

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

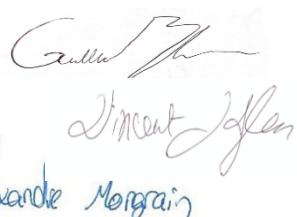
MEC592
PROJET DE CONCEPTION DE MACHINES

RAPPORT FINAL :
CONCEPTION D'UN SYSTÈME DE LOCOMOTION POUR CAPRA

GROUPE 01

ENSEIGNANT :
Wagnac, Éric

ÉTUDIANTS (ÉQUIPE 1C) :
Bourbeau, Guillaume, BOUG26119402,
Lafleur, Vincent, LAFV30049608,
Mongrain, Alexandre, MONA08059607,



VENDREDI, 2 AOÛT 2019

Sommaire

Dans le cadre du cours de projet de conception de machine, MEC592, les étudiants sont appelés à développer un système complet qui répond à la demande d'un client particulier. La conception du système doit comprendre des notions acquises dans le cours d'éléments de machine, MEC528. Ce rapport contient toutes les étapes de développement de produit conforme à l'industrie. Certaines corrections ont été apportées suite aux commentaires retenus sur le rapport préliminaire, en Annexe I. L'objectif final est de fournir un système complet comprenant tous les dessins de détail et d'assemblage pour le concevoir.

Le projet présenté est fait en collaboration avec le club Capra de l'école de technologie supérieure. L'objectif de ce club est de concevoir un robot de secours autonome. Le système de déplacement actuel du robot présente quelques lacunes. Le club nous a fait appel pour visiter des concepts de système de déplacement pour remplacer celui actuel. Les points importants à tenir en compte lors de la conception sont le coût de fabrication, la vitesse que le robot peut atteindre et la capacité à gravir des obstacles. De plus, le robot est opéré sur des terrains très accidentés, donc le système doit pouvoir résister à de grands chocs.

L'analyse du problème commence par un rendez-vous avec le chef du groupe mécanique de Capra. Ensuite, un barème est érigé à l'aide d'une maison de la qualité pour comparer les concepts potentiels. La recherche de solution s'est faite en faisant plusieurs remue-méninges. Après avoir sélectionné plusieurs concepts, un concept est choisi à l'aide d'une matrice de décision. Le reste du développement est concentré sur ce concept.

Pour concrétiser le design du concept du système de déplacement, le système est séparé en plusieurs modules. Chaque module est optimisé en comparant plusieurs configurations et ensuite en performant un design paramétrique pour certains composants du module. Le concept est raffiné par la suite en utilisant une analyse de défaillance, en performant une analyse de conception pour l'assemblage et pour la fabrication. Finalement, les dessins de détails et d'assemblage sont produits et fournis au club Capra.

Table des matières

1.1	Description du produit	2
1.2	Objectifs corporatifs.....	2
1.3	Définition du marché	2
1.4	Définition des clients.....	2
1.5	Besoin, attentes et contraintes.....	2
1.5.1	Besoins.....	3
1.5.2	Attentes	3
1.5.3	Contraintes	4
1.5.4	Attributs.....	4
1.6	Spécifications techniques.....	6
1.8	Maison de la qualité.....	7
1.9	Barème d'évaluation	9
2.1	Méthodologie.....	10
2.2	Présentation des concepts.....	10
2.3	Filtrage	11
2.4	Évaluation des performances.....	12
2.4.1	Concept 1 : Rover.....	12
2.4.2	Concept 4 : Bras chenillé	14
2.4.3	Concept 7 : Chariot élévateur.....	16
2.4.4	Concept 11 : Bras sur rail	18
2.4.5	Résumé des performances	20
2.5	Matrice de décision.....	20
2.6	Analyse et justification.....	21
3.1	Diagramme schématique	22
3.2	Module électrique.....	23
3.3	Module de levier	24
3.4	Module de déplacement.....	24
3.5	Module de support	25
3.6	Terrain et opérateur.....	25
4.1	Transmission du levier	26
4.1.1	Fonctions	26
4.1.2	Configurations alternatives	27
4.1.3	Choix de la configuration	31
4.2	Transmission du mouvement d'avance	31
4.2.1	Fonctions	31
4.2.2	Configurations alternatives	32
4.2.3	Choix de la configuration	34
4.3	Module de support	35
4.3.1	Fonctions	35
4.3.2	Configurations alternatives	35
4.3.3	Choix de la configuration	39

5.1	Arbre principal	40
5.1.1	Fonctions et caractéristiques.....	40
5.1.2	Méthodologie	41
5.1.3	Résolution	42
5.1.4	Choix de la solution.....	43
5.2	Plaques de levier	44
5.2.1	Fonctions et caractéristiques.....	44
5.2.2	Méthodologie	46
5.2.3	Résolution	46
5.2.4	Choix de la solution.....	50
5.3	Chaines	50
5.3.1	Fonctions et caractéristiques.....	50
5.3.2	Méthodologie	51
5.3.3	Résolution	52
5.3.4	Choix de la solution.....	53
6.1	Liens, articulations et commandes du mécanisme	54
6.2	Trajectoires	56
6.3	Espaces, limites et tolérances	57
7.1	Décomposition fonctionnelle.....	58
7.2	Modes de défaillance	58
7.3	Tableau d'AMDEC	58
7.4	Actions correctives.....	61
7.5	Tableau d'AMDEC avec actions correctives	61
8.1	Module de support	63
8.2	Brides de fixation	66
9.1	Remplacement du bloc de support par une plaque de support.....	69
9.2	Standardisation de l'épaisseur des plaques.....	70
9.3	Impression 3D des roues de la chenille.....	70
D.1.	Demi vis sans fin.....	82
D.2.	Vis sans fin avec poulie et ressort.....	83
D.3.	Vérin électrique.....	84
E.1.	Clavettes.....	86
E.2.	Worm Gears	87
E.3.	Roulements	88
E.4.	Boulons de l'assemblage de la vis sans fin.....	89

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Regroupement des attributs	6
Tableau 1.2 Liste des spécifications techniques	6
Tableau 1.3 Barème d'évaluation	9
Tableau 2.1 Matrice de filtrage.....	11
Tableau 2.2 Spécifications techniques du rover	13
Tableau 2.3 Spécifications techniques des bras chenillés	15
Tableau 2.4 Spécifications techniques du chariot élévateur.....	17
Tableau 2.5 Spécifications techniques des bras sur rails.....	19
Tableau 2.6 résumé des spécifications techniques des concepts choisis	20
Tableau 2.7 Matrice de décision.....	20
Tableau 4.1 Fonctions de la transmission du levier.....	26
Tableau 4.2 Évaluation des configurations pour la transmission du levier.....	31
Tableau 4.3 Fonctions de la transmission d'avance	32
Tableau 4.4 Évaluation des configurations pour la transmission d'avance	34
Tableau 4.5 Fonctions du module de support	35
Tableau 4.6 Évaluation des configurations du module de support.....	39
Tableau 5.1 Paramètres de l'arbre principal	41
Tableau 5.2 Variables de design de l'arbre principal.....	41
Tableau 5.3 Propriétés mécanique de matériaux pour les arbres de transmission	43
Tableau 5.4 Résultats des différents arbres proposés	43
Tableau 5.5 Paramètres des plaques du levier.....	44
Tableau 5.6 Variables de design des plaques du levier	44
Tableau 5.7 Cas de chargement pour l'analyse du levier	46
Tableau 5.8 Contraintes résultantes pour les deux configurations.....	48
Tableau 5.9 Facteurs de sécurité aux zones critiques pour les deux configurations	49
Tableau 5.10 Résultats des différentes plaques proposés	50
Tableau 5.11 Paramètres de la transmission par chaîne.....	51

Tableau 5.12 Variables de design de la transmission par chaîne	51
Tableau 5.13 Résultats des différentes chaines proposés.....	53
Tableau 6.1 Articulations de la cinématique de l'avance	54
Tableau 6.2 Articulations de la cinématique du levier	56
Tableau 7.1 Tableau d'AMDEC.....	59
Tableau 7.2 Tableau d'AMDEC Révisé avec des actions correctives	61
Tableau 8.1 Évaluation de Poli pour un assemblage boulonné.....	64
Tableau 8.2 Évaluation de Poli pour un assemblage avec goujons	65
Tableau 8.3 Évaluation de Poli pour une fixation avec boulons.....	67
Tableau 8.4 Évaluation de Poli pour une fixation avec goujons et écrous	68
Tableau 8.5 Évaluation de Poli pour une fixation avec goujons et écrous 6 pans creux..	68
Tableau F.1 Résultat de l'analyse par élément fini de l'arbre principal	92
Tableau G.1 Facteurs sécurité aux zones identifiées pour les deux configurations.....	94
Tableau J.1 Nomenclature complète du projet	100

Liste des illustrations

Figure 1.1 Maison de la qualité.....	7
Figure 1.2 Pareto des importances relatives	8
Figure 2.1 Robot actuel de CAPRA.....	10
Figure 2.2 Croquis du Rover.....	12
Figure 2.3 Croquis du bras chenillé.....	14
Figure 2.4 Croquis du chariot élévateur	16
Figure 2.5 Croquis du bras sur rail	18
Figure 3.1 Diagramme schématique du Bras chenillé	22
Figure 3.2 Croquis de la géométrie approximative	23
Figure 4.1 Vues de la demi-vis sans fin	27
Figure 4.2 Identification des éléments de la demi-vis sans fin	28
Figure 4.3 Croquis de la vis sans fin avec poulie et ressort	29
Figure 4.4 Vue du vérin électrique.....	30
Figure 4.5 Vues de la transmission par chaines	33
Figure 4.6 Vues de la transmission par engrenages à 90°	33
Figure 4.7 Vues de la transmission par engrenages à 90° internes.....	34
Figure 4.8 Vues du support en tôles boulonnées du bras chenillé.....	36
Figure 4.9 Vues du support en tôles boulonnées du châssis central	36
Figure 4.10 Vues du support en tôles soudées.....	37
Figure 4.11 Vues du support usiné en bloc.....	38
Figure 4.12 Vues du support usiné en bloc du châssis central	38
Figure 5.1 DCL de l'arbre principal.....	40
Figure 5.2 Diagramme de l'effort tranchant total au pire cas dans l'arbre principal.....	42
Figure 5.3 Diagramme du moment fléchissant total au pire cas dans l'arbre principal ..	42
Figure 5.4 Géométrie initiale des plaques	46
Figure 5.5 Supports possible pour le levier	46
Figure 5.6 Résultats des différentes optimisations topologiques	47

Figure 5.7 Plaque optimisée	47
Figure 5.8 Répartition des contraintes sur les plaques	48
Figure 5.9 Cycle des contraintes sur les plaques de levier	49
Figure 6.1 Cinématique de l'avance.....	54
Figure 6.2 Calculs de la cinématique de l'avance	55
Figure 6.3 Cinématique du levier.....	55
Figure 6.4 Calculs de la cinématique de l'avance	56
Figure 6.5 Positions limites du levier	57
Figure 6.6 Positions limites du levier (Vue rapprochée).....	57
Figure 8.1 Assemblage avec boulons des supports	63
Figure 8.2 Assemblage avec des goujons filetés des supports	64
Figure 8.3 Fixation au châssis avec des boulons.....	66
Figure 8.4 Fixation au châssis avec des écrous sur goujons	67
Figure 8.5 Fixation au châssis avec des écrous Allen.....	67
Figure 9.1 Plaque adaptatrice avant et après les améliorations	69
Figure 9.2 Roue composite plaque-impression 3D.....	70
Figure C.1 Croquis préliminaire du concept #1.....	78
Figure C.2 Croquis préliminaire du concept #2.....	78
Figure C.3 Croquis préliminaire du concept #3.....	78
Figure C.4 Croquis préliminaire du concept #4.....	78
Figure C.5 Croquis préliminaire du concept #5.....	79
Figure C.6 Croquis préliminaire du concept #6.....	79
Figure C.7 Croquis préliminaire du concept #7.....	79
Figure C.8 Croquis préliminaire du concept #8.....	79
Figure C.9 Croquis préliminaire du concept #9.....	79
Figure C.10 Croquis préliminaire du concept #10	80
Figure C.11 Croquis préliminaire du concept #11	80
Figure C.12 Croquis préliminaire du concept #12	80
Figure C.13 Croquis préliminaire du concept #13	80

Figure C.14 Croquis préliminaire du concept #14	81
Figure C.15 Croquis préliminaire du concept #15	81
Figure D.1 Étendue du mouvement de la demi-vis sans fin	82
Figure D.2 Étendue du mouvement du vérin.....	85
Figure F.1 Modèle convergé ANSYS de l'arbre principal en chargement sur roue	91
Figure F.2 Contrainte maximale et erreur relative en fonction du maillage	91
Figure F.3 Modèle convergé ANSYS de l'arbre principal en chargement sur chenilles....	92
Figure G.1 Diagramme de Goodman modifié avec contraintes résultantes	94

Introduction

Tout au long de sa carrière, un ingénieur devra faire face à une multitude de projets les plus diversifiés les uns que les autres. Chacun de ces projets doivent alors être bien dirigée et exécutés afin qu'il soit remis à terme avec succès.

Durant le cours de MEC592, en collaboration avec le club étudiant de l'ÉTS CAPRA, notre équipe avait comme mandat de concevoir un système de propulsion allant se fixer sur le robot du club. Ce système de propulsion devra alors permettre au club étudiant d'accumuler plus de points lors de compétition et donc de leur permettre de récolter plus de points lors d'épreuves.

Dans ce rapport, il sera d'abord question du cahier des charges de ce projet. Celui-ci fera d'abord une description du produit puis par la suite il y aura une présentation des objectifs corporatifs, des marchés primaire et secondaire, des clients interne et externe. Il y aura aussi une présentation de la maison de la qualité accompagné des attributs et des contraintes. Par la suite, un barème d'évaluation sera présenté ainsi qu'une série d'étapes de filtrage afin de pouvoir déterminer le concept gagnant.

Dans la deuxième partie du rapport, il sera question des détails du processus de concrétisation du design. En d'autres termes, l'architecture du produit sera présentée afin d'identifier les interactions et les modules de ce système de propulsion. De plus, une analyse cinématique sera présenté afin d'illustrer chacun des mouvements devant être réalisé par le produit. Par la suite, une analyse AMDEC ainsi qu'une analyse de conception pour assemblage et fabrication seront effectué sur le produit final. Finalement, une justification du choix des matériaux ainsi que des pièces standards sera aussi présenté.

1 Analyse du problème

Dans le cadre du cours de MEC592, en partenariat avec le club étudiant CAPRA, nous avons comme mandat de concevoir un système de motorisation allant se fixer sur le patron de trous préétabli du robot afin de lui permettre de se déplacer sur des terrains accidentés. Ce système répondra aux besoins et contraintes établies par le club étudiant qui souhaite participer à la compétition RoboCup Rescue 2020 se déroulant à Bordeaux en France. Au sein de ce premier rapport, plusieurs points seront analysés, en commençant par une description du produit, suivi des objectifs corporatifs, des marchés primaire et secondaire, des clients internes et externes, des attributs et contraintes, de la maison de la qualité et de son analyse puis du barème d'évaluation utilisé.

1.1 Description du produit

CAPRA demande de concevoir 2 modules allant se fixer de chaque côté du robot sur le patron de trous préétabli afin de lui permettre de se déplacer. Ce système permettra alors de remplacer le système de chenille actuel afin de lui permettre de gravir différents obstacles sans difficulté tel que de monter des marches et de passer par-dessus des objets de dimensions préétablies tels que des poutres de bois de 4 pouces par 4 pouces. Le système devra alors être fiable afin d'éviter tout bris lors de son utilisation.

1.2 Objectifs corporatifs

L'équipe 1C agit comme consultante pour offrir une expertise d'étudiants en génie mécanique. Le club Capra éprouve certaines difficultés avec leur système déplacement, c'est pourquoi l'équipe 1C a été approchée afin de les aider sur ce problème. Le mandat est d'explorer de nouvelles idées et de se concentrer à élaborer un concept complet. L'objectif de faire en sorte que CAPRA soit en mesure d'être compétitif avec les autres équipes de la RoboCup Rescue.

1.3 Définition du marché

Les modules sont destinés au club étudiant CAPRA afin d'améliorer ses déplacements sur des terrains accidentés comme marché primaire. Cependant, le module pourrait aussi s'adresser à tous les concepteurs et fabricants de robots autonomes voulant équiper leur robot d'un système de motorisation indépendant comme marché secondaire. Le système pourrait autant servir pour des robots de plaisir que pour des robots utilisés par des services d'intervention et par des compagnies aérospatiales.

1.4 Définition des clients

Le Club CAPRA est à la fois le client interne et le client externe, puisqu'il est à la fois le mandataire du projet et l'utilisateur de produit final.

1.5 Besoin, attentes et contraintes

Ci-dessous, les besoins représentant les exigences du client par rapport au produit, les attentes représentant les besoins pris pour acquis et les contraintes représentant les limites aux solutions sont compilées.

1.5.1 Besoins

Le robot du club étudiant CAPRA devra pouvoir réussir à se déplacer le long d'un parcours rempli d'obstacles sans complications. La liste suivante représente chacun des besoins énumérés par certains membres du club étudiant afin de pouvoir combler les lacunes de leur système de motorisation présentement installer sur le robot.

- Le module de propulsion sera durable afin de pouvoir résister à plusieurs épreuves d'endurance sans avoir besoin de réparation immédiate;
- Le coût du système sera minimal. Il ne doit pas excéder 6000\$ CAD;
- La vitesse du robot sera maximisée autant sur une surface horizontale que sur des obstacles;
- Le système consommera le moins d'énergie possible;
- Le système aura une rigidité raisonnable;
- Le volume du système sera le plus petit possible.

1.5.2 Attentes

Afin de pouvoir améliorer ses compétences lors de compétition le robot doit aussi respecter chacun des points suivants afin de pouvoir lui permettre d'être plus compétitif, même si le client ne l'a pas clairement indiqué.

- Le robot ne basculera pas;
- Le module sera le plus esthétique possible;
- Le module sera léger afin de faciliter son transport.

1.5.3 Contraintes

Pour bien répondre aux besoins de CAPRA, le système de propulsion doit aussi répondre aux contraintes suivantes :

- Le module de propulsion doit être en mesure de déplacer le châssis du robot ayant un poids de 40 lbs sur dans des marches et sur les surfaces plates, horizontales et inclinées;
- Les dimensions du module de propulsion doivent être au maximum de 20 pouces de longueur par 20 pouces de hauteur et 10 pouces de largeur, lorsque rétracté;
- Le module doit être résistant au sable;
- Le robot doit être en mesure de passer par-dessus des obstacles carrés de 3.5 pouces de hauteur et de gravir des escaliers sans basculer;
- Le module de propulsion doit seulement se fixer sur le patron de trous préétabli du robot;
- Le module de propulsion doit avoir les mêmes capacités de déplacement vers l'avant et vers l'arrière;
- Le module doit fonctionner sans apport d'énergie externe autre que les batteries du robot;
- Le module ne doit pas restreindre les mouvements du bras du robot. Celui-ci doit être en mesure d'atteindre le sol lorsque le robot est immobilisé.

