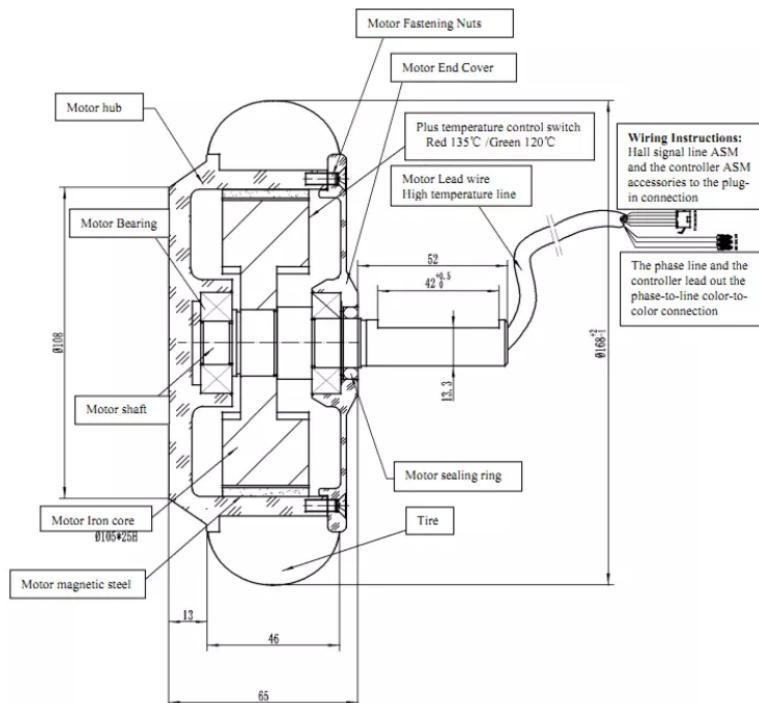


FIGURE A.2 – Composition structurelle de la roue différentielle



FIGURE A.3 – Figure réel des roues choisis

### A.1 Les Valeurs d'inerties calculés sur CATIA :

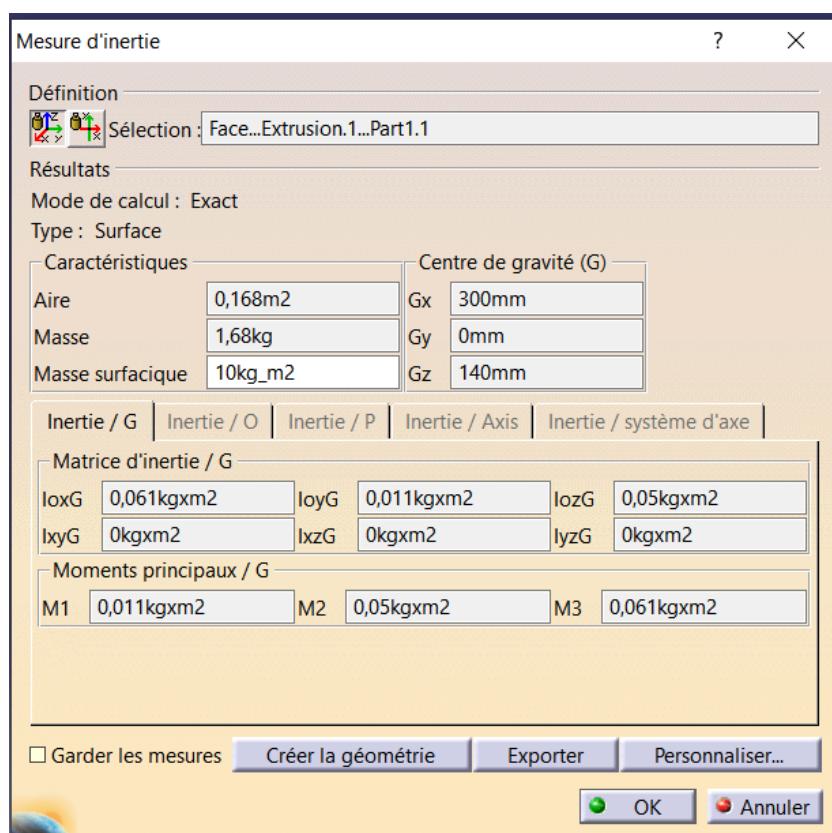


FIGURE A.4 – Capture des valeurs d'inerties trouvées

### A.2 Les propriétés de la poutre UPE choisie

Table 1. Materials properties estimated by curve fitting of the Voigt model.

Rubber hardness	Without preload		Preload – 10% of strain			
	Stiffness $K_v$ [N/m]	Damping $C_v$ [Ns/m]	Stiffness $K_v$		Damping $C_v$	
			Absolute Value [N/m]	Variation	Absolute Value [Ns/m]	Variation
Soft – 25 shore	149,986,61	114,59	163,948,13	9,31%	124,91	9,00%
Medium – 33 shore	244,605,26	144,48	268,906,82	9,93%	150,13	3,91%
Hard – 48 shore	980,356,04	107,37	1,104,445,91	12,66%	102,72	-4,33%

FIGURE A.5 – Propriétés mécaniques du caoutchouc

**2.2.4 POUTRELLES UPE**

construction d'usage général.

Longueur 6, 12 et 15 mètres.

Coupes droites ou biaisées sur commande (facturées en supplément).



Désignation	Code	Dimensions mm				Poids	Section	Moments		Surfaces	
		h	b	a	e			kg/m	cm²	lx	Iy
UPE 80	UPE80	80	50	4	7	7,90	10,1	107,2	26,80	0,34	43,45
UPE 100	UPE100	100	55	4,5	7,5	9,82	12,5	206,9	41,37	0,40	41,00
UPE 120	UPE120	120	60	5	8	12,10	15,4	363,5	60,58	0,46	37,98
UPE 140	UPE140	140	65	5	9	14,50	18,4	599,5	85,64	0,52	35,95
UPE 160	UPE160	160	70	5,5	9,5	17,00	21,7	911,1	113,90	0,58	34,01
UPE 180	UPE180	180	75	5,5	10,5	19,70	25,1	1353	150,40	0,64	32,40
UPE 200	UPE200	200	80	6	11	22,80	29,0	1909	190,90	0,70	30,60
UPE 220	UPE220	220	85	6,5	12	26,60	33,9	2682	243,90	0,76	28,43
UPE 240	UPE240	240	90	7	12,5	30,20	38,5	3599	299,90	0,81	26,89
UPE 270	UPE270	270	95	7,5	13,5	35,20	44,8	5255	389,20	0,89	25,34
UPE 300	UPE300	300	100	9,5	15	44,40	56,6	7823	521,50	0,97	21,78