1.5.4 Attributs

Concernant les attributs du système de propulsion conçu par notre équipe, en fonction des besoins, attentes et contraintes émises par le client, nous avons pu établir la liste suivante qui permet d'englober chacun des enjeux lors de la conception du produit :

Le produit devra alors :

- Être rapide ;
- Être économique en énergie ;
- Être compact ;
- Être fiable ;
- Être stable ;
- Être abordable ;
- Être attrayant ;
- Être durable ;
- Être facile à transporter.

Ces attributs se regroupent en quatre catégories distinctes : c'est-à-dire les performances, la durabilité, l'économie et l'esthétisme.

Groupe 1 : Performances

- Être rapide
- Être économique en énergie
- Être compact
- Être facile à transporter

Groupe 2 : Durabilité

- Être durable
- Être stable

Groupe 3 : Économie

- Être abordable

Groupe 4 : Esthétisme

- Être attrayant

Une cote qui varie entre 1 et 5 est attribuée à chacun des attributs afin de déterminer leur importance l'un par rapport à l'autre selon les exigences établies par le client. Le tableau suivant illustre alors chacun des attributs ainsi que leur cote respective.

Tableau 1.1 Regroupement des attributs

Catégorie	Attribut	Cote
Performances	Être rapide	5
	Être économique en énergie	3
	Être compact	3
	Être facile à transporter	1
Durabilité	Être durable	4
	Être stable	4
Économie	Être abordable	1
Esthétisme	Être attrayant	1

1.6 Spécifications techniques

À l'aide des attributs mentionnés précédemment, il est possible d'établir chacune des spécifications techniques associées à chacun des attributs. Le tableau ci-dessous regroupe chacune des spécifications techniques reliées à chaque attribut.

Tableau 1.2 Liste des spécifications techniques

Attribut	Caractéristique technique	Objectif	Valeur cible	Unité de mesure
Être rapide	Vitesse	Maximiser	1.3	Mètres/sec
Être économique en énergie	Consommation électrique	Minimiser	800	Watts
Être compact	Volume	Minimiser	50	Litres
Être facile à transporter	Masse	Minimiser	15	Livres
Être durable	Facteur de sécurité	Maximiser	3	N/A
Être stable	Angle de renversement	Maximiser	45	Degrés
Être abordable	Coût unitaire	Minimiser	3000	\$ CAD
Être attrayant	Esthétique	Maximiser	80	%

Les explications de chacune des spécifications techniques se retrouvent à l'Annexe A.

1.8 Maison de la qualité

La maison de la qualité est un outil qui lie les attributs et les spécifications techniques afin de faire ressortir les points les plus importants pour un projet donné. Chaque cote, où 9 est la plus haute, représente le niveau d'affinité, positif, ou d'opposition, négatif, qu'un attribut a par rapport à une spécification technique. Ci-dessous, la maison de la qualité permet d'illustrer les relations entre les différents attributs et caractéristiques techniques.

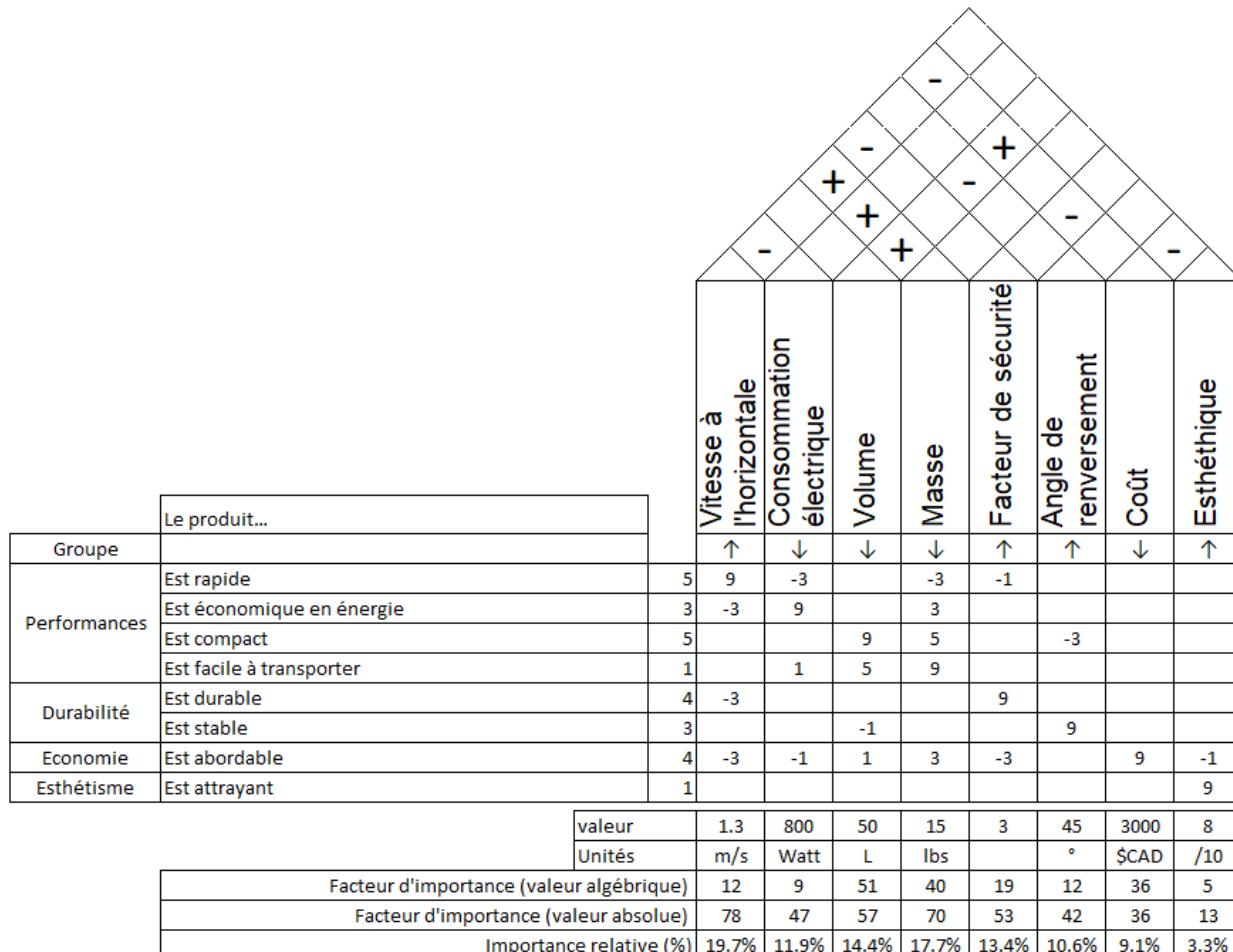


Figure 1.1 Maison de la qualité

La maison de la qualité nous démontre donc que la vitesse à l'horizontale, le volume et la masse représentent les aspects les plus importants à tenir compte pour l'élaboration de concepts. Bien entendu, les synergies les plus fortes sont celles où les spécifications techniques émanent directement des attributs. De plus, certaines spécifications techniques, telles que la masse et la consommation jouent un gros rôle pour l'attribut de la vitesse. En effet, la vitesse est souvent associée à la légèreté d'un véhicule et à la puissance de son moteur. Plus le moteur est puissant, plus il est énergivore. L'Annexe B présente les explications complètes des cotes associées à chacun attributs ainsi que des synergies et compromis décelés.

Afin de concentrer nos efforts sur les aspects qui ont le plus d'influence pour ce projet, la méthode 80/20 montre les spécifications techniques en priorité. Elle montre le cumul des spécifications techniques en termes d'importance et aide à sélectionner celles qui comblent à 80% les aspects du projet. Comme la figure ci-dessous l'illustre, le facteur de sécurité, l'angle de renversement, et l'esthétisme du système sont négligeables par rapport aux autres spécifications techniques. Ces aspects n'ont donc pas besoin d'être envisagés pour le processus d'idéation et de sélection préliminaire d'idées.

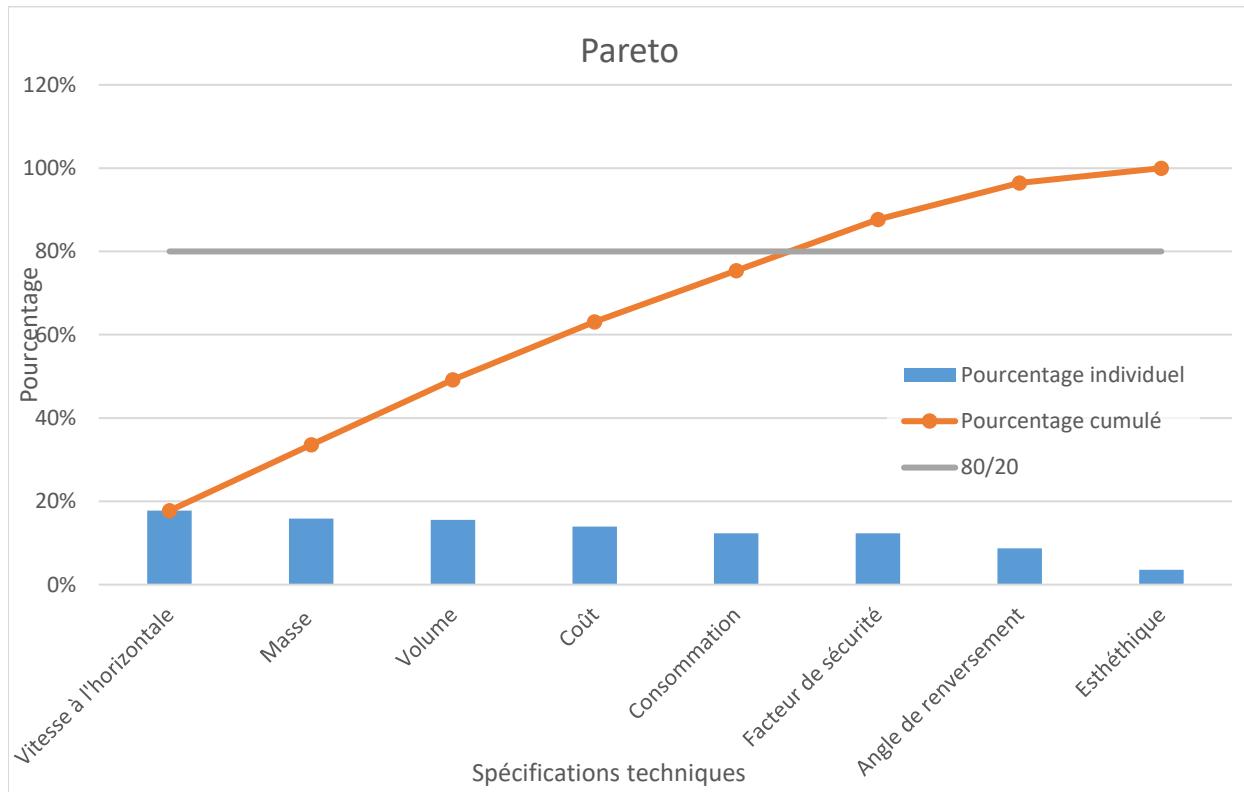


Figure 1.2 Pareto des importances relatives

1.9 Barème d'évaluation

Le barème ci-dessous a été élaboré afin de classifier chacune des idées de concept ressorties lors du remue-ménage. Celui-ci montre les objectifs et les cibles à atteindre pour chacune des spécifications techniques. Des cotes, de 0 à 3, sont attribuées à des intervalles mesurables sur des concepts afin de cibler le concept le plus prometteur.

Tableau 1.3 Barème d'évaluation

Caractéristiques	Objectif	Cible	Cote	Performance
Vitesse à l'horizontale	↑	1.3 m/s	3 2 1 0	$v \geq 1.3$ $1.3 > v \geq 1$ $1 > v \geq 0.7$ $0.7 > v$
Consommation électrique	↓	800 W	3 2 1 0	$P \leq 800$ $800 < P \leq 950$ $950 < P \leq 1100$ $1100 < P$
Volume	↓	50 L	3 2 1 0	$V \leq 50$ $50 < V \leq 60$ $60 < V \leq 70$ $70 < V$
Masse	↓	15 lbs	3 2 1 0	$m \leq 15$ $15 < m \leq 20$ $20 < m \leq 25$ $25 < m$
Facteur de sécurité	↑	3	3 2 1 0	$f \geq 3$ $3 > f \geq 2.5$ $2.5 > f \geq 2$ $2 > f$
Angle de renversement	↑	45°	3 2 1 0	$\Theta \geq 45$ $45 > \Theta \geq 40$ $40 > \Theta \geq 35$ $35 > \Theta$
Coût	↓	3000 \$	3 2 1 0	$C \leq 3000$ $3000 < C \leq 4500$ $4500 < C \leq 6000$ $6000 < C$
Esthétique	↑	8/10	3 2 1 0	$E \geq 8$ $8 > E \geq 6$ $6 > E \geq 4$ $4 > E$

2 Recherche de solutions

2.1 Méthodologie

Avant de commencer le processus d'idéation, nous avons fait une analyse défectuologique du système actuel du robot. Les principales lacunes du mécanisme actuel sont sa capacité à gravir des obstacles et la vitesse que le robot est capable d'atteindre. Le système actuel est composé principalement de chenilles tendues de chaque côté et d'une plaque de protection sous le robot. De plus, nous avons rencontré le chef mécanique du club Capra afin qu'il confirme ses attentes et objectifs du projet par rapport au barème produit.

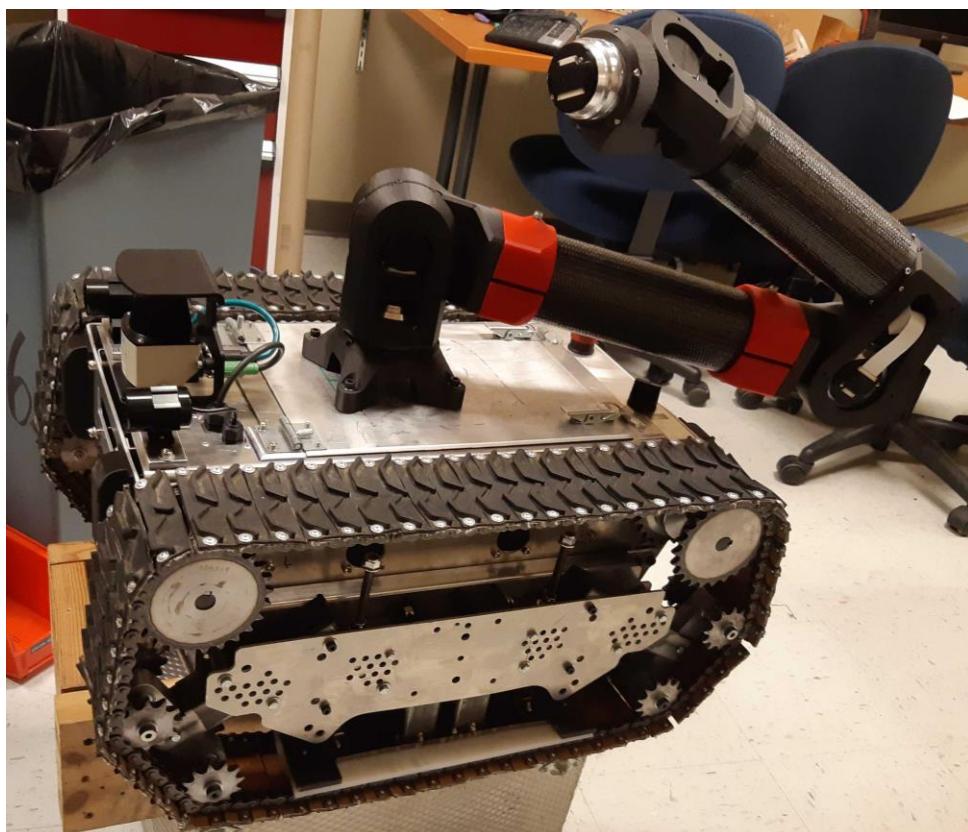


Figure 2.1 Robot actuel de CAPRA

Nous avons procédé à un remue-méninge. Nous avons sélectionné un endroit propice à la création et aucune contrainte au niveau des idées a été imposé. Nous avons donc imaginé dix concepts initiaux. Ensuite, à l'aide d'une analyse morphologique cinq concepts supplémentaires sont venus compléter notre liste. Par la suite, nous avons fait des recherches sur des systèmes existants afin de confronter les concepts ressortis.

2.2 Présentation des concepts

Les dessins des 15 concepts originaux sont présentés à l'annexe C.

2.3 Filtrage

Nous avons mis les quinze concepts dans une matrice de filtrage pour sélectionner les 4 meilleurs. Ci-dessous les différents concepts sont tous comparés au concept #1 afin de les classer et d'en garder seulement quatre pour l'évaluation des performances.

Tableau 2.1 Matrice de filtrage

Critère	Importance relative	Concepts														
		<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>	<u>7</u>	<u>8</u>	<u>9</u>	<u>10</u>	<u>11</u>	<u>12</u>	<u>13</u>	<u>14</u>	<u>15</u>
Vitesse à l'horizontale	19.7 %	0	-1	-1	0	-1	-1	0	0	-1	-1	0	-1	-1	-1	0
Consommation électrique	11.9 %	0	-1	-1	0	-1	0	0	-1	-1	-1	0	-1	-1	-1	-1
Volume	14.4 %	0	1	0	1	1	1	-1	0	0	0	0	0	1	1	1
Masse	17.7 %	0	-1	-1	0	0	-1	0	-1	1	-1	-1	0	-1	-1	-1
Facteur de sécurité	13.4 %	0	0	-1	0	0	0	0	-1	-1	1	0	-1	-1	-1	-1
Angle de renversement	10.6 %	0	0	1	1	-1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1
Coût	9.1 %	0	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	1	-1	0	1	-1	-1	-1
Esthétique	3.3 %	0	0	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	0	-1	0	0	0
Pointage	0.0	-44.0	-64.5	19.2	-33.6	-18.2	-7.1	-55.4	-21.5	-41.7	-7.1	-39.2	-46.8	-46.8	-27.1	
Rang	2	11	14	1	8	5	4	13	6	10	3	9	12	12	7	

Les quatre concepts gagnants selon la matrice sont surlignés en vert.

2.4 Évaluation des performances

Ci-dessous, les concepts ayant passé l'épreuve du filtrage sont présentés en plus grand détail afin de faire une évaluation de leurs performances. Pour chacun de ces concepts, nous avons produit un croquis détaillé du système et une brève description du fonctionnement de celui-ci tout en expliquant les avantages et désavantages du système

2.4.1 Concept 1 : Rover

Le système de propulsion #1 est composé de roues fixées sur des bras rotatifs attachés à une plateforme fixée au corps du robot, en plus de roues qui sont fixées sous le robot. Les roues se trouvant sur les bras rotatifs permettront au robot de pouvoir gravir des marches plus facilement. Rendu devant l'obstacle, le robot pourra s'assoir sur les roues en dessous du corps, lever le bras rotatif au-dessus de la première marche et ainsi s'appuyer sur celle-ci afin de pouvoir monter le corps du robot.

Avantages :

- Vitesse élevée sur terrain plat
- Rendement très élevé

Inconvénients :

- Incertitudes quant à sa capacité à franchir les obstacles

Les performances de ce concept ont été évaluées comme suit :

Vitesse à l'horizontale :

Pour ce concept, la vitesse maximale sur une surface plane a été évaluée à 2m/s. Cette vitesse est supérieure à la cible qui était fixée à 1.3m/s. Le *Rover* surpassé alors le concept de base étant donné que celui se déplace à l'aide de chenille dont le rendement est beaucoup moins efficace.

Consommation électrique :

Pour la consommation électrique de ce concept, celle-ci a été évaluée à 700W comparativement à 800W pour le concept de base. Cette consommation moindre s'explique par l'utilisation de roues qui, telle que mentionnée plus haut, offre un meilleur rendement qu'un système de chenilles.

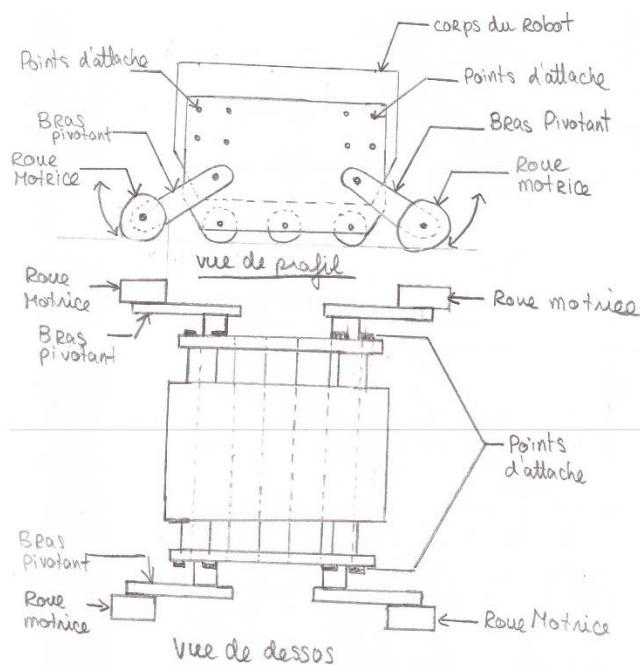


Figure 2.2 Croquis du Rover

Volume :

Dû au bras rotatif monté aux quatre coins du robot, son volume est alors évalué légèrement supérieur au concept initial, c'est-à-dire 60 litres. Ce léger supplément est expliqué par la largeur du robot qui est supérieure afin de pouvoir laisser de l'espace afin de loger le système mécanique derrière les bras rotatifs.

Masse :

La masse de ce concept est évaluée à 10lbs, ce qui est 5lbs inférieur à la cible. Même si son volume est plus gros, beaucoup d'espace est perdu dû à la localisation du mécanisme. De plus, le système possède peu de composantes par rapport à un système de chenille.

Facteur de sécurité :

À cause du volume disponible et de la simplicité du design, le facteur de sécurité a été évalué à 3.

Angle de renversement :

Pour ce qui est de son angle de renversement, celui-ci se trouve à être inférieur à la cible, c'est-à-dire de 30 degrés au lieu de 45 degrés. Ceci est causé par le système de bras rotatifs qui se trouve à être trop court afin de pouvoir garder une stabilité entre deux marches ce qui risque de le faire chavirer facilement.

Coût :

Concernant le coût, celui-ci est 1000\$ au-dessus de la cible. Cette différence s'explique par l'utilisation de plusieurs moteurs électriques afin de faire tourner chacune des roues ainsi que chacun des bras rotatifs.

Esthétique :

Le fait que ce concept est plus large et laisse à découvert tout le mécanisme entre le robot et le système de propulsion, son esthétisme est très faible, c'est-à-dire 30%.

En résumé, les performances du concept sont dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2.2 Spécifications techniques du rover

	Vitesse à l'horizontale (m/s)	Consommation électrique (W)	Volume (L)	Masse (lbs)	Facteur de sécurité	Angle de renversement (degré)	Coût (\$ CAD)	Esthétique (/10)
Cible 1.3 m/s (Objectif)	1.3 m/s (↑)	800 W (↓)	50 L (↓)	15 lbs (↓)	3 (↑)	45 degrés (↑)	3000 \$CAD (↓)	8/10 (↑)
Évaluation	2 m/s	700 W	60 L	10lbs	3	30 degrés	4000 \$CAD	3/10

2.4.2 Concept 4 : Bras chenillé

Le système de propulsion appelé bras chenillé est un concept innovateur permettant de profiter des avantages que lui procurent des chenilles sur des terrains accidentés en plus de pouvoir bénéficier de la vitesse de déplacement élevée des roues. Sur des surfaces planes, le robot pourra alors se déplacer uniquement avec les roues afin de pouvoir maximiser sa vitesse. Lorsqu'il devra passer certains obstacles, tel que de gravir des marches, le robot pourra alors utiliser le système de chenille qui pivote sur le même axe que les roues afin de bénéficier d'un empattement plus long et ainsi pouvoir monter des marches sans éviter de basculer. En bref, voici les avantages et inconvénients du système :

Avantages :

- Vitesse élevée sur terrain plat
- Vitesse élevée à franchir des obstacles
- Petit volume lorsque rétracté
- Grande stabilité à l'extension des chenilles

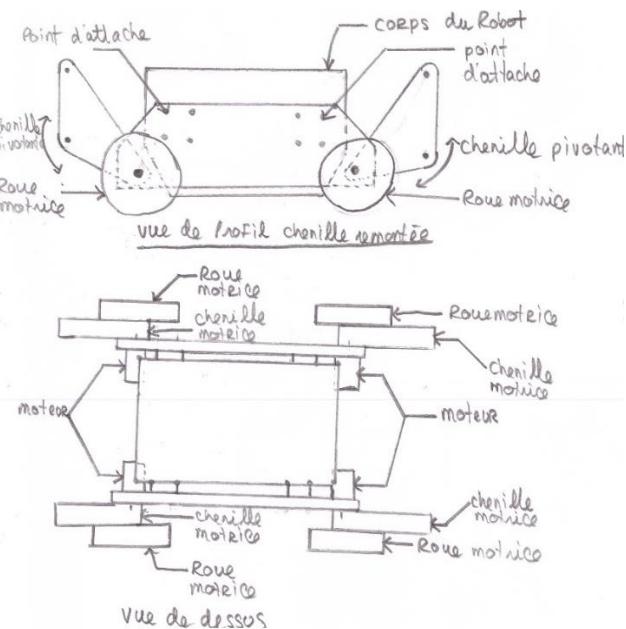


Figure 2.3 Croquis du bras chenillé

Inconvénients :

- Coût élevé
- Poids élevé
- Comporte plusieurs systèmes

Les performances de ce concept ont été évaluées comme suit :

Vitesse à l'horizontale :

La vitesse à l'horizontale de ce concept est évaluée à 1.2 m/s, ce qui est légèrement en dessous de la cible. Même s'il est propulsé par un système de roue sur les surfaces horizontales, le système de chenille présent sur le système rajoute du poids et nécessite une transmission spéciale et donc le limite sur sa vitesse maximale.

Consommation électrique :

Ce concept consomme aussi légèrement plus que la cible, soit 1000W au lieu de 700W. Cette consommation est due à l'utilisation de moteur capable de faire tourner chacune des roues en plus du système permettant d'actionner des chenilles lors de montées.

Volume :

Lorsque replié, le concept actuel possède un volume de 50 litres. Ce volume est égal à la cible était donné que les dimensions de ce système de propulsion est similaire au concept actuel.

Massé :

Avec un système de chenille et de roue intégré, le prototype possède alors une masse de 20 lbs, soit 5 lbs au-dessus de la cible.

Facteur de sécurité :

Dû aux nombreuses composantes présentes dans ce système de propulsion, le facteur de sécurité est légèrement réduit sous la cible, c'est-à-dire de 2.8 au lieu de 3.

Angle de renversement :

Grâce à l'utilisation des chenilles, ce système permet alors d'avoir un empattement égal au système actuel, et du même coup avoir un angle de renversement égal à la cible qui est de 45 degrés.

Coût :

Dû aux nombreuses composantes dans le système de chenille et de roue, le coût de ce concept est évalué à 5500\$, ce qui dépasse la cible qui était établie à 3000\$.

Esthétique :

Grâce au système qui est compact et bien conçu, son esthétisme est alors évalué à 80%, ce qui est égal à la cible.

En résumé, les performances du concept sont dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2.3 Spécifications techniques des bras chenillés

	Vitesse à l'horizontale (m/s)	Consommation électrique (W)	Volume (L)	Masse (lbs)	Facteur de sécurité	Angle de renversement (degré)	Coût (\$ CAD)	Esthétique (/10)
Cible 1.3 m/s (Objectif)	1.3 m/s (↑)	800 W (↓)	50 L (↓)	15 lbs (↓)	3 (↑)	45 degrés (↑)	3000 \$CAD (↓)	8/10 (↑)
Évaluation	1.2 m/s	1000 W	50 L	20lbs	2.8	45 degrés	5500 \$CAD	8/10

2.4.3 Concept 7 : Chariot élévateur

Le concept chariot élévateur se distingue avec ses deux plateaux éléveurs situés aux extrémités du robot. Les deux plateaux servent à s'appuyer sur les obstacles et de soulever le robot afin de lui donner de l'adhérence aux roues sur les obstacles. Les plateaux peuvent se lever amplement afin de passer de grands obstacles. Ils sont dirigés par deux vérins et le plateau est dirigé par deux glissières de chaque côté du plateau. Un des vérins assure la position d'élévation et l'autre permet au plateau de pivoter légèrement. Quatre grosses roues motrices assurent le déplacement du robot. De plus, le système de déplacement complet est assemblé en un seul bloc. En bref, voici les avantages et inconvénients du système :

Avantages :

- Vitesse élevée sur terrain plat
- Robuste

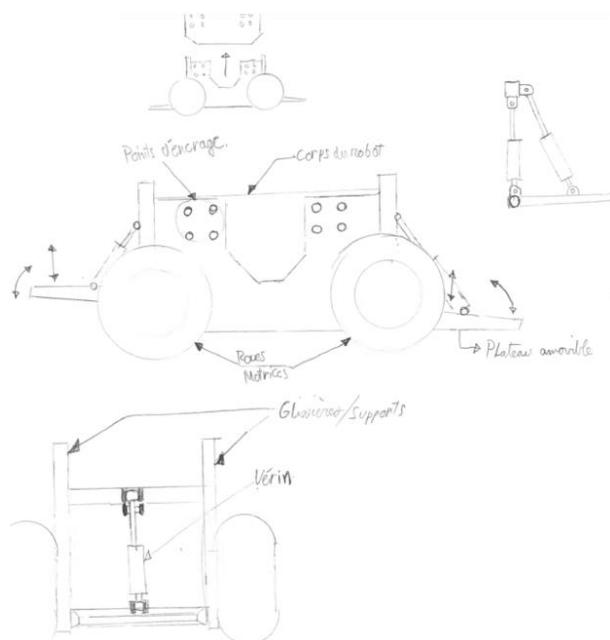


Figure 2.4 Croquis du chariot élévateur

Inconvénients :

- Volumineux
- Capacité incertaine à gravir les obstacles
- Peu esthétique

Les performances de ce concept ont été évaluées comme suit :

Vitesse à l'horizontale :

La vitesse de ce concept a été évaluée à 2m/s, ce qui est beaucoup plus élevé que l'objectif fixé. L'évaluation est relative au robot actuel et des autres concepts. Ces modules seront clairement plus rapides que le système de chenille actuel du robot (1 m/s).

Consommation électrique :

La consommation de ce concept a été évaluée à 900W étant donné qu'il possède un système à roues (considéré plus efficient que les chenilles ; pour 750 W) ainsi que de deux petits actionneurs forts mais de petite course et vitesse (pour 150W).

Volume :

Le volume de ce concept a été évalué à 70L, puisque les fourches vont dépasser largement devant le robot pour assurer la fonction de monter les marches.

Masse :

La masse de ce système est estimée à 20lbs par côtés, puisque le système comporte (par coins) deux actuateurs et leurs fixations (10lbs), un moteur électrique moyen avec un réducteur (6lbs), et une roue pneumatique de grand diamètre (4lbs).

Facteur de sécurité :

Le facteur de sécurité optimal est estimé à 2. Le système est pris dans un petit espace afin de laisser assez de place pour les grosses roues, mais sans trop éloigner le système du robot (ce qui augmenterait beaucoup sa longueur).

Angle de renversement :

L'angle de renversement est difficile à déterminer. Par contre, il est estimé à 35° puisqu'il serait souhaitable de le minimiser par rapport aux autres spécifications lors de la conception approfondie à cause de ses impacts sur le volume, le coût et sur le facteur de sécurité.

Coût :

Le coût de ce système est estimé à 4600\$CAD, puisque le système comporte (par coins) deux actuateurs (500\$), un moteur électrique moyen avec un réducteur (250\$), et une roue pneumatique de grand diamètre (50\$) et plusieurs pièces usinées de petite taille (325\$)

Esthétique :

Par évaluation subjective de l'équipe de conception, ce concept est considéré moyen (6/10).

En résumé, les performances du concept sont dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2.4 Spécifications techniques du chariot élévateur

	Vitesse à l'horizontale (m/s)	Consommation électrique (W)	Volume (L)	Masse (lbs)	Facteur de sécurité	Angle de renversement (degré)	Coût (\$ CAD)	Esthétique (/10)
Cible 1.3 m/s (Objectif)	1.3 m/s (↑)	800 W (↓)	50 L (↓)	15 lbs (↓)	3 (↑)	45 degrés (↑)	3000 \$CAD (↓)	8/10 (↑)
Évaluation	2 m/s	900 W	70 L	20lbs	2	35 degrés	4500 \$CAD	6/10

2.4.4 Concept 11 : Bras sur rail

Le bras sur rail se divise en quatre assemblages symétriques et indépendants fixés sur les patrons de trous. Des vérins ou autres sortes d'actuateurs linéaires contrôlés permettent de soulever ou d'abaisser l'avant ou l'arrière du robot afin de franchir de marches. L'allongement des actuateurs permet aussi d'augmenter l'angle de renversement du robot en allongeant la distance entre ses points d'appui. L'angle des actuateurs (ci-contre montré à 45°) pourra être ajusté entre les parcours pour optimiser la capacité du robot à franchir les obstacles. Des roues déformables d'un diamètre maximum permettront une friction maximale sur les obstacles à franchir. Puisque les roues sont de grand diamètre et qu'elles sont attachées directement aux moteurs, la vitesse et l'efficience seront optimales. Au besoin, les extensions peuvent même être télescopiques pour en tirer le meilleur de l'empattement. En bref, voici les avantages et inconvénients du système :

Avantages :

- Vitesse élevée sur terrain plat
- Faible consommation énergétique
- Angle de renversement très élevé (dépendamment de l'ajustement de l'angle de l'actuateur)
- Petite masse
- Petit volume

Les performances de ce concept ont été évaluées comme suit :

Vitesse à l'horizontale :

La vitesse de ce concept a été évaluée à 1.8m/s, c'est-à-dire au deçà de l'objectif fixé. L'évaluation est plutôt arbitraire par manque de référence, mais relative au robot actuel et aux autres concepts. Ces modules seront clairement plus rapides que le système de chenille actuel du robot (1 m/s), mais ne sont pas aussi rapides que les autres concepts à roues.

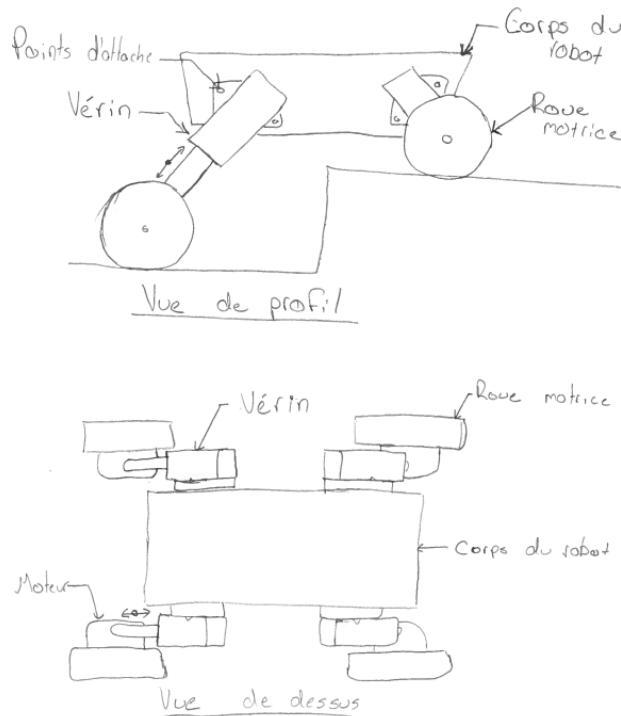


Figure 2.5 Croquis du bras sur rail

Inconvénients :

- Actuateurs linéaires fragiles
- Peu esthétique

Consommation électrique :

La consommation de ce concept a été évaluée à 1000W à qu'il possède un système à roues (considéré plus efficient que les chenilles ; pour 750 W) ainsi qu'un système de déplacement linéaire par coin (considéré moins efficient qu'un système rotatif ; pour 250W).

Volume :

Le volume de ce concept a été évalué à 70L, puisque les roues doivent avoir un diamètre maximum (et les points d'appui sont au milieu de celles-ci ; donc la longueur est élevée) et que le système de déplacement linéaire est estimé plutôt épais.

Masse :

La masse de ce système est estimée à 20lbs par côtés, puisque le système comporte (par coins) un gros actuateur linéaire (10lbs), un moteur électrique moyen avec un réducteur (6lbs), et une roue pneumatique de grand diamètre (4lbs)

Facteur de sécurité :

Le facteur de sécurité est estimé à 2.5. Cette estimation est plutôt arbitraire, mais basée sur le fait que le système de translation linéaire est en porte-à-faux et qu'il aura de forts moments de force à son bout (FS=1.5). Cependant, il reste assez d'espace pour rajouter des renforts quelconques ou un amortissement (FS+1).

Angle de renversement :

L'angle de renversement dépend de la configuration qui lui sera donnée (angle de fixation des systèmes de déplacements linéaires. Par trigonométrie et des estimations grossières de la distance maximale des systèmes sortis au maximum ainsi que de la position du centre de masse, l'angle de renversement sera approximativement de 40 degrés.

Coût :

Le coût de ce système est estimé à 4600\$CAD, puisque le système comporte (par coins) un gros actuateur linéaire (400\$), un moteur électrique moyen avec un réducteur (250\$), et une roue pneumatique de grand diamètre (50\$) et plusieurs pièces usinées (450\$)

Esthétique :

Par évaluation subjective de l'équipe de conception, ce concept n'est pas considéré très esthétique (3/10).

En résumé, les performances du concept sont dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2.5 Spécifications techniques des bras sur rails

	Vitesse à l'horizontale (m/s)	Consommation électrique (W)	Volume (L)	Masse (lbs)	Facteur de sécurité	Angle de renversement (degré)	Coût (\$ CAD)	Esthétique (/10)
Cible 1.3 m/s (Objectif)	1.3 m/s (↑)	800 W (↓)	50 L (↓)	15 lbs (↓)	3 (↑)	45 degrés (↑)	3000 \$CAD (↓)	8/10 (↑)
Évaluation	1.8 m/s	1000 W	70 L	20lbs	2	40 degrés	4600 \$CAD	3/10

2.4.5 Résumé des performances

Voici un tableau contenant le résumé des spécifications techniques estimées de tous les concepts retenus.