FIGURE A.6 – Tableau Des Profils UPE

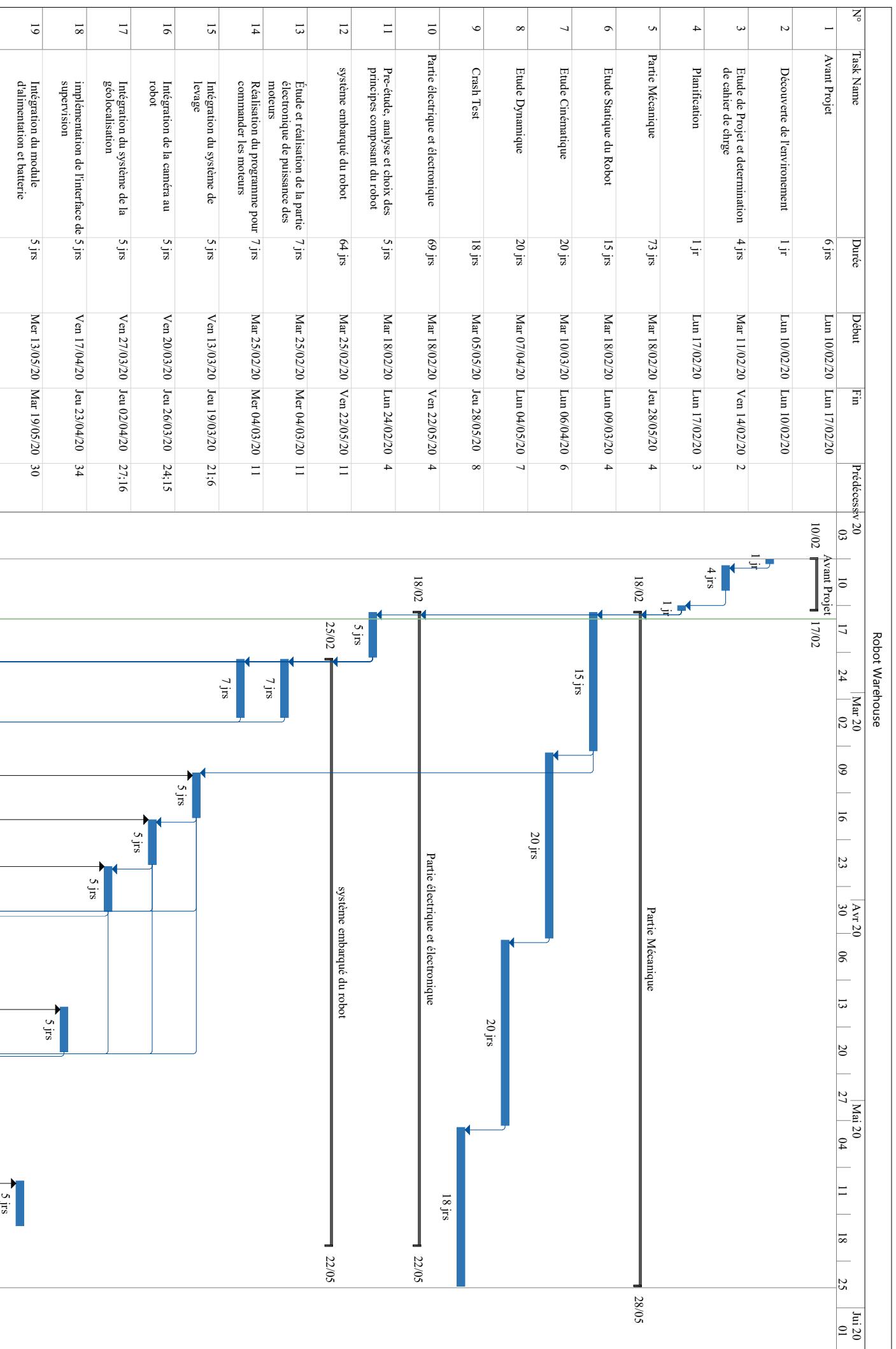
## Caractéristiques Mécaniques selon norme NFEN 485-2 et 755-2 (1)

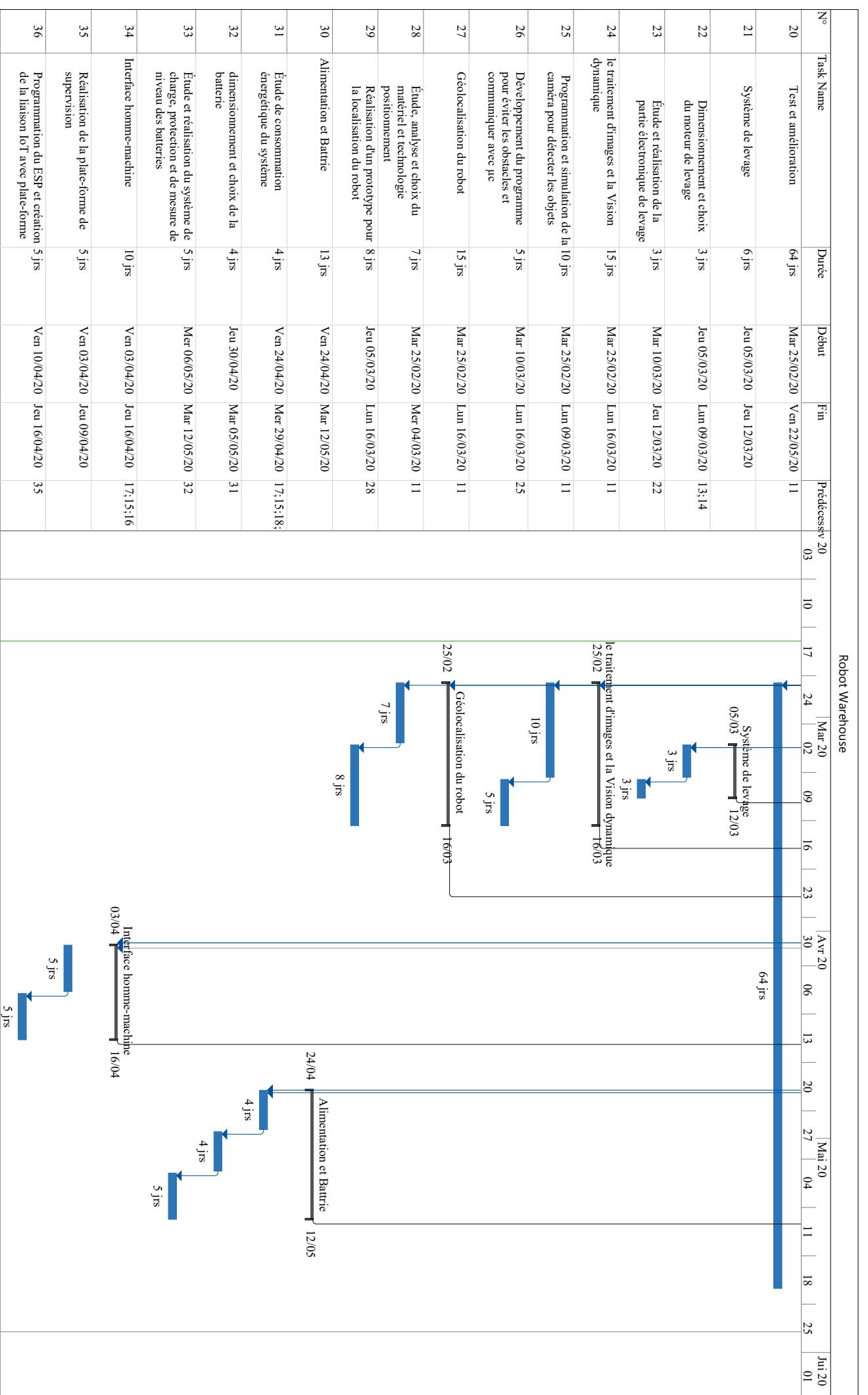
Alliage	Etat	Caractéristiques mécaniques en traction					Module (2) de Young MPa	Résistance au cisaillement MPa
		R <sub>p</sub> 0,2 mini MPa	R <sub>m</sub> mini	R <sub>m</sub> maxi MPa	A 5,65 mini %	Dureté Brinell		
1050A	H14	85	105	145	4	35	69 000	70
1200	O	25	75	105	24	23	69 000	60
2017A	T4	260	390	425	13	111	74 000	275
2024	T3	290	340	475	14	123	73 000	290
2030	T3	240	370	460	7	115	73 000	280
3003	H14	125	145	185	3	45	69 000	95
3005	H14	150	170	215	2	55	69 000	120
<b>Isolal®</b>	H11	90	120	175	3	---	69 000	---
<b>Isoxal®</b>	H12	120	145	195	2	---	69 000	---
Poudral® ep < 2,1	H12	120	145	195	2	---	69 000	---
Poudral® ep > 2,1	H12	80	140	180	12	---	69 000	---
5005	H24	120	145	185	3	45	69 000	95
5083	H111	125	275	350	15	70	71 000	175
Sealium®	H116	220	305	10	----	71 000	----	----
5086	H111	100	240	310	15	65	71 000	165
5754	H111	80	190	240	18	55	70 000	140
5754	H22	130	220	270	10	75	70 000	140
6005A	T6	215	260	285	8	90	79 500	175
6060	T6	160	215	245	12	85	69 500	150
6061	T6	240	260	8	95	69 000	190	190
6082	T6	200	270	10	95	69 000	210	210
6106	T6	200	250	14	85	69 500	---	---
7075	T6	475	545	8	150	72 000	305	305

(1) Produits laminés pour usage général: NF EN 485-2, Produits filés pour usage général: NF EN 755-2  
 (2) Le module de compression est environ 2% plus élevé que le module de traction

### Caractéristiques Mécaniques

FIGURE A.7 – Les propriétés mécanique de la poutre UPE choisie





## Annexe B

### B.1 Les Matrices des Systèmes des équations

#### B.1.1 Modèle réel à deux dimensions 2-D

$$\begin{aligned}
 & \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \end{pmatrix} = \\
 & \quad \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (-k_{r1} - k_1)/m_1 & 1/m_1 & -b_1/m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & k_1/m_1 & b_1/m_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (k_1 l_1)/m_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \end{pmatrix} \\
 & + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{r1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{r2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (b_1 l_1)/m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

FIGURE B.1

### B.1.2 Modèle réel à trois dimensions 3D

$$\begin{aligned}
 & \text{II} \\
 & \left( \begin{array}{ccccccccc}
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 (-k_{r1} - k_1)/m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 k_1/m_4 & b_1/m_4 & k_3/m_4 & b_3/m_4 & k_2/m_4 & b_2/m_4 & -k_1 - k_2 - k_3/m_4 & -b_1 - b_2 - b_3/m_4 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_1/m_1 \\
 (k_1 l_1)/I_4 & (b_1 l_1)/I_4 & (k_3 l_3)/I_4 & (b_3 l_3)/I_4 & (k_2 l_1)/I_4 & (b_2 l_1)/I_4 & (-k_1 l_1 - k_3 l_3 - k_2 l_2)/I_4 & (-b_1 l_1 - b_3 l_3 - b_2 l_2)/I_4 & b_1/m_1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_3/m_3 \\
 (k_1 l_2)/I_4 & (b_1 l_2)/I_4 & (k_3 l_2)/I_4 & (b_3 l_2)/I_4 & (k_2 l_2)/I_4 & (b_2 l_2)/I_4 & (-k_1 l_2 - k_3 l_2 - k_2 l_2)/I_4 & (-b_1 l_2 - b_3 l_2 - b_2 l_2)/I_4 & b_3/m_3 \\
 \end{array} \right) \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \\ \dot{x}_9 \\ \dot{x}_{10} \\ \dot{x}_{11} \\ \dot{x}_{12} \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

FIGURE B.2

$$\left( \begin{array}{c}
 0 \\
 b_1/m_1 \\
 0 \\
 b_3/m_3 \\
 0 \\
 b_2/m_2 \\
 1 \\
 -b_1 - b_2 - b_3/m_4 \\
 0 \\
 (-b_1 l_1 - b_3 l_3 - b_2 l_2)/I_4 \\
 0 \\
 (-b_1 l_2 - b_3 l_2 - b_2 l_2)/I_4 \\
 0 \\
 k_{r1} \\
 k_{r3} \\
 0 \\
 0 \\
 k_{r2} \\
 0 \\
 0
 \end{array} \right) + 
 \left( \begin{array}{c}
 0 \\
 k_1 l_1/m_1 \\
 0 \\
 -k_3 l_3/m_3 \\
 0 \\
 k_2 l_1/m_2 \\
 0 \\
 (-k_1 l_1 + k_3 l_3 - k_2 l_1)/m_4 \\
 0 \\
 (-k_1 l_1^2 + k_3 l_3^2 - k_2 l_1^2)/I_4 \\
 0 \\
 (-k_1 l_1 l_2 + k_3 l_3 l_2 + k_2 l_1 l_2)/I_4 \\
 0 \\
 (-k_1 l_1 l_2 - k_3 l_3 l_2 - k_2 l_1 l_2)/I_4 \\
 0 \\
 -k_2 l_2/m_2 \\
 0 \\
 (-b_1 l_1 + b_3 l_3 - b_2 l_1)/m_4 \\
 1 \\
 (-b_1 l_1^2 + b_3 l_3^2 - b_2 l_1^2)/I_4 \\
 0 \\
 (-k_1 l_1 l_2 - k_3 l_3 l_2 + k_2 l_1 l_2)/I_4 \\
 0 \\
 (-k_1 l_1 l_2 - k_3 l_3 l_2 - k_2 l_1 l_2)/I_4 \\
 0 \\
 -k_2 l_2/m_2 \\
 0 \\
 (-k_1 l_2 - k_3 l_3 + k_2 l_k)/m_4 \\
 0 \\
 (-k_1 l_1 l_2 - k_3 l_2 l_3 + k_2 l_1 l_2)/I_4 \\
 0 \\
 (-b_1 l_1 l_2 - b_3 l_2 l_3 + b_2 l_1 l_2)/I_4 \\
 0 \\
 (-b_1 l_1 l_2 + b_3 l_3 l_2 + b_2 l_2 l_2)/I_4 \\
 0 \\
 (-k_1 l_1 l_2 - k_3 l_3 l_2 - k_2 l_2 l_2)/I_4 \\
 0 \\
 -b_2 l_2/m_2 \\
 0 \\
 (-b_1 l_2 - b_3 l_3 + b_2 l_k)/m_4 \\
 0 \\
 (-b_1 l_1 l_2 - b_3 l_2 l_3 + b_2 l_1 l_2)/I_4 \\
 0 \\
 (-b_1 l_1 l_2 - b_3 l_3 l_2 - b_2 l_2 l_2)/I_4 \\
 0 \\
 x_1 \\
 x_2 \\
 x_3 \\
 x_4 \\
 x_5 \\
 x_6 \\
 x_7 \\
 x_8 \\
 x_9 \\
 x_{10} \\
 x_{11} \\
 x_{12}
 \end{array} \right)$$