Tableau 2.6 résumé des spécifications techniques des concepts choisis

Critères	Objectif	Rover (#1)	Bras-chenillés (#4)	Fork lift (# 7)	Roue sur rail (# 11)
Vitesse à l'horizontale (m/s)	↑	2	1.2	2	1.8
Consommation électrique (W)	↓	700	1000	900	1000
Volume (L)	↓	60	50	70	70
Masse (lbs)	↓	10	20	20	20
Facteur de sécurité	↑	3	2.8	2	2.5
Angle de renversement (degré)	↑	30	45	35	40
Coût (\$ CAD)	↓	4000	5500	4600	4500
Esthétique (/10)	↑	3	8	6	3

2.5 Matrice de décision

Avec les 4 concepts restants, nous avons évalué les concepts à l'aide du barème afin de les classer en ordre.

Tableau 2.7 Matrice de décision

Critères	Objectif	Importance relative	Rover (#1)	Bras-chenillés (#4)	Fork lift (# 7)	Roue sur rail (# 11)
Vitesse à l'horizontale (m/s)	↑	19.7%	3	2	3	3
Consommation électrique (W)	↓	11.9%	3	1	2	1
Volume (L)	↓	14.4%	2	3	1	1
Masse (lbs)	↓	17.7%	3	2	2	2
Facteur de sécurité	↑	13.4%	3	2	1	1
Angle de renversement (degré)	↑	10.6%	0	3	1	2
Coût (\$ CAD)	↓	9.1%	2	1	2	2
Esthétique (/10)	↑	3.3%	0	3	2	0
Pointage			2.35	2.08	1.82	1.74
Rang			1	2	4	3

Avec les spécifications évaluées, le concept #1 (le Rover) est gagnant.

2.6 Analyse et justification

Bien que le concept #1 a des spécifications techniques supérieures au concept #4, ce dernier est tout de même choisi. La raison principale est qu'il y a une grande incertitude quant à la capacité du concept #1 à gravir des marches à cause de sa géométrie. Aussi, la méthode imaginée pour gravir les marches avec le concept #1 implique qui les bras devront se replier et se déplier à chaque marche, ce qui est à éviter pour éviter des impacts répétitifs et qui le rend difficile à piloter et qui peut diminuer grandement la vitesse dans les obstacles. Autrement dit, la facilité au pilotage et la méthode pour franchir les obstacles n'ont pas été prises en compte dans les étapes précédentes puisqu'elles étaient difficiles à évaluer. De plus, il y a seulement une différence de 12% entre les pointages obtenus lors de la matrice de décision finale entre le concept #1 et #4. Cette légère variation nous a donc permis de prendre en compte d'autres critères qui n'ont pas été indiqués lors de l'énumération des attributs.

Pour ces raisons, il est préférable de se fier au concept #4 qui gravira les marches plus facilement de façon droite, sans avoir à bouger ses leviers à chaque marche et dont l'efficacité est plus probable en fonction des épreuves des compétitions dernières. De plus, ce concept possède aussi quelques similitudes avec les robots de différents compétiteurs, ce qui nous permet de tirer avantage de chacun de leur modèle afin de pouvoir obtenir le système de propulsion le plus polyvalent possible tout en validant que chacun des atouts du système de propulsion *Bras-Chenillé* est efficace lors de compétition.

3 Architecture

Cette section présente l'architecture du module de mobilité. L'architecture du produit consiste à diviser le produit en sous-modules fonctionnels ainsi que leurs relations entre eux. Ces composantes sont illustrées par le diagramme schématique.

3.1 Diagramme schématique

La figure suivante illustre le diagramme schématique représentant les éléments physique et fonctionnel ainsi que les types d'interactions entre chacune des composantes pour le système de propulsion Bras Chenillé.

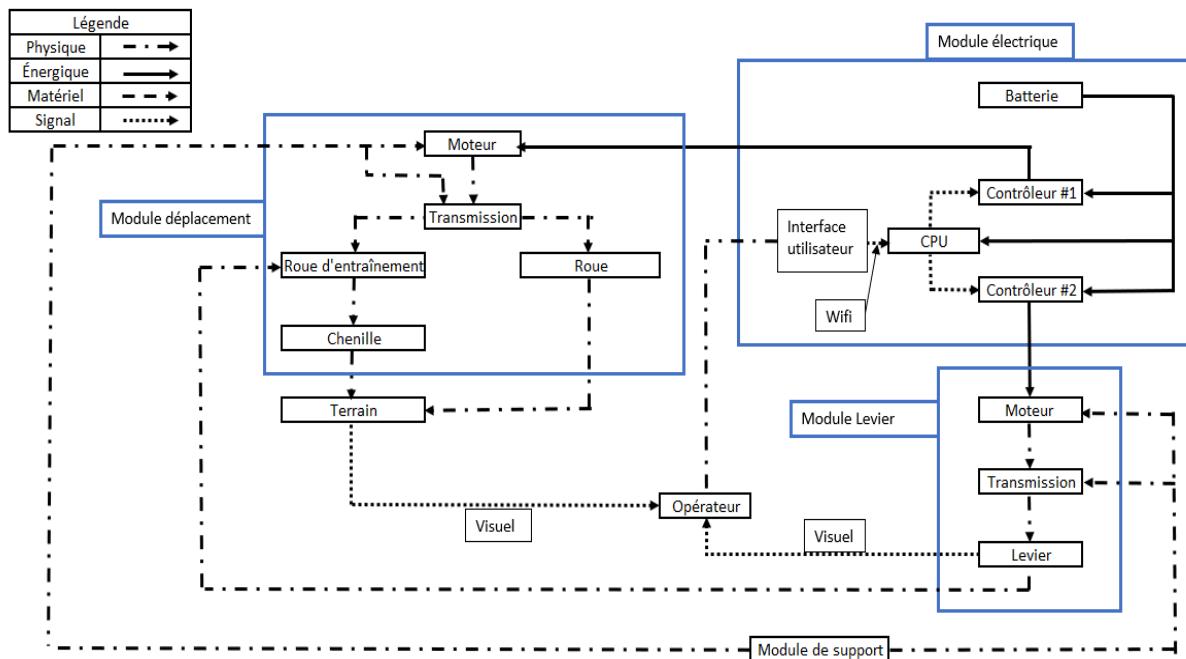


Figure 3.1 Diagramme schématique du Bras chenillé

Tel qu'illustré ci-dessus, il est possible de constater que ce système de propulsion comporte trois différents modules, soit le module électrique, le module de déplacement et le module de levier. La géométrie approximative de ce réseau est illustrée à la Figure 3.2.

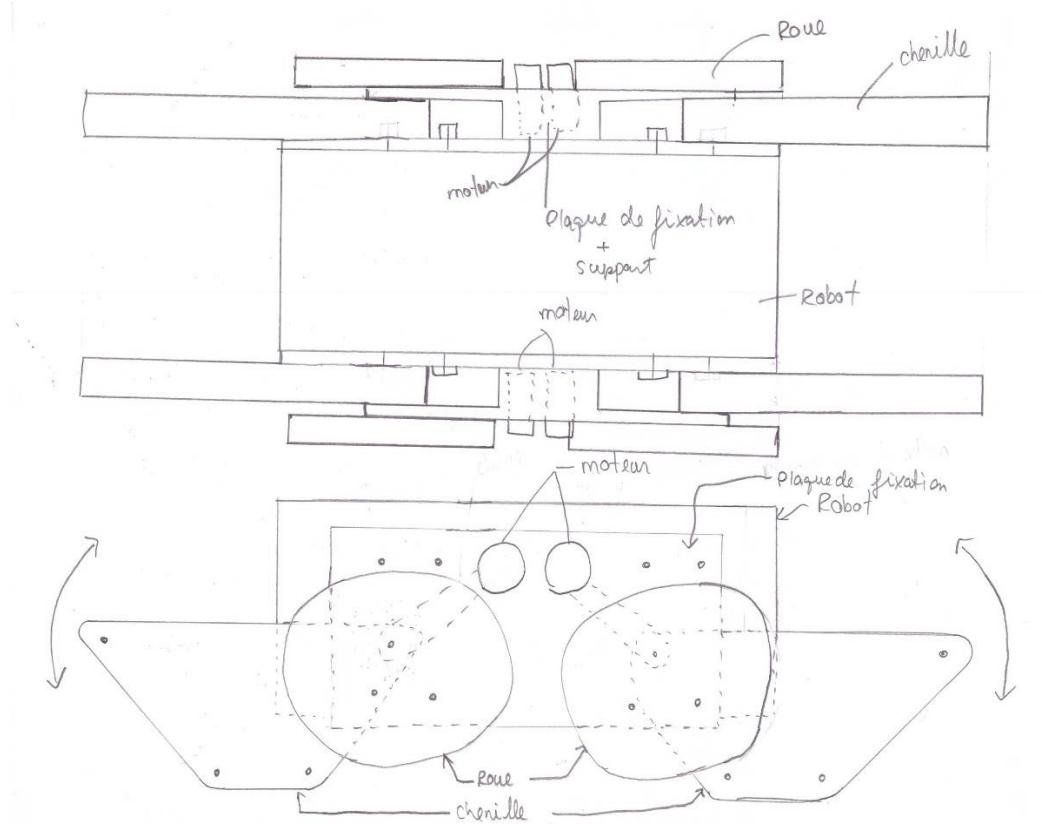


Figure 3.2 Croquis de la géométrie approximative

Les différents éléments du réseau et leurs liens sont expliqués dans les sections suivantes par regroupements.

3.2 Module électrique

Le module électrique est composé de batteries, de deux différents contrôleurs de moteur (drive) ainsi que d'un microcontrôleur (CPU). Ce module est la base d'énergie de notre système car elle permet d'alimenter tout le système électrique du système de propulsion afin d'assurer son bon fonctionnement.

Concernant les batteries, celles-ci sont installé dans le robot et permettent de fournir de l'énergie aux deux contrôleurs de moteur (drive) ainsi qu'à l'unité de traitement centrale (CPU). D'où le lien électrique entre ceux-ci.

L'interface utilisateur possède un lien physique avec l'opérateur, car celui-ci doit appuyer manuellement sur les commandes afin de pouvoir permettre au robot d'effectuer le mouvement voulu.

Par la suite, le CPU possède un lien de signal avec l'interface utilisateur. En effet, lorsque l'opérateur transmet une instruction à l'interface utilisateur, celui-ci transmet le signal directement à l'unité de traitement central (CPU).

Lorsque le CPU reçoit ces instructions, celui-ci transmet alors un signal aux deux contrôleurs de moteur afin de les faire fonctionner dépendant du signal reçu par l'opérateur.

Lorsque chacun des deux contrôleurs de moteur reçoit alors ce signal, ceux-ci peuvent transmettre alors le courant nécessaire au moteur afin de le faire fonctionner. C'est-ce qui explique le lien électrique entre les contrôleurs de moteur et les moteurs associés.

3.3 Module de levier

Le module à levier est constitué de trois éléments, c'est-à-dire d'un moteur, d'un système de transmission et d'un bras de levier. Ce module permet alors d'effectuer la rotation du système de chenille afin de permettre au robot de soit utiliser les chenilles comme système de propulsion, ou pour les désengager afin de lui permettre de se mouvoir à l'aide des roues.

Lorsque le moteur reçoit l'énergie nécessaire par le contrôleur de moteur, permet alors de le faire fonctionner et du même coup, faire fonctionner la transmission dû à la liaison physique entre ceux-ci.

Lorsque la transmission est en mouvement, celle-ci peut alors actionner le levier qui est relié physiquement sur celle-ci.

Dépendant de l'information envoyé par le CPU au contrôleur du moteur de levier, le levier pourra soit effectuer une rotation horaire ou anti-horaire afin d'engager ou de désengager le système de chenille.

Dans le même mouvement, la roue d'entraînement est alors engagée ou désengagée étant donné que celle-ci est directement liée au système de levier

De plus, il y a une liaison de signal entre le levier et l'opérateur étant donné que l'opérateur voit la position du levier, ce qui lui permet de déterminer si celui-ci doit l'engager ou le désengager en fonction de sa position et du terrain.

3.4 Module de déplacement

Pour ce qui est du troisième module, qui est le module de déplacement, celui-ci est constitué du moteur permettant le mouvement de propulsion, de la transmission du système de propulsion, d'une roue d'entraînement, de la chenille et d'une roue. Ce système permet alors au robot, lorsque qu'il reçoit l'énergie du contrôleur de moteur, de se mouvoir en actionnant la roue et le système de chenille.

Le moteur, lorsqu'il est alimenté en énergie, permet alors de débuter le mouvement de la transmission qui lui est relié physiquement.

Lorsque la transmission est en mouvement, celle-ci permet alors de faire tourner à la fois la roue d'entraînement et la roue qui sont tous relié sur le même arbre.

Lorsque la roue d'entraînement est en mouvement, celle-ci actionne alors le mouvement de la chenille qui est installé sur celle-ci.

3.5 Module de support

Aussi, le support du système de propulsion est une composante physique ne faisant partie d'aucun module, mais comporte certaines liaisons avec des éléments de ce système. Celui-ci est relié physiquement avec chacun des moteurs et transmissions du module de levier et de déplacement.

3.6 Terrain et opérateur

Le terrain, qui n'est pas considéré comme un module, mais est représenté dans le diagramme schématique, permet de comprendre les liens entre celui-ci et certains éléments du système.

Tout d'abord, celui-ci possède un lien physique avec la chenille et la roue, car ils sont directement reliés lorsque le robot est déposé au sol.

L'opérateur perçoit le terrain comme un signal visuel puisqu'il adapte la position du robot par rapport aux obstacles rencontrés en envoyant des commandes au CPU.

4 Configuration

Cette section présente les différentes possibilités de composants/éléments fonctionnels qui remplissent des composantes du diagramme schématique. Les principaux éléments sont présentés ci-dessous.

4.1 Transmission du levier

La transmission du levier est le mécanisme servant à faire tourner le levier pour lever le robot en montant les marches. Ce mécanisme doit réduire la vitesse de rotation d'un moteur DC ordinaire suffisamment afin de transmettre un couple très élevé au levier, à basse vitesse. Trois alternatives ont été explorées.

4.1.1 Fonctions

Les différentes fonctions du module sont listées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4.1 Fonctions de la transmission du levier

Fonctions	Description
Permettre de transformer le mouvement de rotation rapide du moteur en un mouvement de rotation très lent et à couple élevé	Le couple sur le levier doit être suffisant pour soulever le robot au complet sur un levier.
Être peu dispendieux	Le prix doit être le plus bas possible afin d'atteindre les cibles de coûts.
Être compact	La transmission doit être la plus petite que possible afin d'éviter d'augmenter le volume extérieur du produit.
Permettre une étendue de mouvement possible du levier maximale	Une étendue de mouvement maximale permet au robot d'effectuer ses parcours plus aisément et de franchir des parcours plus accidentés.
Résister aux forces sur le levier	La transmission doit résister au poids complet du robot ainsi qu'aux charges lorsque ce dernier bascule.
Être facile à assembler sur les autres pièces	La transmission doit être assemblable.
Être durable (risques de bris)	Le risque de bris doit être minimum afin que le robot ne se brise pas durant la compétition.
Être efficient au niveau énergétique	Une consommation d'énergie minimale est un atout.
Comporter un minimum de pièces	Une quantité minimale de pièce diminue les coûts et augmente la facilité d'entretien, d'assemblage et la durabilité.
Être autobloquant	Le système ne doit pas requérir de la puissance pour conserver sa position si une charge extérieure est appliquée.

4.1.2 Configurations alternatives

Ci-dessous, les trois configurations sont présentées, soit la demi vis sans fin, la vis sans fin avec poulie et ressort et le vérin électrique. Les détails pour chaque fonction sont à l'Annexe D.

4.1.2.1 Alternative #1 : Demi vis sans fin

La demi vis sans fin est la première configuration trouvée répondant aux besoins. Celle-ci est illustrée à la figure suivante.

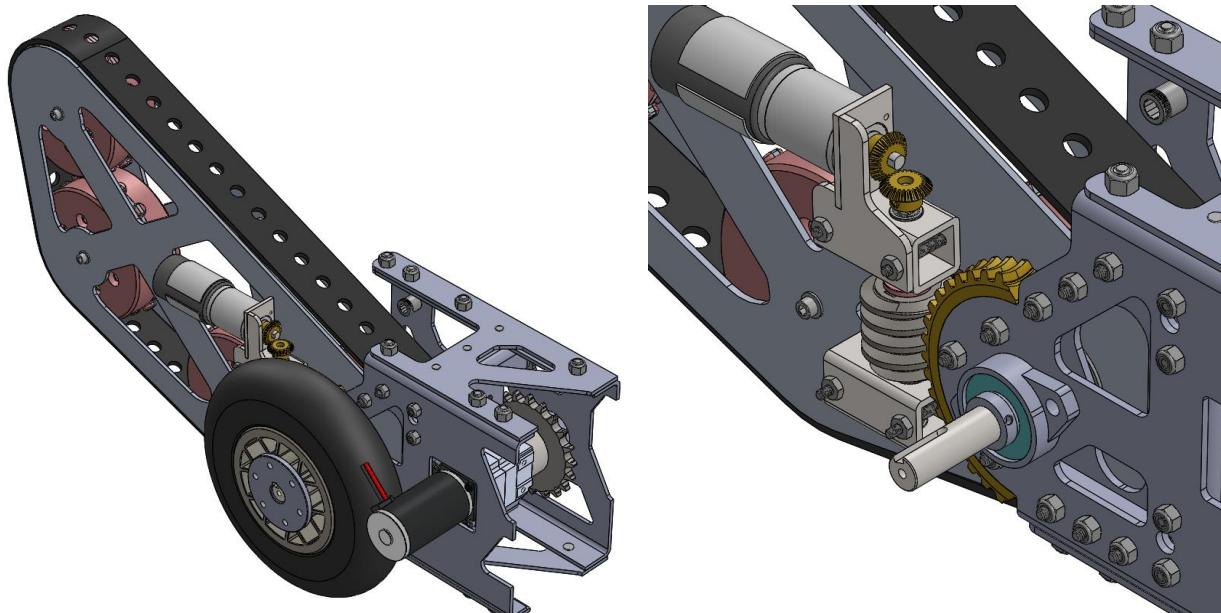


Figure 4.1 Vues de la demi-vis sans fin

Cette configuration permet la transmission du mouvement rotatif au levier par une transmission de type vis sans fin. Une roue de vis sans fin concentrique à l'arbre de rotation mais fixée solidement au châssis permet de faire un couple autour de celui-ci, par le biais de la vis sans fin. L'arbre de transmission de l'avance peut ainsi transmettre son mouvement rotatif, de façon indépendante au mouvement du levier.

Les différents éléments de la solution sont identifiés à la figure suivante.