FIGURE B.3

## Annexe C

### C.1 Commandes de la résolution Sur MATLAB Par La Transformé de Laplace :

#### C.1.1 Modèle à deux dimensions simplifié :

```
MATLAB Command Window                               Page 1
3 mai 2020                                         05:12:25


---


>> %% Les Paramètres du Modèle 2-D Simplifié %%
>> mg=100;
    Ig=0.061;
    l1=0.1335;
    l2=0.2665;
    k1=5000;
    k2=2500;
    b1=1500;
    b2=600;
>> %% Les Constantes du système d'équation %%
>> a=k1+k2;
    b=b1+b2;
    c=(k1*l1)-(k2*l2);
    d=(b1*l1)-(b2*l2);

    ap=c;
    bp=d;
    cp=(k1*l1^2)-(k2*l2^2);
    dp=(b1*l1^2)-(b2*l2^2);
>> %% Les Matrices d'équation d'état et de Sortie %%
>> A=[0 1 0 0;-b/mg -c/mg -d/mg;0 0 1;-ap/Ig -bp/Ig -cp/Ig -dp/Ig];
    B=[0 0 0;k1 k2 b1 b2;0 0 0;k1*l1 k2*l2 b1*l1 b2*l2];
    C=[1 0 0 0;0 1 0 0;0 0 1 0;0 0 0 1];
    D=[0];
>> %% Les Commandes de résolution Par Laplace %%
>> H=ss(A,B,C,D); %% Génération de la Matrice du Transformée de Laplace %%
>> step(H); % Affichage des Graphes des Fréquences et les Amplitudes %%
>> tf(H) %% L'affichage de solution La Matrice H(s) Ligne par ligne %%
ans =
From input 1 to output...
      5000 s^2 - 1.302e06 s - 7.25e06
1: -----
s^4 - 239.3 s^3 - 7109 s^2 - 4.999e04 s
                                         - 1.087e05

      5000 s^3 - 1.302e06 s^2 - 7.25e06 s
2: -----
s^4 - 239.3 s^3 - 7109 s^2 - 4.999e04 s
                                         - 1.087e05
```

FIGURE C.1

MATLAB Command Window  
3 mai 2020 Page 2  
05:12:25

```
667.5 s^2 - 3.293e06 s - 5.24e04
3: -----
s^4 - 239.3 s^3 - 7109 s^2 - 4.999e04 s
                                         - 1.087e05

667.5 s^3 - 3.293e06 s^2 - 5.24e04 s - 2.983e-08
4: -----
s^4 - 239.3 s^3 - 7109 s^2 - 4.999e04 s
                                         - 1.087e05

From input 2 to output...
2500 s^2 - 6.511e05 s - 3.625e06
1: -----
s^4 - 239.3 s^3 - 7109 s^2 - 4.999e04 s
                                         - 1.087e05

2500 s^3 - 6.511e05 s^2 - 3.625e06 s
2: -----
s^4 - 239.3 s^3 - 7109 s^2 - 4.999e04 s
                                         - 1.087e05

666.2 s^2 - 1.64e06 s - 1261
3: -----
s^4 - 239.3 s^3 - 7109 s^2 - 4.999e04 s
```

FIGURE C.2

```
MATLAB Command Window          Page 3
3 mai 2020                      05:12:25
                                     - 1.087e05

666.3 s^3 - 1.64e06 s^2 - 1261 s
4: -----
s^4 - 239.3 s^3 - 7109 s^2 - 4.999e04 s
                                     - 1.087e05

From input 3 to output...
1500 s^2 - 3.906e05 s - 2.175e06
1: -----
s^4 - 239.3 s^3 - 7109 s^2 - 4.999e04 s
                                     - 1.087e05

1500 s^3 - 3.906e05 s^2 - 2.175e06 s
2: -----
s^4 - 239.3 s^3 - 7109 s^2 - 4.999e04 s
                                     - 1.087e05

200.3 s^2 - 9.88e05 s - 1.572e04
3: -----
s^4 - 239.3 s^3 - 7109 s^2 - 4.999e04 s
                                     - 1.087e05

200.2 s^3 - 9.88e05 s^2 - 1.572e04 s - 8.95e-09
4: -----
s^4 - 239.3 s^3 - 7109 s^2 - 4.999e04 s
```

FIGURE C.3

---

MATLAB Command Window Page 4  
3 mai 2020  
05:12:25

```
- 1.087e05

From input 4 to output...
600 s^2 - 1.563e05 s - 8.699e05
1: -----
s^4 - 239.3 s^3 - 7109 s^2 - 4.999e04 s
- 1.087e05

600 s^3 - 1.563e05 s^2 - 8.699e05 s
2: -----
s^4 - 239.3 s^3 - 7109 s^2 - 4.999e04 s
- 1.087e05

159.9 s^2 - 3.935e05 s - 302.6
3: -----
s^4 - 239.3 s^3 - 7109 s^2 - 4.999e04 s
- 1.087e05

159.9 s^3 - 3.935e05 s^2 - 302.6 s
4: -----
s^4 - 239.3 s^3 - 7109 s^2 - 4.999e04 s
- 1.087e05

Continuous-time transfer function.
```

FIGURE C.4

### C.1.2 Modèle à deux dimensions réel :

```

>> %% Les Paramètres du Modèle 2-D Simplifié %%
m3=100;
m1=3.5;
m2=3.5;
Ig=0.061;
l1=0.1335;
l2=0.2665;
k1=5000;
k2=2500;
kr1=244605;
kr2=244605;
b1=1500;
b2=600;

%% Les Matrices d'équation d'état et de Sortie %%
A=[0 1 0 0 0 0 0 0;(-kr1-k1)/m1 -b1/m1 0 0 k1/m1 b1/m1 (k1*l1)/m1 (b1*l1)/m1;0 0
1 0 0 0 0 0 0 (-kr2-k1)/m1 -b2/m2 k2/m2 b2/m2 (-k2*l2)/m2 (-b2*l2)/m2;0 0 0 0 0 0
0;k1/m3 b1/m3 k2/m3 b2/m3 (-k1-k2)/m3 (-b1-b2)/m3 ((k2*l2)-(k1*l1))/m3 ((b2*l2)-
(b1*l1))/m3;0 0 0 0 0 0 1;k1*l1/Ig b1*l2/Ig 0 0 ((-k1*l1)+(k2*l2))/Ig ((-b1*l1)-
(b2*l2))/Ig ((-k1*l1^2)+(k2*l2^2))/Ig ((-b1*l1^2)+(b2*l2^2))/Ig];
>> B=[0;kr1;0;kr2;0;0;0;0];
>> C=eye(8);
>> D=[0];
>>
>> %% Les Commandes de résolution Par Laplace %%
>> H=ss(A,B,C,D); %% Génération de la Matrice du Transformée de Laplace %%
>> step(H); % Affichage des Graphes des Fréquences et les Amplitudes %%
>> tf(H) %% L'affichage de solution La Matrice H(s) Ligne par ligne %%

```

ans =

```

From input to output...

```

$$2.446e05 s^5 - 1.661e07 s^4 + 6.029e09 s^3 - 4.68e12 s^2$$

$$- 1.283e14 s - 5.351e14$$

$$1: \frac{s^7 + 360.7 s^6 - 3.171e05 s^5 - 8.54e07 s^4}{s^7 + 360.7 s^6 - 3.171e05 s^5 - 8.54e07 s^4}$$

$$- 3.392e10 s^3 - 1.973e12 s^2 - 3.921e13 s$$

$$- 1.551e14$$

$$2.446e05 s^6 - 1.661e07 s^5 + 6.029e09 s^4 - 4.68e12 s^3$$

$$- 1.283e14 s^2 - 5.351e14 s$$

FIGURE C.5

```

2: -----
s^7 + 360.7 s^6 - 3.171e05 s^5 - 8.54e07 s^4
- 3.392e10 s^3 - 1.973e12 s^2 - 3.921e13 s
- 1.551e14

2.446e05 s^5 + 4.629e07 s^4 - 1.753e11 s^3 - 8.627e12 s^2
- 1.439e14 s - 5.451e14

3: -----
s^7 + 360.7 s^6 - 3.171e05 s^5 - 8.54e07 s^4
- 3.392e10 s^3 - 1.973e12 s^2 - 3.921e13 s
- 1.551e14

2.446e05 s^6 + 4.629e07 s^5 - 1.753e11 s^4 - 8.627e12 s^3
- 1.439e14 s^2 - 5.451e14 s

4: -----
s^7 + 360.7 s^6 - 3.171e05 s^5 - 8.54e07 s^4
- 3.392e10 s^3 - 1.973e12 s^2 - 3.921e13 s
- 1.551e14

5: 0

5.137e06 s^5 - 7.077e08 s^4 - 1.07e12 s^3 - 1.529e14 s^2
- 9.853e14 s - 1.925e15

6: -----
s^7 + 360.7 s^6 - 3.171e05 s^5 - 8.54e07 s^4
- 3.392e10 s^3 - 1.973e12 s^2 - 3.921e13 s

```

FIGURE C.6

```
- 1.551e14

1.603e09 s^4 + 3.077e11 s^3 + 1.222e14 s^2 + 2.37e15 s
+ 3.16e15
7: -----
s^7 + 360.7 s^6 - 3.171e05 s^5 - 8.54e07 s^4
- 3.392e10 s^3 - 1.973e12 s^2 - 3.921e13 s
- 1.551e14

1.603e09 s^5 + 3.077e11 s^4 + 1.222e14 s^3 + 2.37e15 s^2
+ 3.16e15 s
8: -----
s^7 + 360.7 s^6 - 3.171e05 s^5 - 8.54e07 s^4
- 3.392e10 s^3 - 1.973e12 s^2 - 3.921e13 s
- 1.551e14

Continuous-time transfer function.

>>
```

FIGURE C.7

### C.1.3 Modèle à trois dimensions :

```

>> %% Les Paramètres du Modèle
>> m1=3.5;
>> m2=3.5;
>> m3=3.5;
>> m4=100;
>> Ig=0.061;
>> l1=0.1335;
>> l2=0.3;
>> l3=0.2665;
>> k1=2500;
>> k2=2500;
>> k3=2500;
>> kr1=244605;
>> kr2=244605;
>> kr3=244605;
>> b1=600;
>> b2=600;
>> b3=600;
>>
>> %% Les Matrices d'équation d'état et de Sortie %%
>> A=[0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;(-kr1-k1)/m1 -b1/m1 0 0 0 0 k1/m1 b1/m1 k1*l1/m4
b1*l1/m1 k1*l2/m1 b3*l2/m1;0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0;0 0 (-kr3-k3)/m3 -b3/m3 0 0
k3/m3 b3/m3 -k3*l3/m3 b3*l3/m3 k3*l2/m3 k3*l2/m3;0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
(kr2-k2)/m2 -b2/m2 k2/m2 b2/m2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;k1/m4 b1/m4 k3/m4
b3/m4 k2/m4 b2/m4 (-k1-k2-k3)/m4 (-b1-b2-b3)/m4 ((-k1*l1)+(k3*l3)-(k2*l1))/m4 ((-k1*l1)+(b3*l3)-(b2*l1))/m4
((-k1*l1)-(k3*l3)+(k2*l1))/m4 ((-b1*l1)-(b3*l3)+(b2*l1))/m4 /m4 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0;(k1*l1)/Ig (b1*l1)/Ig (k3*l3)/Ig (b3*l3)/Ig (k2*l2)/Ig
(k2*l2)/Ig ((-k1*l1)-(k3*l3)-(k2*l1))/Ig ((-b1*l1)-(b3*l3)-(b2*l2))/Ig ((-k1*l1^2)-(k3*l3^2)-(k2*l1^2))/Ig
((k3*l3^2)-(k2*l1^2))/Ig ((-b1*l1^2)+(b3*l3^2)-(b2*l1^2))/Ig ((-k1*l1^2)-(k3*l3^2)-(k2*l1^2))/Ig +(k2*l1^2))/Ig
((-b1*l1^2)-(b3*l3^2)+(b2*l1^2))/Ig;0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1
(k1*l2)/Ig (b1*l2)/Ig 0 (b3*l2)/Ig (k2*l2)/Ig (b2*l2)/Ig ((-k1*l2)-(k3*l2)-(k2*l2))/Ig
((-b1*l2)-(b3*l2)-(b2*l2))/Ig ((-k1*l2*l1)+(k3*l2*l3)+(k2*l2*l1))/Ig ((-k1*l2*l1)+(b3*l2*l3)+(b2*l2*l1))/Ig
((k3*l2*l3)-(k2*l2*l1))/Ig ((-k1*l2*l1)-(k3*l2*l3)-(k2*l2*l1))/Ig ((-k1*l2*l1)-(b3*l2*l3)-(b2*l2*l1))/Ig ];
>> B=[0;kr1;0;kr3;0;0;kr2;0;0;0;0];
>> C=eye(12);
>> D=[0];
>>
>> %% Les Commandes de résolution Par Laplace %%
>> H=ss(A,B,C,D); %% Génération de la Matrice du Transformée de Laplace %%
>> step(H); % Affichage des Graphes des Fréquences et les Amplitudes %%
>> tf(H) %% L'affichage de solution La Matrice H(s) colonne
ans =
From input to output...
2.446e05 s^8 + 4.302e08 s^7 - 6.672e10 s^6
- 1.168e14 s^5 - 6.099e15 s^4 - 3.837e18 s^3