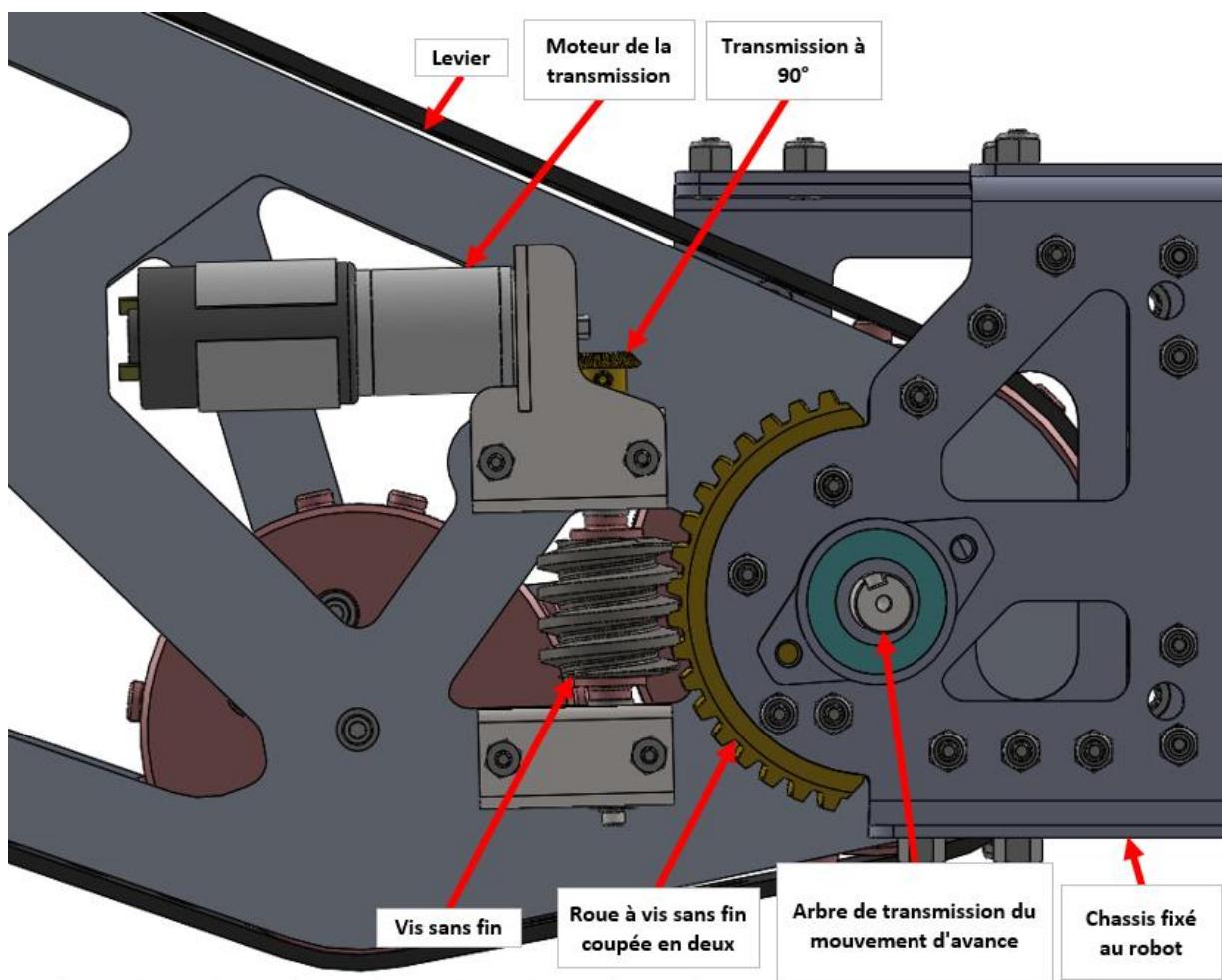


Figure 4.2 Identification des éléments de la demi-vis sans fin

4.1.2.2 Alternative #2 : Vis sans fin avec poulie et ressort

La vis sans fin avec poulie et ressort est la seconde configuration trouvée répondant aux besoins. Celle-ci est illustrée à la figure suivante. Il n'est pas vraiment nécessaire d'identifier les éléments, puisqu'il n'y a que trois : le vérin, le levier et le châssis.

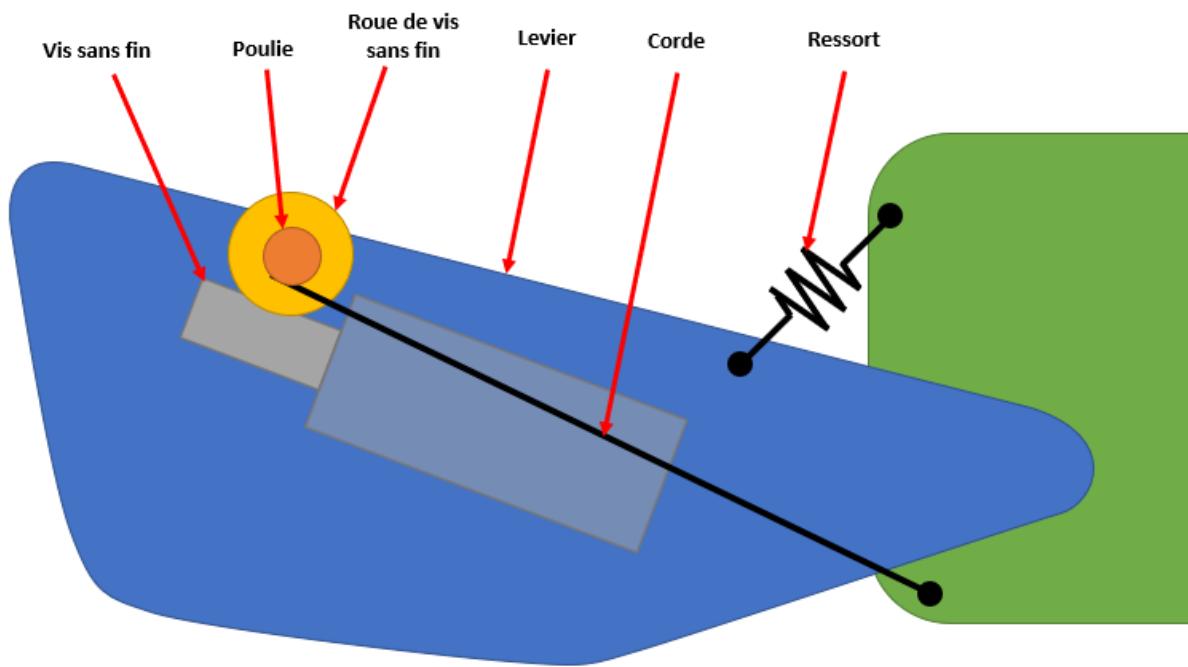


Figure 4.3 Croquis de la vis sans fin avec poulie et ressort

Cette configuration permet de transmettre le mouvement à distance, dans un sens. Le principe de poulie d'enroulement avec une corde permet de placer le moteur et la transmission à vis sans fin librement afin de libérer de l'espace près de l'arbre de transmission du mouvement d'avance. Cependant, l'enroulement ne peut que se faire dans un sens, par conséquent un ressort très rigide est requis afin de relever le levier lorsque le moteur déroule la poulie.

4.1.2.3 Alternative #3 : Vérin électrique

Le vérin électrique est la troisième configuration trouvée répondant aux besoins. Celle-ci est illustrée à la figure suivante.

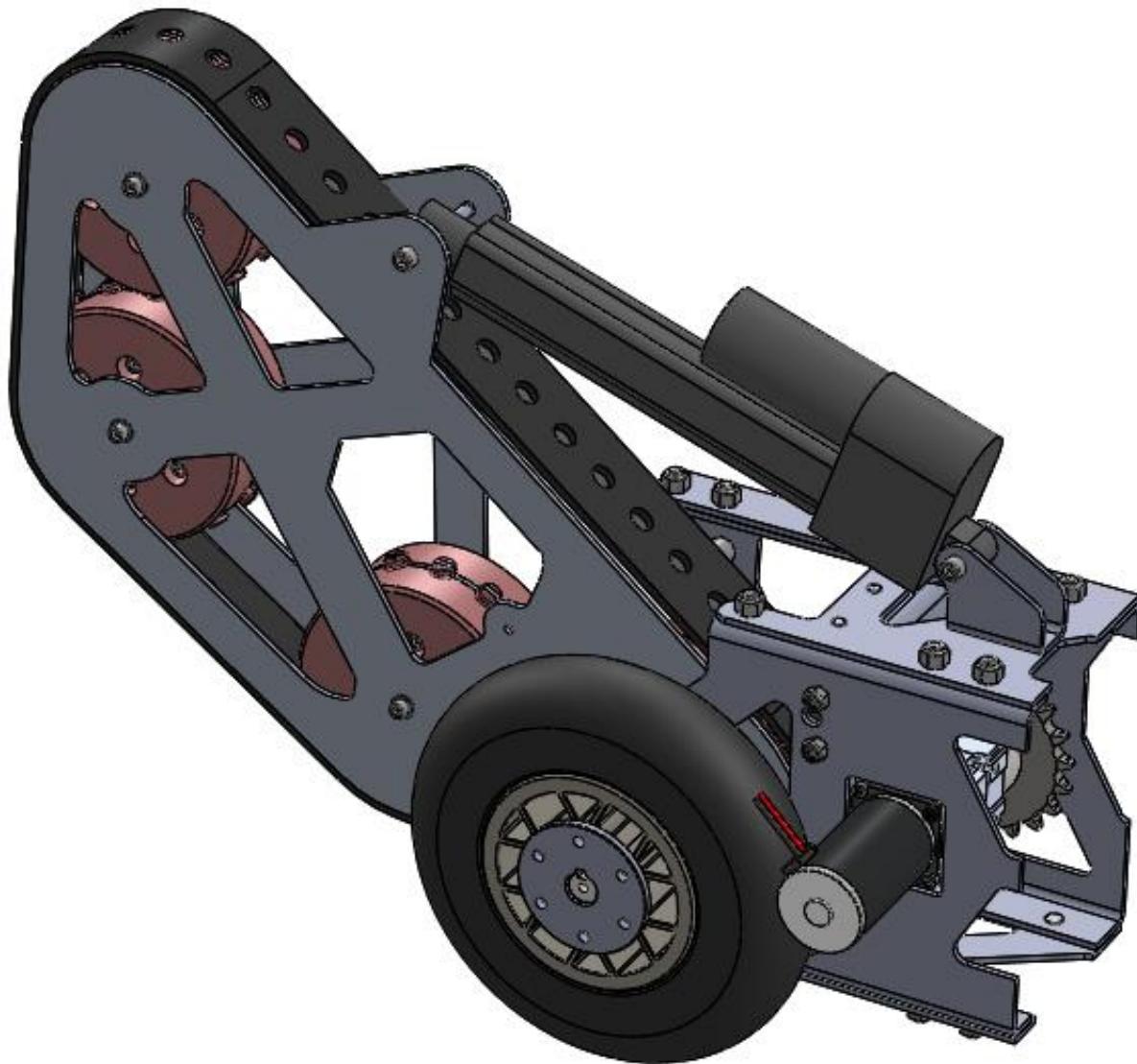


Figure 4.4 Vue du vérin électrique

Cette configuration permet d'incliner le levier à l'aide d'un vérin électrique. Le vérin attaché solidement au châssis et au levier transmet directement un moment sans besoin de transmission.

4.1.3 Choix de la configuration

Ci-dessous, les trois configurations sont évaluées par rapport aux fonctions listées au point 0.

Tableau 4.2 Évaluation des configurations pour la transmission du levier.

Fonction	Pondération (%)	Demi vis sans fin	Vis sans fin avec poulie et ressort	Vérin électrique
La transmission...				
permet de transformer le mouvement de rotation rapide du moteur en un mouvement de rotation très lent et à couple élevé	10	3	2	3
est peu dispendieuse (Coût estimé, par côté)	15	2 (420\$)	3 (360\$)	1 (650\$)
est compacte	12	2	3	1
permet une étendue de mouvement possible du levier maximale	8	3	2	1
résiste aux forces sur le levier	15	3	2	3
est facile à assembler sur les autres pièces	5	3	1	3
est durable (Risques de bris)	8	2	1	3
est efficient au niveau énergétique	5	2	1	3
comporte un minimum de pièces	12	2	1	3
est autobloquant	10	3	3	3
Pointage :		248	207	230

À la suite de l'analyse du tableau ci-dessus, il est possible de déterminer que la demi vis sans fin dépasse les deux autres concepts à cause de sa bonne performance générale au niveau de chacune des fonctions. En effet, celle-ci c'est démarqué des deux autres configurations grâce à sa performance pour transmettre le mouvement rotatif rapide du moteur vers un mouvement lent et à couple élevé en plus de sa forte résistance aux forces transmises et à l'étendue optimale du bras de levier.

4.2 Transmission du mouvement d'avance

Le deuxième module est le système permettant de transmettre le mouvement de rotation du moteur vers l'arbre principal qui fait tourner la roue et la chenille du même coup. Le système de transmission devra pouvoir résister au couple transmis par le moteur principal jusqu'au roues et aux chenilles.

4.2.1 Fonctions

Le tableau suivant illustre chacune des fonctions que le système de transmission entre le moteur et l'arbre principal devra répondre.

Tableau 4.3 Fonctions de la transmission d'avance

Fonctions	Description
Être compact	La réduction du volume est primordiale afin que le système puisse se déplacer dans des zones plus restreintes lors des compétitions.
Être efficient au niveau énergétique	La perte de puissance entre l'arbre du moteur électrique et l'arbre principal doit être réduite au maximum.
Être peu coûteux	La réduction du prix permet de rendre le produit accessible financièrement.
Être simple à entretenir	La facilité d'entretien permet de réduire la complexité des manipulations lors d'entretiens simples. Les composantes doivent être facilement accessibles.
Contenir peu de composante	La réduction du nombre de composante permet alors de réduire les risques de bris.
Être le moins bruyant possible	La réduction du bruit permettra une meilleure expérience lors de l'utilisation.
Être facile à assembler sur les autres pièces	La transmission doit être assemblable.
Être durable (risques de bris)	Le risque de bris doit être minimum afin que le robot ne se brise pas durant la compétition.

4.2.2 Configurations alternatives

Afin de pouvoir répondre de façon optimale à chacune des fonctions énumérées précédemment, il fut possible d'obtenir trois configurations différentes permettant la transmission du mouvement rotatif du moteur électrique vers l'arbre principal. Chacune de ces trois configurations sont alors présentées ci-dessous.

4.2.2.1 Alternative #1 : Chaines

Tel qu'illustré sur l'image ci-contre, la première configuration du système permet la transmission du mouvement rotatif à l'aide d'une chaîne et de deux engrenages. De cette façon, il est possible de mettre l'axe du moteur électrique en parallèle à l'arbre principale et ainsi réduire la perte d'espace. Cette configuration nécessite alors seulement l'utilisation de pièce standard tel que des engrenages, des clés et une chaîne. De plus, le moteur ne nécessite pas de support étant donné que celui-ci peut être fixé directement sur le système de support de la chenille.

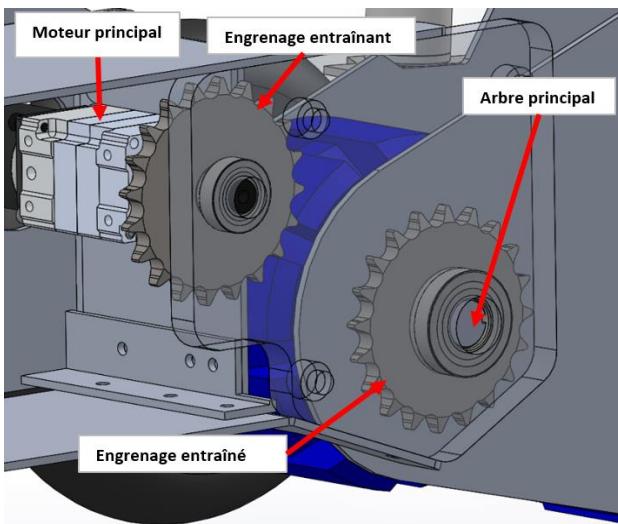


Figure 4.5 Vues de la transmission par chaînes

4.2.2.2 Alternative #2 : Transmission à engrenages 90°

La figure ci-dessous illustre la deuxième configuration permettant de transmettre le mouvement de rotation entre le moteur électrique et l'arbre principal. Ce système est alors muni d'une transmission à 90 degrés permettant d'installer le moteur perpendiculairement à l'axe principale, tout en étant connecté directement sur celui-ci. Ce type de système nécessite l'utilisation de pièce standard tel qu'une transmission à 90 degrés compatibles avec le moteur utilisé. Ce système nécessite la fabrication d'une plaque de support afin de pouvoir y fixer le moteur.

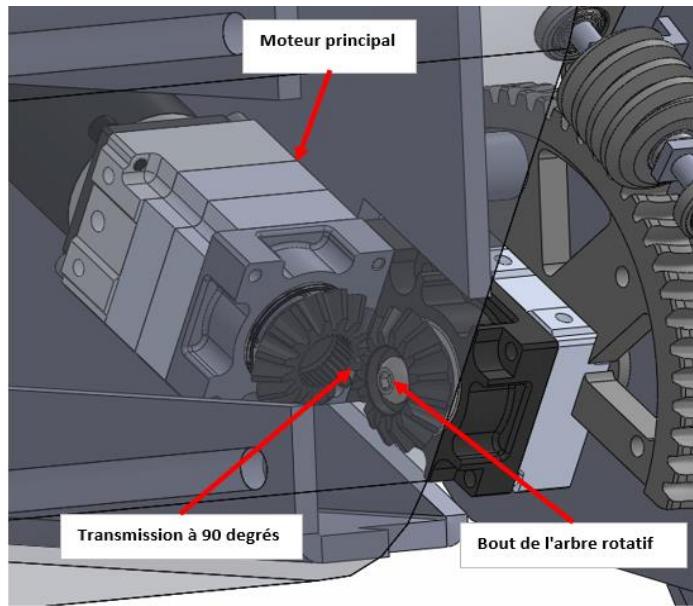


Figure 4.6 Vues de la transmission par engrenages à 90°

4.2.2.4 Alternative #3 : Transmission à engrenages 90° interne

La troisième configuration consiste à installer le moteur à l'intérieur du système de chenille et ainsi pouvoir transmettre le mouvement à l'arbre principal à l'aide d'engrenage de coniques. Ce système nécessite l'utilisation de composante standard tel que les engrenages. De plus, certaines pièces devront être fabriquées tel que l'arbre principal non standard, les roues d'entraînement de la chenille ainsi que des supports de fixation du moteur sur le corps de la chenille.