```

FIGURE C.8

```
+ 1.903e21 s^2 + 1.758e22 s + 3.988e22
1: -----
s^10 + 1759 s^9 + 1.745e04 s^8 - 2.432e08 s^7
- 1.148e11 s^6 - 3.007e13 s^5 - 2.395e15 s^4
- 1.273e17 s^3 + 7.608e18 s^2 + 7.753e19 s
+ 1.829e20

2.446e05 s^9 + 4.302e08 s^8 - 6.672e10 s^7
- 1.168e14 s^6 - 6.099e15 s^5 - 3.837e18 s^4
+ 1.903e21 s^3 + 1.758e22 s^2 + 3.988e22 s

2: -----
s^10 + 1759 s^9 + 1.745e04 s^8 - 2.432e08 s^7
- 1.148e11 s^6 - 3.007e13 s^5 - 2.395e15 s^4
- 1.273e17 s^3 + 7.608e18 s^2 + 7.753e19 s
+ 1.829e20

2.446e05 s^8 + 4.302e08 s^7 - 2.007e11 s^6
- 1.965e14 s^5 + 1.721e16 s^4 + 3.647e18 s^3
+ 5.922e21 s^2 + 4.108e22 s + 5.822e22

3: -----
s^10 + 1759 s^9 + 1.745e04 s^8 - 2.432e08 s^7
- 1.148e11 s^6 - 3.007e13 s^5 - 2.395e15 s^4
- 1.273e17 s^3 + 7.608e18 s^2 + 7.753e19 s
+ 1.829e20
```

FIGURE C.9

```

2.446e05 s^9 + 4.302e08 s^8 - 2.007e11 s^7
      - 1.965e14 s^6 + 1.721e16 s^5 + 3.647e18 s^4
      + 5.922e21 s^3 + 4.108e22 s^2 + 5.822e22 s

4: -----
s^10 + 1759 s^9 + 1.745e04 s^8 - 2.432e08 s^7
      - 1.148e11 s^6 - 3.007e13 s^5 - 2.395e15 s^4
      - 1.273e17 s^3 + 7.608e18 s^2 + 7.753e19 s
      + 1.829e20

5: 0

4.193e07 s^8 + 6.648e10 s^7 - 1.056e13 s^6
      - 8.446e15 s^5 - 3.539e18 s^4 - 5.998e20 s^3
      + 4.586e21 s^2 + 7.58e22 s + 1.939e23

6: -----
s^10 + 1759 s^9 + 1.745e04 s^8 - 2.432e08 s^7
      - 1.148e11 s^6 - 3.007e13 s^5 - 2.395e15 s^4
      - 1.273e17 s^3 + 7.608e18 s^2 + 7.753e19 s
      + 1.829e20

2.446e05 s^8 + 4.287e08 s^7 + 3.116e09 s^6
      - 5.983e13 s^5 - 2.884e16 s^4 - 6.917e18 s^3
      - 5.442e20 s^2 + 7.295e21 s + 4.653e22

7: -----
s^10 + 1759 s^9 + 1.745e04 s^8 - 2.432e08 s^7

```

FIGURE C.10

```
- 1.148e11 s^6 - 3.007e13 s^5 - 2.395e15 s^4
- 1.273e17 s^3 + 7.608e18 s^2 + 7.753e19 s
+ 1.829e20

2.446e05 s^9 + 4.287e08 s^8 + 3.116e09 s^7
- 5.983e13 s^6 - 2.884e16 s^5 - 6.917e18 s^4
- 5.442e20 s^3 + 7.295e21 s^2 + 4.653e22 s

8: -----
s^10 + 1759 s^9 + 1.745e04 s^8 - 2.432e08 s^7
- 1.148e11 s^6 - 3.007e13 s^5 - 2.395e15 s^4
- 1.273e17 s^3 + 7.608e18 s^2 + 7.753e19 s
+ 1.829e20

9: 0

-7.218e08 s^8 - 4.285e11 s^7 + 4.812e14 s^6
- 1.675e17 s^5 + 2.554e19 s^4
- 1.262e22 s^3 + 2.666e24 s^2
+ 2.499e25 s + 5.679e25

10: -----
s^10 + 1759 s^9 + 1.745e04 s^8 - 2.432e08 s^7
- 1.148e11 s^6 - 3.007e13 s^5
- 2.395e15 s^4 - 1.273e17 s^3
+ 7.608e18 s^2 + 7.753e19 s + 1.829e20
```

FIGURE C.11

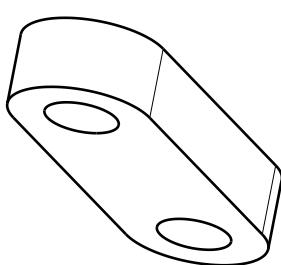
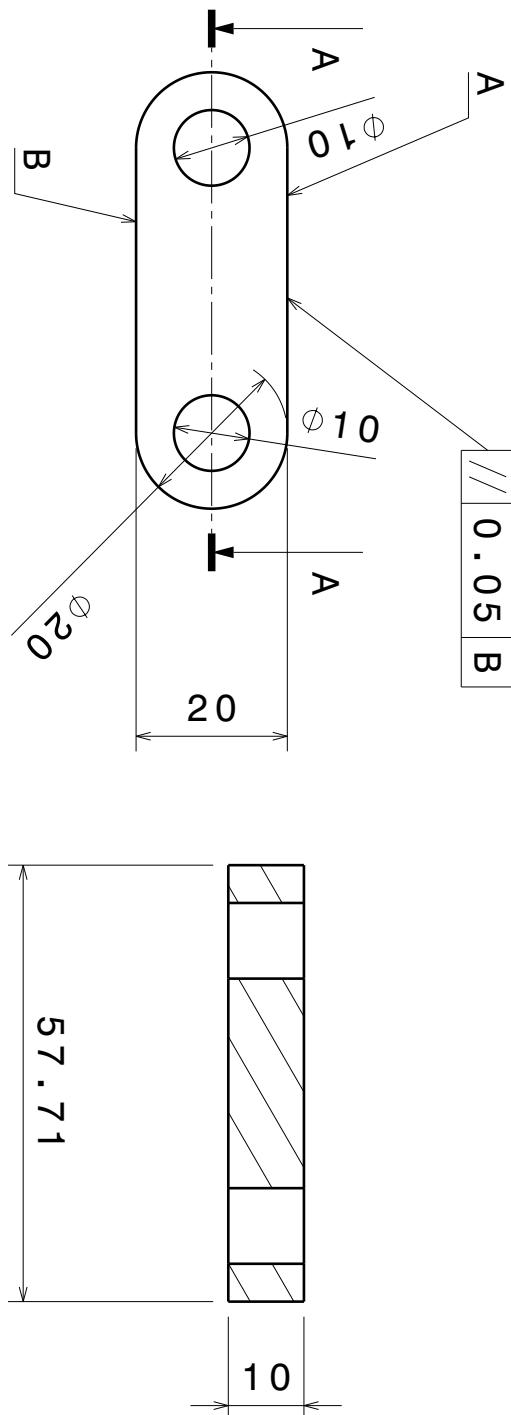
```
-7.218e08 s^7 - 5.699e11 s^6 - 6.617e13 s^5
+ 5.942e16 s^4 + 3.908e19 s^3
+ 9.385e21 s^2 + 1.394e24 s + 6.709e24
11: -----
s^10 + 1759 s^9 + 1.745e04 s^8 - 2.432e08 s^7
- 1.148e11 s^6 - 3.007e13 s^5
- 2.395e15 s^4 - 1.273e17 s^3
+ 7.608e18 s^2 + 7.753e19 s + 1.829e20

-7.218e08 s^8 - 5.699e11 s^7 - 6.617e13 s^6
+ 5.942e16 s^5 + 3.908e19 s^4
+ 9.385e21 s^3 + 1.394e24 s^2
+ 6.709e24 s
12: -----
s^10 + 1759 s^9 + 1.745e04 s^8 - 2.432e08 s^7
- 1.148e11 s^6 - 3.007e13 s^5
- 2.395e15 s^4 - 1.273e17 s^3
+ 7.608e18 s^2 + 7.753e19 s + 1.829e20

Continuous-time transfer function.
>>
```

FIGURE C.12

DESIGNED BY: <b>ADDALAL YASSINE</b>	DATE: <b>6/20/2020</b>
CHECKED BY: <b>Mr AKHIADE AZIZ</b>	DATE: <b>20/06/2020</b>
SIZE <b>A4</b>	WEIGHT (kg) <b>0.01</b>
SCALE <b>1:1</b>	DRAWING NUMBER <b>Bielle</b>
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.	
SHEET <b>1 / 1</b>	



D

1

2

3

4

D

A

C

B

2

3

4

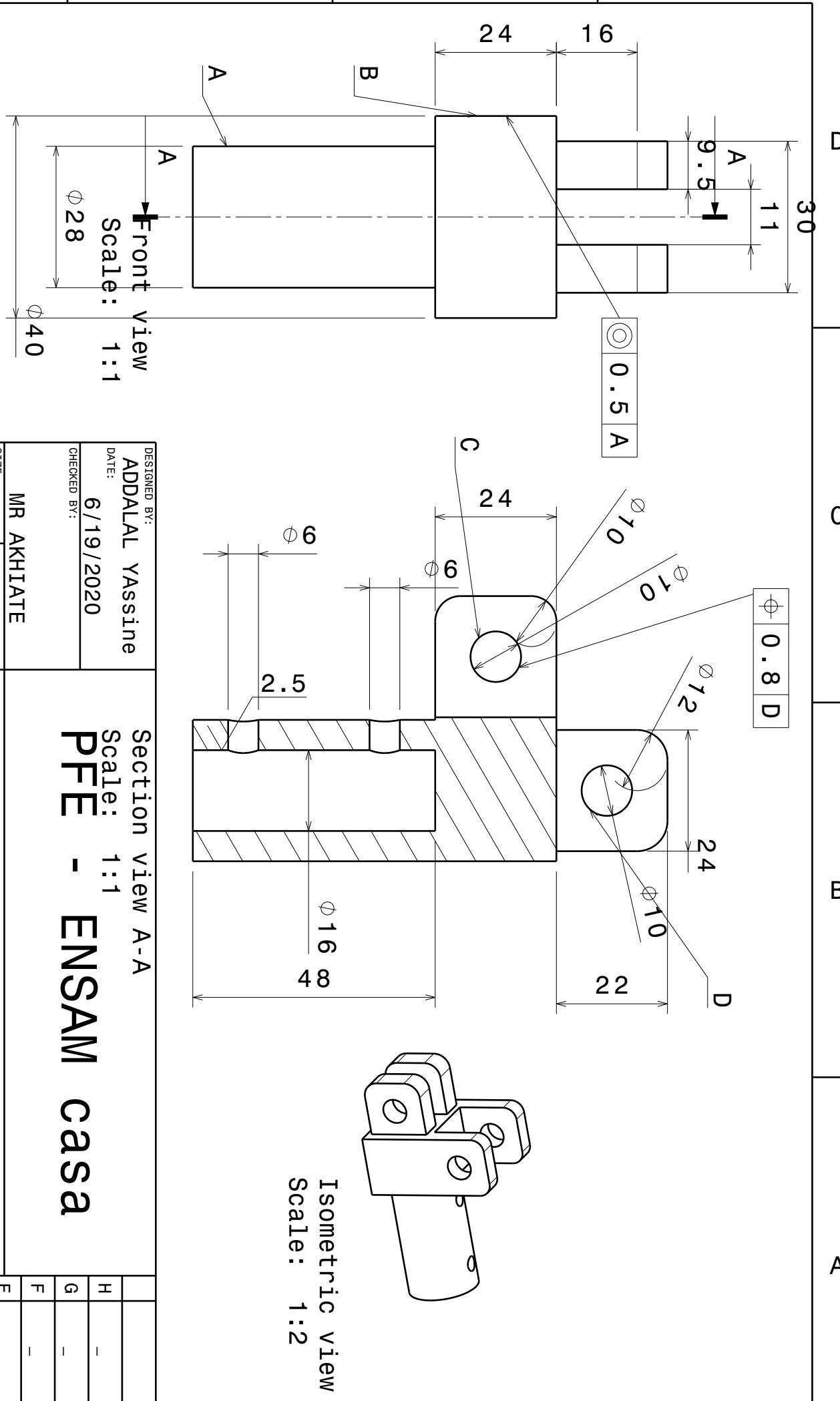
1

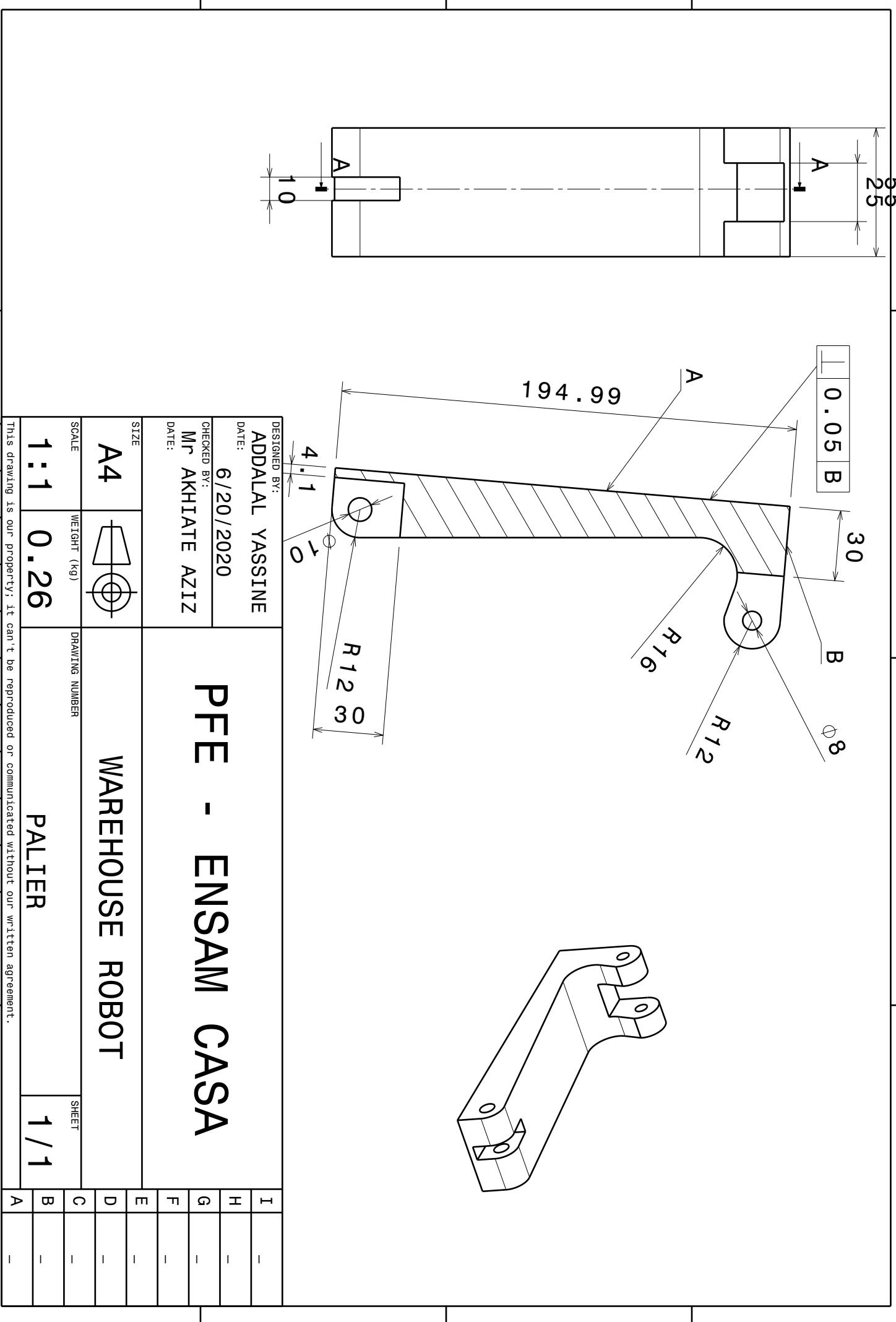
1

4

A

DESIGNED BY: <b>ADDALAL YASSINE</b>	Section view A-A Scale: 1:1
DATE: <b>6/19/2020</b>	Scale: 1:1
CHECKED BY:	<b>PFE - ENSAM casa</b>
SIZE <b>A4</b>	DRAWING NUMBER <b>Monchamt</b>
SCALE <b>1:1</b>	SHEET <b>1 / 1</b>
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.	





# Bibliographie

- [1] *A Review on Study of Analysis of Chassis.* 15/05/2020.
- [2] ANALYSIS OF ROTATORY INERTIA AND SHEAR DEFORMATION ON TRANSVERSE VIBRATION OF BEAMS. 9/05/2020. URL : [https://www.ufpi.br/arquivos\\_download/arquivos/Ana/Lamec/Artigos\\_publicados/2016/CONEM/ANALYSIS\\_OF\\_ROTATORY\\_INERTIA\\_AND\\_SHEAR\\_DEFORMATION\\_ON\\_TRANSVERSE\\_VIBRATION\\_OF\\_BEAMS20191119121524.pdf](https://www.ufpi.br/arquivos_download/arquivos/Ana/Lamec/Artigos_publicados/2016/CONEM/ANALYSIS_OF_ROTATORY_INERTIA_AND_SHEAR_DEFORMATION_ON_TRANSVERSE_VIBRATION_OF_BEAMS20191119121524.pdf).
- [3] *Applications of Finite Element Stress Analysis of Heavy Truck Chassis : Survey and Recent Development.* 15/05/2020. URL : <http://pubs.sciepub.com/jmdv/2/3/3/index.html>.
- [4] *Automotive design Chassis designe.* 3/04/2020.
- [5] *Caracteristiques mecaniques d'aluminium de la poutre UPE choisie.* 7/04/2020. URL : <http://www.almet-metal.com/informations-techniques/donnees-aluminium>.
- [6] *Design of a Formula Student race car chassis Jannis D.G. van Kerkhoven,* 3/04/2020.
- [7] DEVELOPPEMENT STRUCTURAL D'UNE REMORQUE ULTRALÉGÈRE EN ALUMINIUM. 9/05/2020.
- [8] *Guide du choix des roulettes.* 28/04/2020. URL : <https://www.tellurerota.com/fr/roues-industrielles-criteres-de-choix-pour-charges-legeres-moyennes-et-lourdes>.
- [9] *Le choix d'amortisseur.* 29/04/2020. URL : <http://www.dpaonthenet.net/article/152664/Taking-the-shock-out-of-product-handling-processes.aspx>.
- [10] *Méthode de calcul et Data Sheet des amortisseurs.* 29/04/2020. URL : <https://docs.rs-online.com/0c8e/0900766b8001baac.pdf>.
- [11] MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION ET D'OPTIMISATION D'UNE STRUCTUREEN ALUMINIUM CLIPSABLEAPPLIQUÉE À UN PLANCHER D'AUTO-BUS. 9/05/2020. URL : [https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/11322/Laverne\\_Clement\\_MScA\\_2017.pdf?sequence=3](https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/11322/Laverne_Clement_MScA_2017.pdf?sequence=3).