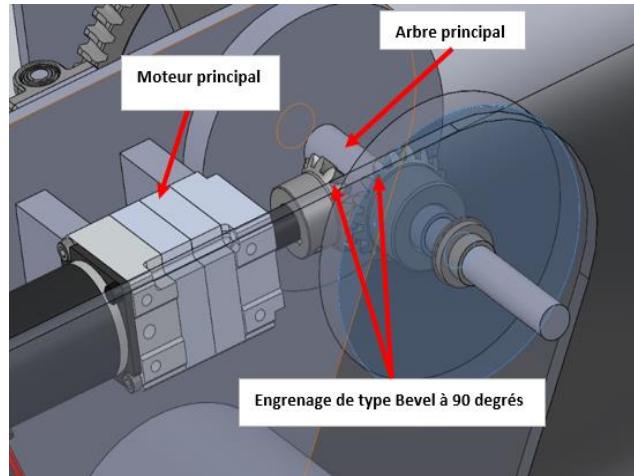


Figure 4.7 Vues de la transmission par engrenages à 90° internes

4.2.3 Choix de la configuration

Chacune des trois configurations présente des caractéristiques différentes toute en leur permettant d'effectuer le même travail. Elles seront alors analysées dans le tableau ci-dessous afin de déterminer laquelle sera le plus efficace au sein de notre système de transmission du mouvement entre le moteur et l'arbre principal. Une cote de 1, 2 ou 3 leur seront attribuées pour chacune de fonctions énumérées précédemment selon leurs performances.

Tableau 4.4 Évaluation des configurations pour la transmission d'avance

Fonction	Pondération (%)	Chaines	Engrenages 90°	Engrenages 90°internes
La transmission...				
est compacte	25	2	1	3
est efficiente au niveau énergétique	10	2	2	2
est peu coûteux	15	3 (120\$)	2 (200\$)	1 (400\$)
est simple à entretenir	10	3	2	1
contient peu de composantes	15	3	2	1
est le moins bruyant possible	3	1	2	3
est facile à assembler sur les autres pièces	10	3	2	1
est durable (risques de bris)	12	3	2	2
Pointage :		259	175	178

À l'aide du tableau ci-dessous, il est possible de déterminer que le système utilisant une chaîne et des engrenages sera la configuration permettant de répondre le plus efficacement à un maximum des fonctions énumérée précédemment. Ce système se démarque des autres principalement par son faible coût, sa simplicité d'entretien et par le fait que le système comporte très peu de composantes.

4.3 Module de support

Le troisième module à optimiser est le corps du mécanisme. Celui-ci comporte le support du module complet et les corps des chenilles. Les chenilles sont liées directement au support du module. L'assemblage sera donc composé de deux modules identiques fixés de part et d'autre du robot.

4.3.1 Fonctions

Les fonctions principales de ces composants sont listées ci-dessous.

Tableau 4.5 Fonctions du module de support

Fonctions	Description
Être léger	Le châssis du module doit être le plus léger afin de réduire la demande énergétique au déplacement et afin d'être facile à transporter entre les utilisations.
Être résistant et rigide	Le châssis doit être résistant aux chocs du terrain rencontré et supporter le poids du robot. Une bonne rigidité permet d'augmenter la précision des mouvements du robot.
Être peu coûteux	La fabrication de ce composant doit être peu coûteux afin de rendre le concept abordable.
Être esthétique	Un module plus attrayant agrémentera l'utilisation du robot.
Protéger les transmission	Les moteurs sont directement assemblés sur les supports, donc ceux-ci doivent faire office de protection pour les composants.
Être simple à assembler	La facilité d'assemblage permet de performer un entretien plus rapide.

4.3.2 Configurations alternatives

Afin de trouver une solution viable qui répondra à toutes les fonctions du système énumérées ci-dessus, trois configurations de supports différentes sont analysées. Chacune de ces configurations est présentée ci-dessous incluant une courte description sur chacune d'elle.

4.3.2.2 Alternative #1 : Tôles d'aluminium boulonnées

La première configuration du module consiste à un assemblage de tôle joint par des boulons pour chacun des composants. L'assemblage du bras chenillé est composé de deux tôles d'aluminium découpées au laser, gabarit 14, jointes par trois supports identiques de même gabarit. Les tôles et les supports sont assemblés par des vis M4 vissées dans des inserts rivetés aux supports. Deux roulements à billes sont insérés sur chacune des tôles afin d'assurer la rotation entre le support du bras chenillé et celui fixé au robot. La figure suivante montre le support de bras chenillé assemblé et en vue explosé.

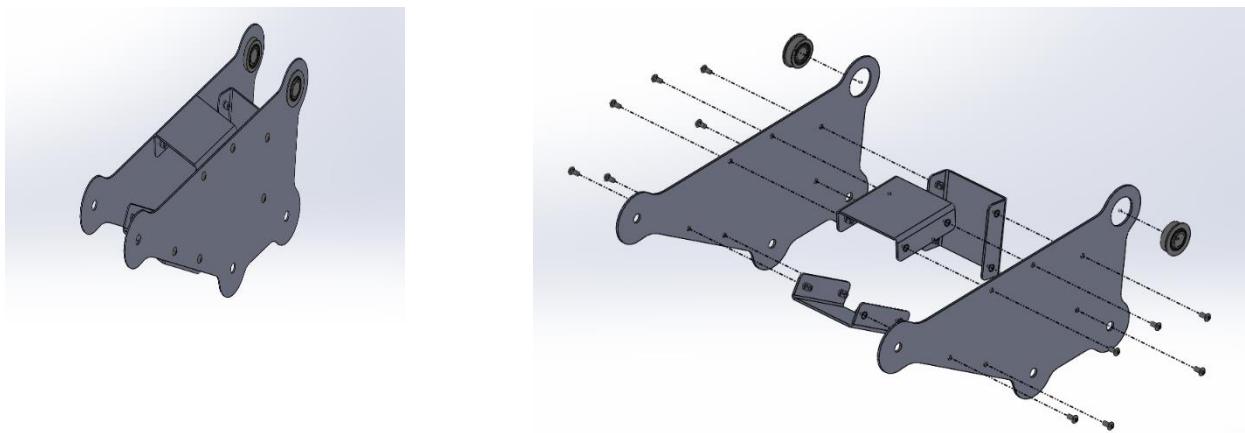


Figure 4.8 Vues du support en tôles boulonnées du bras chenillé

Le support central est composé de deux tôles 1/8 avec des rebords repliés à 90 degrés. Les deux tôles sont liées par des vis et inserts M6. Les moteurs sont directement assemblés aux tôles utilisant les 8 trous de fixations de chaque moteur. Il y a des dégagements pour accéder aux vis de fixation du robot. La configuration du support est présentée aux figures suivantes.

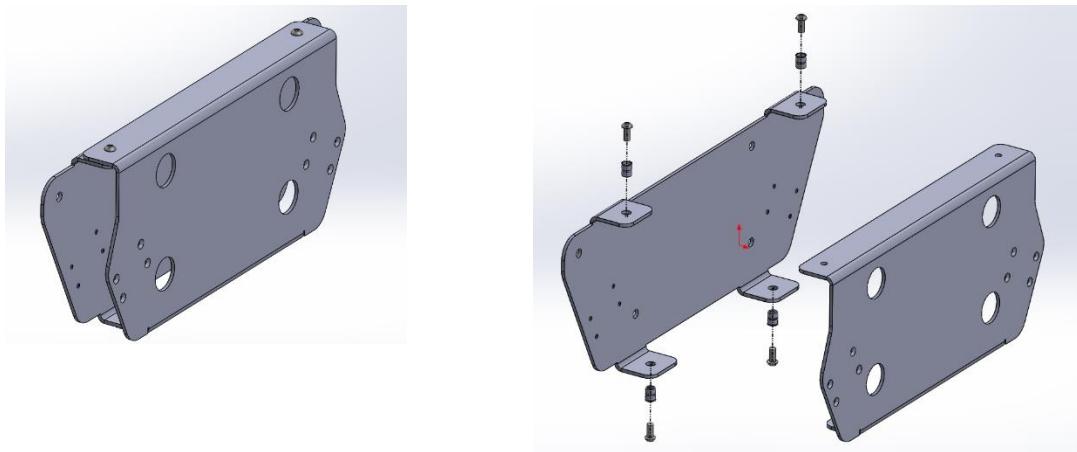


Figure 4.9 Vues du support en tôles boulonnées du châssis central

L'avantage de cette configuration est le faible coût de production et la facilité de maintenance. L'assemblage complet est constitué de 4 pièces de métal plié différentes dont une des pièces ne nécessite aucun pliage. Puisque toutes les pièces sont assemblées par vis et inserts, chacune des pièces est interchangeable individuellement, ce qui réduit les coûts de maintenance.

4.3.2.3 Alternative #2 : Tôles d'aluminium soudées

La seconde configuration est un assemblage de tôles soudées. L'assemblage du bras chenillé consiste à deux tôles de gabarit 14 ayant des rebords pliés, à 90 degrés, jointes par un cordon de soudure. Cette configuration utilise les mêmes roulements à billes que la configuration précédente insérée de part et d'autre du support de bras chenillé. Le support central est identique à celui de la configuration 1 à l'exception que les deux tôles sont jointes par un cordon de soudure.

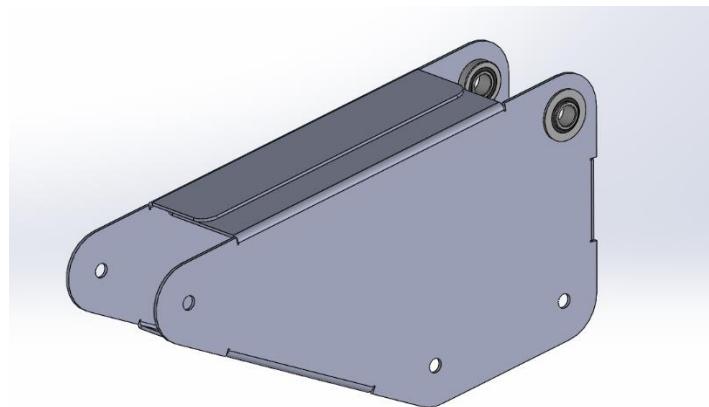


Figure 4.10 Vues du support en tôles soudées

Cette configuration présente potentiellement de meilleures performances en résistance que la première configuration. Les composants du système sont tous aussi protégés dû à la géométrie des supports. De plus, l'assemblage complet comporte seulement que 4 tôles pliées différentes, ce qui facilite la première étape de fabrication. À moins que la soudure soit faite au sein du club Capra, le coût est plus élevé puisqu'elle nécessite l'expertise d'un soudeur. Le coût de réparation est plus élevé aussi puisque le support complet doit être changé en cas d'endommagement. De plus l'accès aux composants peut être plus difficile puisque l'assemblage n'est pas démontable.

4.3.2.5 Alternative #3 : Blocs d'aluminium usinés boulonnés

La dernière configuration de ce module est un assemblage sur un bloc usiné. Le support du bras chenillé est un bloc d'aluminium usiné où huit roulements à billes sont insérés de chaque côté. Cette géométrie pour le bras chenillé nécessite l'utilisation de différents types de roues puisque le support est situé au milieu de l'assemblage. Donc, des roues de part et d'autre du support sont nécessaire au bon fonctionnement du bras chenillé. Le bras chenillé est présenté à la figure suivante.

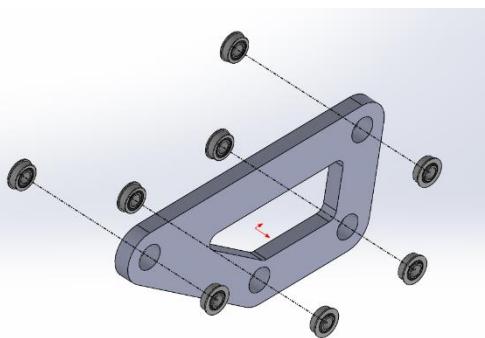


Figure 4.11 Vues du support usiné en bloc

Le support central est un assemblage de tôle plié et d'un bloc usiné. Le bloc usiné sert de fixation au robot et de support aux roues et bras chenillés utilisant des roulements à billes. Les tôles centrales sont assemblées au bloc d'aluminium avec des vis M6 dans des trous taraudés. La tôle du dessus qui fait office de couvert est assemblé avec des vis M6 et inserts. Les tôles sont de l'aluminium de 1/8 d'épais. Les figures suivantes présentent le support central de la troisième configuration.

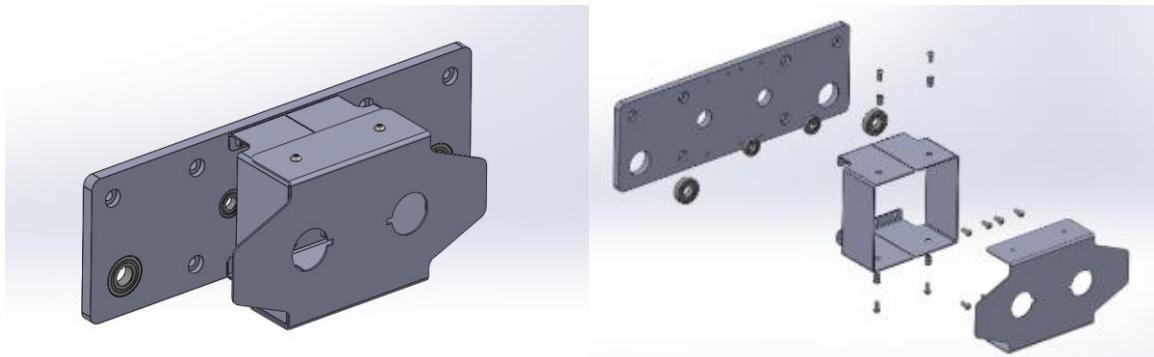


Figure 4.12 Vues du support usiné en bloc du châssis central

Le bloc d'aluminium servant de fixation assure une rigidité à l'assemblage et une résistance accrue au système. L'usinage de cette pièce n'est pas nécessairement dispendieux puisque qu'elle nécessite que de simples opérations. Les pièces sont accessibles et protégées par les tôles démontables.

4.3.3 Choix de la configuration

Les différentes configurations présentent des avantages et inconvénients, donc un barème est érigé pour comparer celles-ci et déterminer la meilleure configuration. Les fonctions les plus importantes pour ce module sont la résistance et le prix. Le tableau ci-dessous présente un barème comparant les configurations où des cotes de 1 à 3 ont été attribué.

Tableau 4.6 Évaluation des configurations du module de support

Fonction	Pondération (%)	Tôles boulonnées	Tôles soudées	Bloc usinés
Le corps du mécanisme...				
est léger	15	2	3	2
est résistant et rigide	25	2	3	3
est peu couteux	30	3	1	1
est esthétique	2.5	2	3	3
protège les transmissions	15	3	3	3
est simple à assembler	12.5	2	3	3
Pointage :		245	240	225

La configuration 1 est donc la meilleure pour l'application au robot Capra. Elle représente un compromis entre le coût et la résistance, cependant le coût était le facteur déterminant par rapport aux autres options.

5 Design paramétrique

Cette section présente les comparaisons chiffrées de différents éléments afin de choisir de façon objective les meilleures solutions qui répondent à des critères précis. Les solutions sont raffinées et optimisées en fonction des critères donnés.

5.1 Arbre principal

L'arbre principal est une pièce importante de ce système de propulsion. En effet, celui-ci doit dans un premier temps transmettre le mouvement de rotation du moteur en passant par un système d'engrenage et de chaîne vers la roue dentée entraînant la chenille et la roue se trouvant au bout de l'arbre. Dans un deuxième temps, l'arbre doit alors supporter au poids du robot ainsi qu'aux forces transmises par l'engrenages. De plus, le dimensionnement de l'arbre doit être effectué en fonction d'un facteur de sécurité minimal de 1.5 afin d'assurer une transmission du mouvement sécuritaire.

5.1.1 Fonctions et caractéristiques

Afin de permettre au tout de fonctionner, l'arbre doit :

- Transmettre un couple moteur maximal de 40Nm ;
- Supporter le poids complet du robot à travers le levier (50kg) ;
- Supporter les 4 roulements à billes pour faire le lien entre le levier et le châssis ;
- Avoir un facteur de sécurité en fatigue minimal de 1.25 (sous les pires conditions) ;
- Avoir un facteur de sécurité en statique minimal de 1.25 (en condition d'opération normales).

La figure suivante illustre chacune des forces ressenties dans l'arbre (en étant appuyé soit sur la chenille ou la roue).

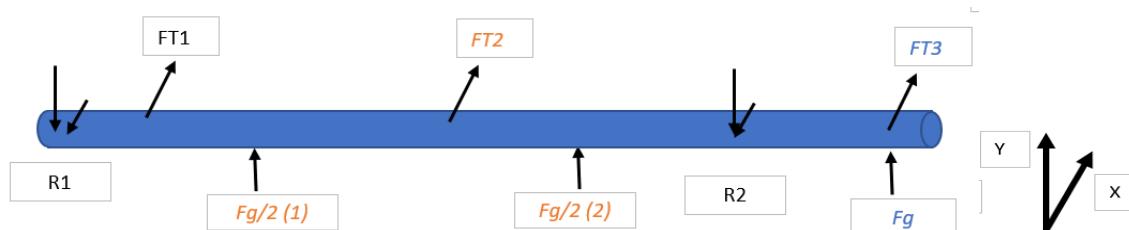


Figure 5.1 DCL de l'arbre principal

Chacune des forces illustrées sur la figure ci-dessus sont alors présentées :

- R1 et R2 sont les réactions engendrées sur les roulements à billes ;
- FT1/FT2/FT3 sont les forces de réactions engendrées par le moteur ;
- Fg est la force générée par le poids du robot lorsqu'il est soit appuyé sur la roue ou la chenille :
 - Lorsque le robot est appuyé sur la chenille, son poids est alors réparti sur deux roulements qui soutiennent la roue d'entraînement de la chenille.

Les paramètres de design sont regroupés ci-dessous.

Tableau 5.1 Paramètres de l'arbre principal

Paramètre	Symbole	Unités	Limite inf.	Limite sup.
Masse du robot	m	kg	50	-
Moment transmis	M	Nm	-40	40
Facteur de sécurité en fatigue, avec le chargement usuel pour une durée de vie infinie.	FS _E	-	1.25	-
Facteur de sécurité en statique, au chargement maximum.	FS _S	-	1.25	-
Coût	C	\$	-	100

Le tableau ci-dessus permet d'observer chaque paramètre de design qui est préétablies et pris en compte lors de calcul. On peut observer alors le poids du robot déjà existant de 50kg, le moment transmis du moteur sélectionné qui varie entre -40 Nm et 40 Nm (Recule/Avance). Les facteurs de sécurité ont été établies minimalement à 1.25. Cette estimation a été déterminé en fonction de nos expériences précédentes et nous permet d'avoir une utilisation de l'arbre qui est sécuritaire. Finalement, le coût maximal de l'arbre ne devra pas dépasser 100\$. Ce prix est établi en fonction des comparables qu'on retrouve sur le marché.

Tableau 5.2 Variables de design de l'arbre principal

Paramètre	Symbol	Unités	Limite inf.	Limite sup.
Diamètre de l'arbre	D	po	-	1
Limite d'élasticité	σ_Y	MPa	-	-
Résistance mécanique	σ_{UT}	MPa	-	-

Le tableau ci-dessus présente alors les variables de design que nous allons alors faire varier lors des calculs. Le diamètre maximal de l'arbre est établi à un pouce étant donné qu'une dimension supérieure à celle-ci viendrait compromettre l'assemblage en entier dû au manque d'espace pour loger un arbre de cette dimension. Pour ce qui est de la contrainte d'écoulement et ultime, celle-ci variera en fonction du matériel utilisé et n'ont pas de limite.