- [12] *Nouveau concept, d'une remorque ultralégère enaluminium : Étude statique et dynamique ,Parenteau Charles.* 9/05/2020.
- [13] *Rigidité du Caoutchouc.* 5/05/2020. URL : [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1678-58782012000200013](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-58782012000200013).
- [14] *Spécification Technique d'amortisseur.* 29/04/2020. URL : <https://www.prokeshop.fr/amortisseur-rocox-monarch-r-mid-reb-mid-comp-2016/112148.html>.
- [15] *Steps to Choosing the Right Motors for Your Robotic Project.* 3/04/2020. URL : <https://medium.com/husarion-blog/10-steps-to-choosing-the-right-motors-for-your-robotic-project-bf5c4b997407>.
- [16] STRESS ANALYSIS OF HEAVY DUTY TRUCK CHASSIS AS A PRELIMINARY DATA FOR ITS FATIGUE LIFE PREDICTION USING FEM. 15/05/2020.

- [17] *The Mechanical Design Process*. 20/02/2020. URL : <https://www.ceospeaking.com/wp-content/uploads/2017/09/The-Mechanical-Design-Process.pdf>.
- [18] *théorie des poutres - Euler-Bernoulli beam theory*. 9/05/2020. URL : [https://fr.qwe.wiki/wiki/Euler%5C%E2%5C%80%5C%93Bernoulli\\_beam\\_theory](https://fr.qwe.wiki/wiki/Euler%5C%E2%5C%80%5C%93Bernoulli_beam_theory).
- [19] *Tracking Control of Moving Sound Source Using Fuzzy-Gain Scheduling of PID Control*. 26/05/2020. URL : <https://www.mdpi.com/2079-9292/9/1/14/htm>.

**Université Hassan II Casablanca**  
**Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Casablanca**

Nom : ADDALAL  
Prénom : Yassine  
Filière : Génie Mécanique

Titre du rapport :

**« Conception et Réalisation d'un Warehouse Robot »**

Résumé :

*Le présent rapport vient conclure le stage de fin d'études effectué au sein de l'entreprise **NEXTRONIC**, pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Mécanique, délivré par l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Casablanca ENSAMC.*

*L'entreprise cherche constamment différentes façons de moderniser le transport des matérielles et de la matière première dans l'unité de production. Une des solutions envisagées est de concevoir un robot magasinier "**Warehouse Robot**". C'est une opportunité pour couronner ce que nous avons appris tout au long de notre formation, en plusieurs matières étudiées. Le document comporte en grosso modo deux filiales, la première consiste à aborder l'étude théorique : la modélisation, calculs. Et la deuxième partie est dédiée au prototypage et la fabrication de la machine. Sans oublier les autres parties : d'électronique et la programmation du robot et des systèmes relatifs qui sont chargés aux membres du groupe de travail.*

Mots clés :

*Unité de production – Warehouse robot – Modélisation – Prototypage – Programmation*