5.1.2 Méthodologie

Afin de pouvoir dimensionner l'arbre correctement en fonction de chacune des forces exercées sur celui-ci, il est nécessaire d'effectuer plusieurs calculs différents permettant de prendre en compte chacune des contraintes ressenties.

La stratégie employée est listée ci-dessous :

- Évaluer l'effort tranchant et le moment fléchissant maximal ressenties dans l'arbre pour un chargement sur la chenille et sur la roue ;
- Calculer les cas critiques qui engendrent les contraintes internes maximales ;
- Récolter les propriétés mécaniques de différents types de matériau utilisé dans la fabrication d'arbre de transmission de puissance ;
- Calculer un diamètre d'arbre résistant en fatigue et en statique selon les différents matériaux ;
- Sélectionner l'arbre le moins coûteux qui respectera les paramètres de design.

5.1.3 Résolution

Dans un premier temps, en fonction des forces exercées par le poids du robot, par le moteur et chacun des points d'appuis, il fut possible de déterminer l'effort tranchant et moment fléchissant maximale ainsi que leur point d'application à l'aide de diagramme de V et M. L'effort tranchant et le moment fléchissant ressentie dans l'axe des X et l'axe des Y ont alors été combinée afin de pouvoir produire les diagrammes des forces combinées ci-dessous.

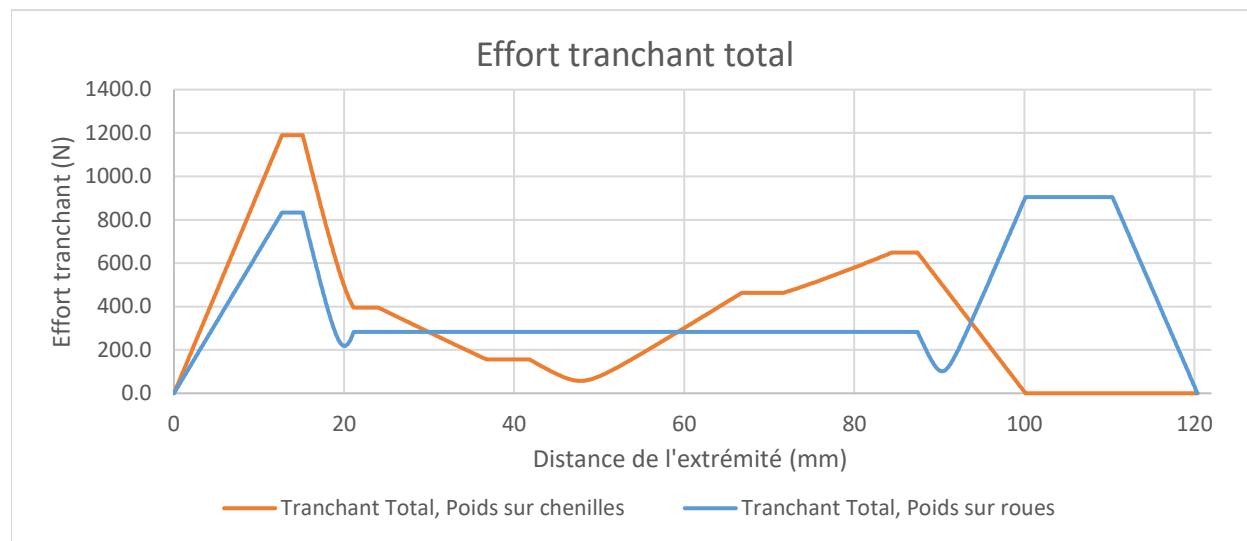


Figure 5.2 Diagramme de l'effort tranchant total au pire cas dans l'arbre principal

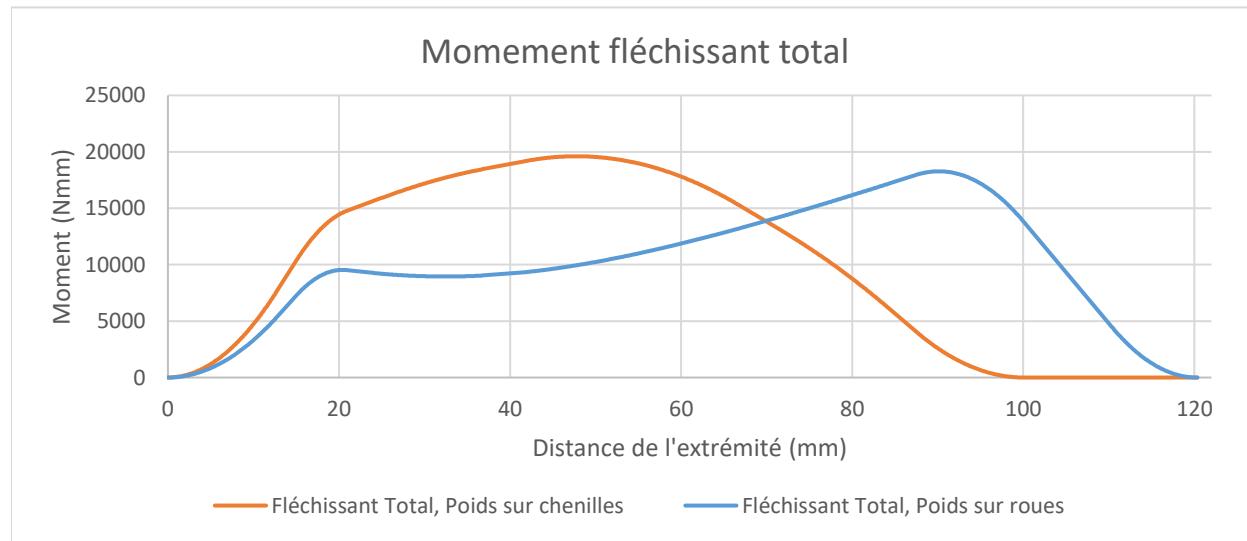


Figure 5.3 Diagramme du moment fléchissant total au pire cas dans l'arbre principal

Par la suite, en consultant différents fournisseur d'arbre rotatif en plus de l'application de nos connaissances acquises lors de nos expériences de travail, nous avons pu alors déterminer les matériaux standards utilisés dans l'industrie pour produire des produits similaires. Le tableau suivant illustre alors ces matériaux ainsi que leurs propriétés mécaniques déterminées à l'aide du site MatWeb.

Tableau 5.3 Propriétés mécanique de matériaux pour les arbres de transmission

Matériel	Acier 1045 cold rolled	Acier 4140	Acier 4340	Acier inoxydable 304
Limite élastique σ_y (MPa)	625	655	745	505
Résistance mécanique σ_{UT} (MPa)	530	415	470	215

À l'aide de ces propriétés et des contraintes maximales ressenties dans l'arbre, il fut possible de déterminer un diamètre d'arbre permettant de répondre aux variables de design établies tout en résistant à ces contraintes en statique et en fatigue.

Concernant les calculs en statique, nous avons employé l'approche du code ASME qui nous permet d'établir un diamètre grossier qui est basée sur le critère de Tresca. Ce diamètre grossier permet sera utilisé pour les certains facteurs de taille du calcul de résistance en fatigue afin d'établir le diamètre minimal afin de résister aux contraintes.

Lors du calcul de résistance en fatigue, nous avons alors utilisé la méthode de Von Mises-Hencky Goodman afin de pouvoir déterminer le diamètre en fonction du facteur de sécurité voulu. Les calculs ont été effectué en fonction d'une durée de vie infinie.

Après ces étapes, une analyse par éléments finis a été effectuée afin de confirmer les données dans ANSYS Workbench. Cette analyse est disponible à l'**Error! Reference source not found..**

5.1.4 Choix de la solution

Le tableau suivant illustre les différents diamètres obtenus en fonction des matériaux utilisés. Chaque design potentiel est accompagné de son facteur de sécurité en fatigue et en statique, son coût unitaire, son diamètre ainsi que le matériel à partir duquel il sera fabriqué. Seulement les trois designs les plus prometteurs sont présentés.

Tableau 5.4 Résultats des différents arbres proposés

Paramètre/Critère	Unités	Design 1	Design 2	Design 3
Facteur de sécurité en fatigue, avec le chargement usuel pour une durée de vie infinie.	-	1.71	1.77	1.96
Facteur de sécurité en statique, au chargement maximum.	-	5.30	4.15	4.70
Coût	\$	40	80	100
Diamètre de l'arbre	po (mm)	0.750 (19.05)	0.750 (19.05)	0.750 (19.05)
Matériau	-	Acier 1045	Acier 4140	Acier 4340
Limite d'élasticité	MPa	530	415	470
Résistance mécanique	MPa	625	655	745

L'acier 1045 est beaucoup plus avantageux que les autres matériaux puisqu'il est très commun et possède des caractéristiques similaires. D'ailleurs, les autres matériaux ne permettent pas de réduire la taille de l'arbre (au diamètre standard inférieur) tout en respectant les critères de sécurité et n'offrent pas des facteurs de sécurité beaucoup plus avantageux sans traitements thermiques.

5.2 Plaques de levier

Les plaques de levier sont une des parties importantes de structure et elles sont soumises à différents chargements. Elles doivent être à la fois résistantes et légères puisqu'elles doivent supporter la masse du robot ainsi que des chocs. De plus, la masse doit être au minimum pour diminuer l'effort du moteur servant à la rotation du levier.

5.2.1 Fonctions et caractéristiques

Afin de permettre au tout de fonctionner, les plaques doivent :

- Supporter les deux côtés de l'arbre principal ;
- Supporter le poids complet du robot à travers le levier (50 kg) ;
- Résister aux forces axiales de la vis sans fin lorsque le levier soulève le robot ;
- Résister en fatigue et en statique considérant un facteur de sécurité de 2.

On s'assure de la résistance des plaques de levier en imposant un facteur de sécurité minimal de 2. Le robot est appelé à parcourir des terrains très difficiles. De plus, on considère que le poids total du robot peut se retrouver supporté par un bras. La partie la plus sollicitée est le point d'ancrage du moteur de rotation puisqu'il doit contrer le moment du poids du robot réparti sur les points d'appui.

Les paramètres de design sont regroupés ci-dessous.

Tableau 5.5 Paramètres des plaques du levier

Paramètre	Symbol	Unités	Limite inf.	Limite sup.
Masse du robot	m_{Robot}	kg	50	-
Facteur de sécurité en statique	FS	-	2	-
Masse des plaques	$m_{Plaques}$	kg	-	2
Coût	C	\$	-	200

Les plaques de levier peuvent varier principalement par leur épaisseur, leur géométrie ou leur matériau. La géométrie, dans ce cas-ci, est aussi une variable puisqu'une analyse topologique sera performée avant l'analyse par éléments finis, cependant, elle n'est pas chiffrable.

Les variables de design sont dans le tableau ci-dessous.

Tableau 5.6 Variables de design des plaques du levier

Paramètre	Symbol	Unités	Limite inf.	Limite sup.
Épaisseur des plaques intermédiaires	e_{med}	po	$^{1/16}$	$^{1/4}$
Épaisseur de la plaque intérieure	e_{int}	po	$^{1/8}$	$^{1/4}$
Épaisseur de la plaque extérieure	e_{ext}	po	$^{1/8}$	$^{3/8}$

Limite d'élasticité	σ_Y	MPa	-	-
Résistance mécanique	σ_{UT}	MPa	-	-

5.2.2 Méthodologie

Afin de dimensionner les plaques, les possibilités de cas de chargement doivent être déterminés. Les cas de chargement diffèrent par les points d'appui imposés au modèle et les forces impliquées sur le modèle. Ensuite, la géométrie des plaques est optimisée à l'aide d'un logiciel d'optimisation topologique, tel qu'Inspire de Altair. L'optimisation est orientée pour minimiser la masse des plaques tout en résistant aux forces engendrées. Finalement, la géométrie optimisée est analysée à l'aide d'un logiciel par éléments finis, ANSYS Workbench.

La liste des étapes de résolution est présentée ci-dessous :

- Trouver des cas de chargement ;
- Optimiser la géométrie dans Inspire selon les cas de chargements ;
- Apporter les modifications suggérées par la géométrie optimisée à la pièce initiale ;
- Analyser dans ANSYS les cas de chargement sur un modèle de la pièce améliorée ;
- Choisir un matériau et épaisseur standard parmi les configurations testées.

5.2.3 Résolution

La figure ci-contre présente la pièce à son état initial. Le corps des plaques est laissé plein pour donner plus de flexibilité au logiciel d'optimisation.

La pièce est analysée sous 5 cas de chargement différent. Ces cas représentent toutes les possibilités d'appuis, selon la rotation, que le levier peut avoir. L'analyse se base sur le pire scénario où le poids du robot est entièrement supporté par un levier. Le poids du robot est de 50 kg. Les supports analysés sur le levier sont présentés ci-dessous et les cas de chargement sont listés au Tableau 5.7.

Tableau 5.7 Cas de chargement pour l'analyse du levier

Cas de chargement	Appuis	Force (N)	Angle θ ($^{\circ}$)
1	2	445.3	0
2	1, 2	445.3	30
3	2	445.3	45
4	2, 3	445.3	90
5	4	445.3	30
Tous combinés	-	-	-

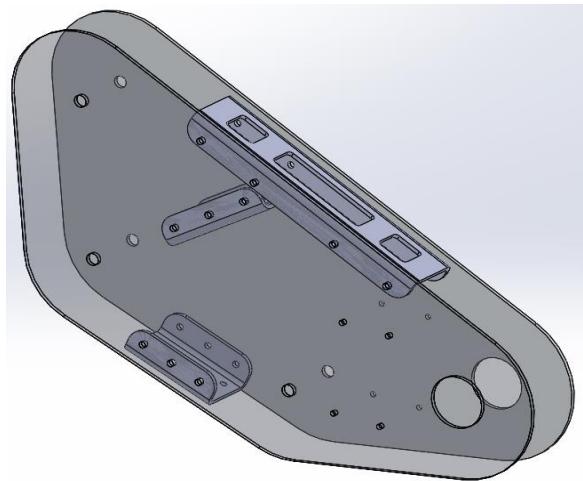


Figure 5.4 Géométrie initiale des plaques

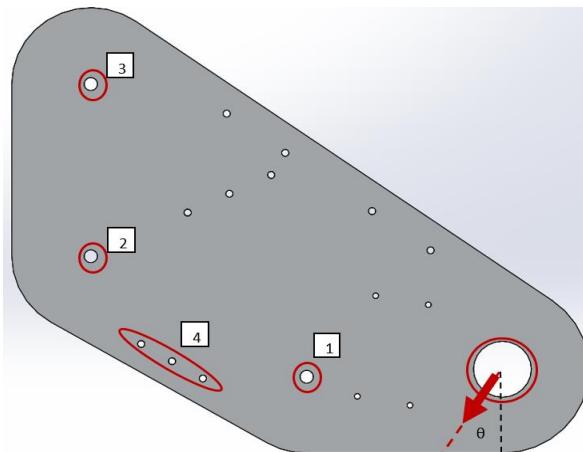


Figure 5.5 Supports possible pour le levier

Le but de l'analyse topologique dans notre cas est de diminuer la masse des plaques tout en gardant une résistance aux efforts convenable. L'optimisation tient compte donc d'un facteur de sécurité. Pour ce cas-ci, le facteur de sécurité visé est de 2, ce qui pour le projet est considéré convenable. La Figure 5.6 présente les résultats différentes optimisations faites à l'aide du logiciel Inspire.

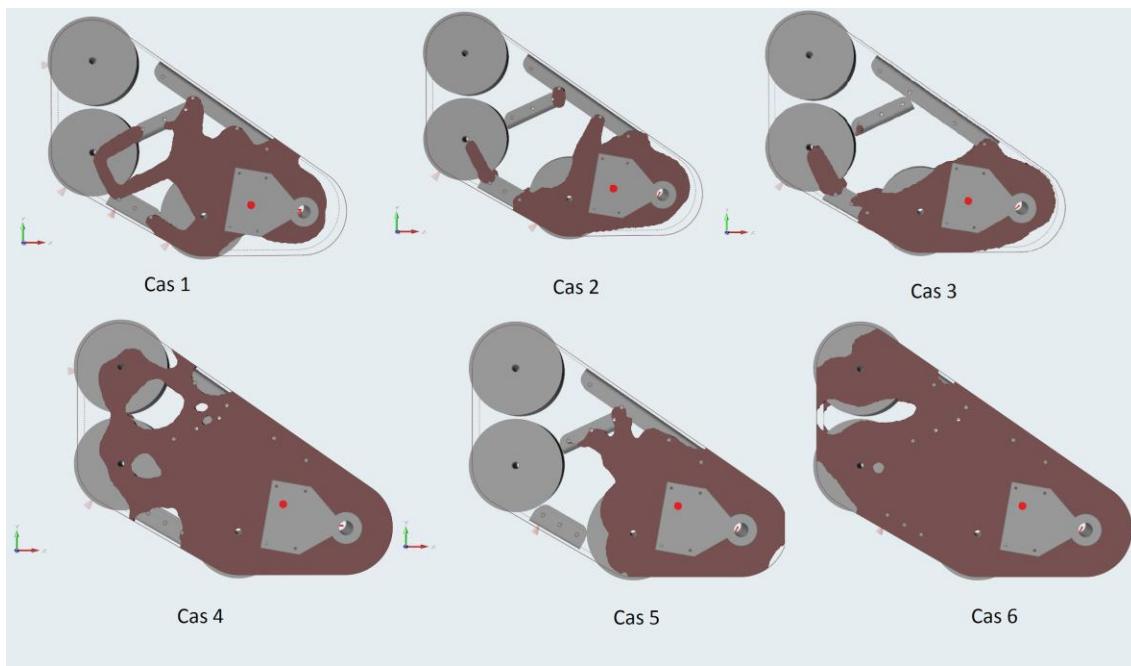


Figure 5.6 Résultats des différentes optimisations topologiques

Ensuite, les géométries sont utilisées pour remodeler la géométrie de la pièce initiale. Les fichiers STL sont donc utilisés dans SolidWorks comme guide. La figure ci-dessous est une des optimisations possibles.

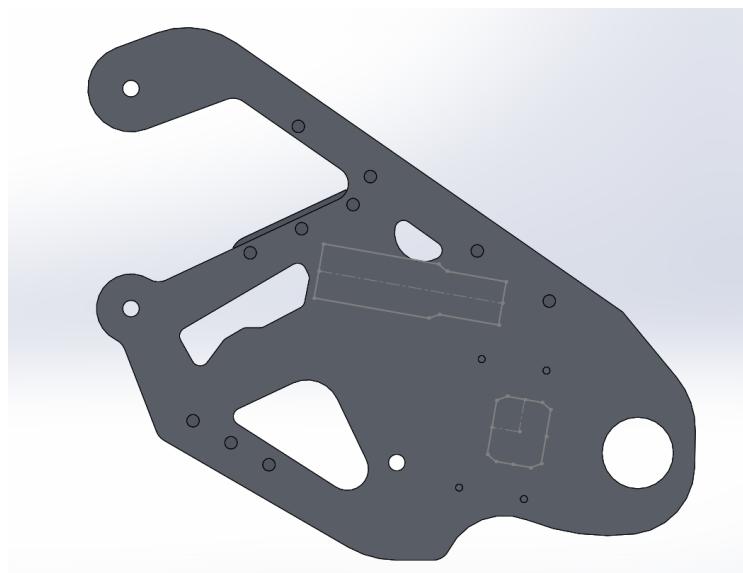


Figure 5.7 Plaque optimisée

La pièce est analysée par la suite sur un logiciel d'analyse par éléments finis, dans ce cas ANSYS Workbench 19.2. Les supports au niveau des roues sont des supports cylindriques où la rotation est libre, les supports aux moteurs sont des supports cylindre où la rotation est fixe et la force appliquée est une force cylindrique. Les plaques sont assemblées à l'aide de modèle de rivet simple. Après simulation des cas de chargements, deux zones présentent des contraintes maximales. Ces zones sont identifiées sur la figure suivante.

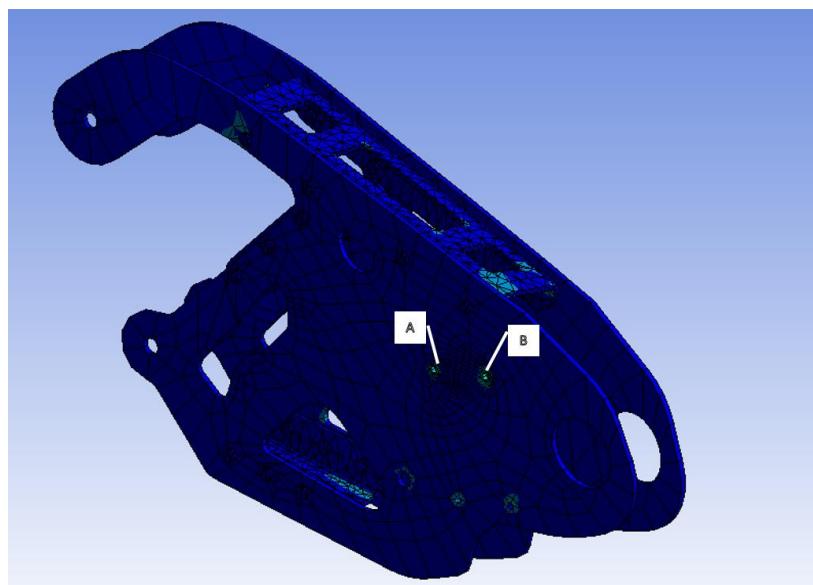


Figure 5.8 Répartition des contraintes sur les plaques

Les deux zones les plus critiques sont des zones où le moteur permettant la rotation du levier est ancré. En effet, le moteur doit contrer le moment du poids du robot aux appuis. Donc, l'effort que le moteur doit contrer se répercute aux points d'ancrage de celui-ci.

Suite à cette analyse, deux épaisseurs de plaques sont comparées. La première configuration utilise des plaques de 1/8 pouce et la deuxième utilise des plaques de 1/4 pouce. Les deux zones critiques sont sondées par les sondes A et B. Le tableau ci-dessous présente les contraintes sondées pour les deux itérations. L'endroit des zones A et B ont été trouvés par convergence. Les zones sont trouvées par affichage de la contrainte maximale, ensuite un dimensionnement des éléments finis est imposé et on réajuste les coordonnées des zones les plus à risque.

Tableau 5.8 Contraintes résultantes pour les deux configurations

Cas	Angle (°)	Itération 1		Itération 2	
		Sonde A (Mpa)	Sonde B (Mpa)	Sonde A (Mpa)	Sonde B (Mpa)
1	0	254.5	191.1	110.9	129.4
2	30	192.0	218.6	90.2	119.8
3	45	110.8	243.1	74.4	121.0
4	90	208.8	168.4	62.3	53.8
5	30	43.6	60.9	39.2	32.8

Les leviers seront soumis à beaucoup de chocs durant leurs opérations. Sur des terrains accidentés, la force appliquée aux leviers peut s'apparenter à une charge cyclique. De plus, lors de l'utilisation, le levier pourrait faire plusieurs rotations pour gravir des obstacles. Donc, l'analyse du facteur de sécurité est considérée en fatigue. Le graphique ci-dessous présente l'évolution des contraintes sur 2 cycles. Le cycle analysé est composé des cas de chargement analysés précédemment classés en ordre croissant ; 1-2-3-4-5-1-2-3-4-5.

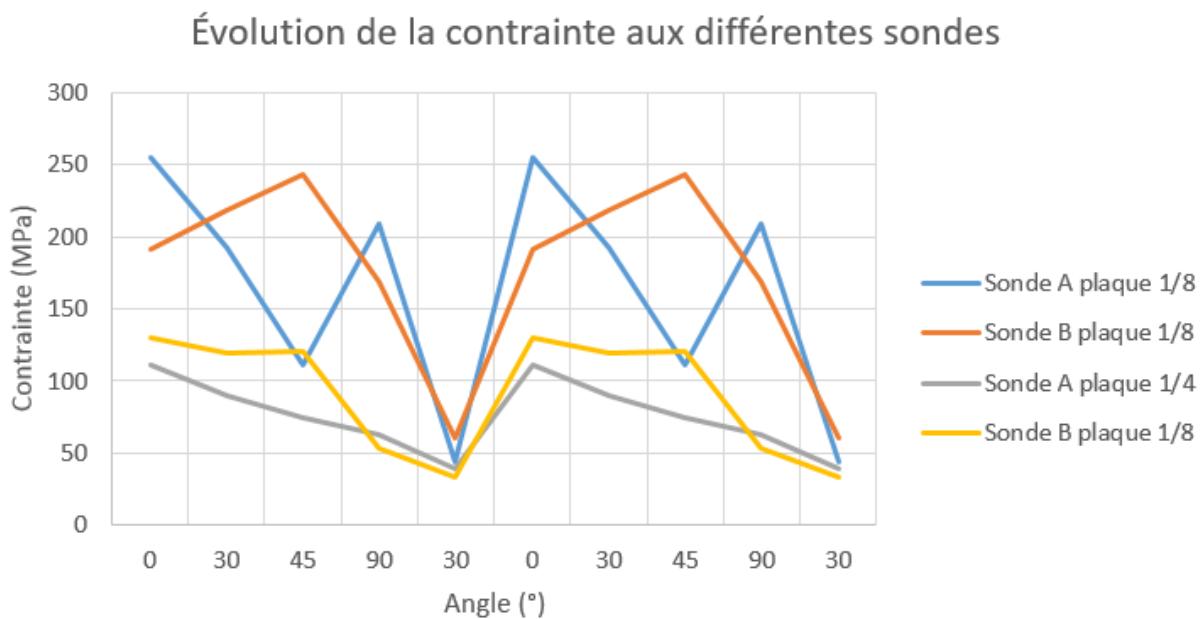


Figure 5.9 Cycle des contraintes sur les plaques de levier

Les calculs de fatigue sont présentés en détail à l'Annexe G, les facteurs de sécurité résultants sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 5.9 Facteurs de sécurité aux zones critiques pour les deux configurations

	Sonde			
	A-2	B-2	A-1	B-1
FS	2.29	1.84	0.89	0.98

5.2.4 Choix de la solution

Le tableau ci-dessous présente les différents paramètres pour les deux configurations analysées.

Tableau 5.10 Résultats des différentes plaques proposés

Paramètre/Critère	Unités	Design 1	Design 2
Facteur de sécurité	-	0.89	1.84
Coût	\$	112.44	184.13
Épaisseur des plaques intermédiaires	po	1/8	1/8
Épaisseur de la plaque intérieure	po	1/8	1/4
Épaisseur de la plaque extérieure	po	1/8	1/4
Matériaux	-	Aluminium 2024 T6	Aluminium 2024 T6
Masse	kg	0.788	1.576

Le coût est estimé par les coûts relatifs de McMaster-Carr. Les dimensions extrêmes des plaques sont de 440mm par 203mm, donc on peut fabriquer deux plaques de levier par feuille de 18 pouces par 18 pouces. Donc, coûts sont ceux pour des feuilles de 18" x 18" pour $\frac{1}{8}$ " et $\frac{1}{4}$ ". La deuxième configuration présente un meilleur facteur de sécurité et il est très près du facteur recherché. Cependant, on remarque que les contraintes maximales sont concentrées aux points d'ancrage du moteur et le reste de la structure et peu affectées. Donc, la recommandation est d'utiliser des plaques d'aluminium 2024 de $\frac{1}{8}$ de pouce et de renforcer la zone d'ancrage du moteur. Une option pourrait être de grossir la taille des vis utilisées ou de doubler la plaque à cet endroit spécifique.

5.3 Chaines

Le choix de la configuration du module de la transmission du mouvement d'avance s'est arrêté sur un système par chaîne et engrenages. Il faut maintenant optimiser le choix des composants de ce système. Le système sera soumis à des conditions difficiles où il peut y avoir des chocs sévères puisque le robot devra parcourir des terrains accidentés.

5.3.1 Fonctions et caractéristiques

Les fonctions primordiales sur lesquels repose le choix des composants sont listés ci-dessous :

- Être résistant.
- Être de petite taille.
- Avoir un risque de bris minimal.
- Être peu dispendieux

La résistance est un point important puisque les conditions d'utilisation sont difficiles. Et à cause de la manière dont le moteur et le système sont placé sur le châssis, il est important que le système de transmission soit de petite taille puisque les roues et les bras chenillés doivent être le moins déportées possible du centre du robot. Le coût aussi est un facteur important pour que le projet entier soit réalisable.

Les paramètres de design sont regroupés ci-dessous.

Tableau 5.11 Paramètres de la transmission par chaîne

Paramètre	Symbol	Unités	Limite inf.	Limite sup.
Couple à transmettre	M	Nm	40	-
Puissance à transmettre	P	W	347	-
Diamètre primitif	d _{ext}	mm	-	100
Épaisseur de la transmission	e	mm	-	19
Facteur de sécurité	FS	-	1.25	-
Coût	C	\$	-	200
Entraxe en maillons	C _m	-	30	50

Les variables de design sont dans le tableau ci-dessous.

Tableau 5.12 Variables de design de la transmission par chaîne

Paramètre	Symbol	Unités	Limite inf.	Limite sup.
Taille de la chaîne	a	-	-	-
Nombre de rangs	n	-	1	-
Nombre de dents de la roue dentée menée	n _{driven}	-	13	-
Nombre de dents de la roue dentée menante	n _{driving}	-	13	-
Entraxe entre les roues dentées	C _d	mm	-	-

5.3.2 Méthodologie

Les étapes pour la résolution de ce système sont basées sur les étapes de résolution de problème du cours d'éléments de machines, MEC528, sur les chaînes. Les étapes sont présentées ci-dessous :

- Déterminer la puissance effective ;
- Choix de type de chaînes ;
- Déterminer le nombre de dents pignon moteur ;
- Déterminer le nombre de dents roue entraînée ;
- Déterminer la longueur de la chaîne ;
- Vérifier l'angle d'enroulement ;
- Vérifier la résistance de la chaîne.

5.3.3 Résolution

Premièrement, il faut estimer la vitesse de rotation du moteur. Sachant que la vitesse voulue est de 1,3m/s et que les roues sélectionnées pour la conception préliminaire sont de 10 pouces, on obtient une vitesse de 100 RPM. De plus, le facteur de service est déterminé par les conditions d'utilisation du système. Pour ce cas, les critères sont :

- Moteur électrique
- Machine générale à chocs sévères
- Renversement de la charge
- Conditions difficiles

En utilisant le tableau 15.9¹, le facteur de service est de 1.5. Ensuite, le type de chaîne est choisi en fonction de la puissance effective, qui est de 525W, à l'aide du tableau 15.13¹. Trois types de chaînes peuvent être utilisées : #40-1, #35-2 et #35-3. Le reste de la démarche découle du choix de la chaîne #40-1.

Par la suite, on détermine le nombre de dents du pignon en fonction de la puissance effective en considérant un facteur de nombre de rang. Dans le cas de la chaîne #40-1, le facteur est de 1. Le nombre de dents, qui s'obtient avec le tableau 15.1¹, est de 18. Le nombre de dents pour la roue est le même puisque le rapport de vitesse entre la roue et le pignon est de 1.

La longueur de la chaîne est ensuite calculée. L'entraxe entre les engrenages est de 130mm sur la conception préliminaire. De plus, on connaît le pas de la chaîne qui est de 0,5 pouce, 12.7mm. Ce qui donne une longueur de 493.68mm. En maillon, ceci représente 38.87. Cependant, il est préférable d'obtenir une longueur paire par maillon. Donc, on obtient une longueur par maillon de 40. La longueur est donc ajustée à 508mm.

Ensuite, on ajuste l'entraxe. L'entraxe par maillon est de 11 avec les paramètres initiaux. Cependant, il est préférable d'obtenir un entraxe par maillon entre 30 et 50. Pour des raisons d'espace disponible sur le châssis, l'entraxe ne peut dépasser 200mm. Donc, le compromis est d'utiliser un entraxe par maillon de 15, ce qui donne un entraxe de 190,5mm. La longueur de la chaîne devient alors de 609.6mm. Par la suite, on vérifie l'angle d'enroulement. Celui-ci est de 180 puisque la roue et le pignon sont de mêmes grandeurs.

Finalement, on vérifie la résistance de la chaîne. La force de rupture est évaluée en considérant le pas de la chaîne, la force transmise est évaluée par la puissance transmise et la vitesse de la chaîne. Pour la chaîne #40-1, on obtient un facteur de sécurité de 15.9. Donc, on élimine presque tout risque de défaillance.

La totalité des calculs et de la démarche se retrouve à l'Annexe H.

¹ Drouin et Al, Éléments de machine, Polytechniques, 1986

5.3.4 Choix de la solution

Ci-dessous, un tableau comparatif présente les différentes configurations pour les choix de chaînes.

Tableau 5.13 Résultats des différentes chaînes proposés

Paramètre/Critère	Unités	Design 1	Design 2	Design 3
Facteur de sécurité	-	15.1	7.4	5.0
Coût	\$	14.82	27.50	41.34
Type de chaîne	-	ANSI Roller chain #40-1	ANSI Roller chain #35-2	ANSI Roller chain #35-3
Taille de la chaîne	-	16.4	22.2	32.23
Nombre de rangs	-	1	2	3
Nombre de dents de la roue dentée menée	-	18	21	14
Nombre de dents de la roue dentée menante	-	18	21	14
Diamètre primitif	mm	72.8	63.7	42.4
Longueur de chaîne	mm	508	476.25	400.05
Entraxe en maillons	-	15	20	20

La configuration la plus prometteuse est la première. En plus de présenter un facteur de sécurité plus élevé, le coût de cette chaîne est de loin le moins dispendieux. L'évaluation des coûts est estimée à l'aide de prix fournis par Applied Industrial Technologies. De plus, elle est la seule chaîne qui respecte la limite d'épaisseur de chaîne. Cette contrainte est importante du à la géométrie du châssis. Le seul inconvénient est l'entraxe en maillon. Il est recommandé d'être entre 30 et 50. Ceci représente le seul compromis du au confinement de la transmission

6 Analyse cinématique

Cette section présente les éléments cinématiques du module ainsi que les contraintes spatiales imposées par leurs trajectoires. La cinématique du produit se distingue en deux groupes de mouvement plutôt distincts ; le mouvement d'avance ainsi que le mouvement de levier.

6.1 Liens, articulations et commandes du mécanisme

Ci-dessous, les liens, articulations et commandes sont illustrés pour chacun les deux groupes prédéterminés. La cinématique de l'avance est présentée en premier.

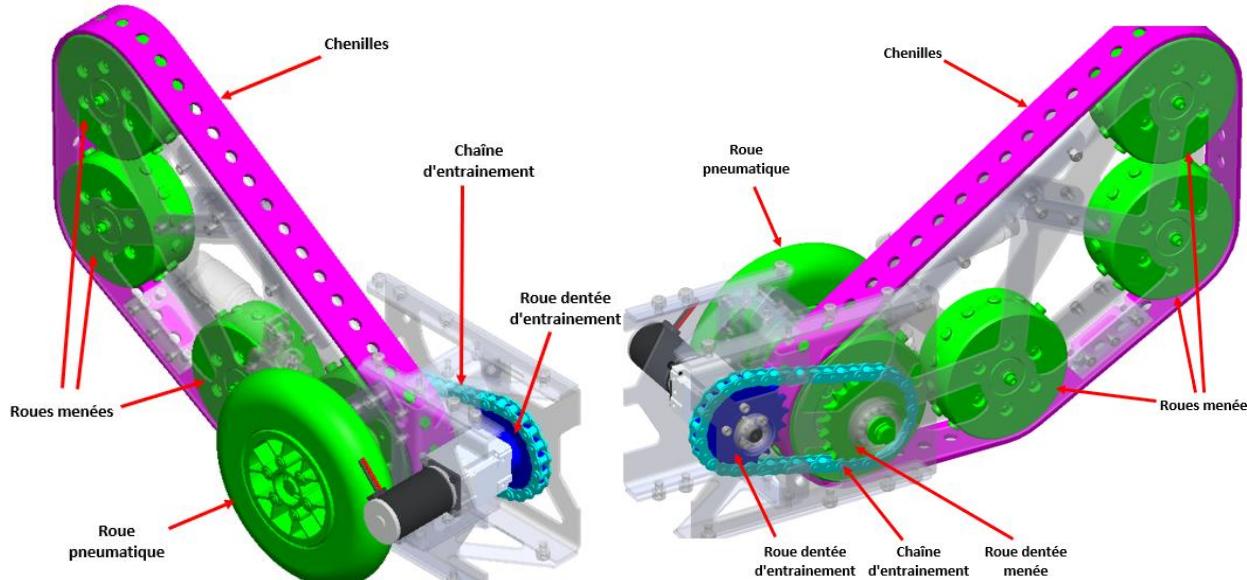


Figure 6.1 Cinématique de l'avance

La description des articulations est ci-dessous.

Tableau 6.1 Articulations de la cinématique de l'avance

Liaison		Articulation	Description
Châssis	Roue dentée d'entraînement	Pivot (1DDL)	Le châssis (partie fixe du moteur d'avance) a un relation pivot avec l'arbre du moteur. Ce dernier a une liaison rigide avec la roue dentée d'entraînement.
Roue dentée d'entraînement	Chaîne d'entraînement (maillon)	Chaîne (1DDL)	La roue dentée entraîne la chaîne.
Chaîne d'entraînement (maillon)	Roue dentée menée, Arbre principal, Roue d'entraînement et Roue pneumatique	Chaîne (1DDL)	La chaîne entraîne la roue dentée qui est fixée sur l'arbre principal, qui comprend aussi la roue pneumatique ainsi que la roue d'entraînement pour la chenille.
Roue d'entraînement	Chenilles	Chaîne (1DDL)	La roue d'entraînement entraîne la chenille.
Chenilles	Roues menée	Chaîne (1DDL)	La chenille fait tourner les roues menées avec elle.
Châssis	Roue dentée menée, Arbre principal, Roue d'entraînement et Roue pneumatique	Pivot (1DDL)	L'arbre possède une liaison pivot avec le châssis.
Châssis	Roues menée	Pivot (1DDL)	Les roues menées possèdent une liaison pivot avec le châssis. (Ici le levier est considéré comme statique pour séparer l'avance du levier)

Le nombre de DDL pour la cinématique de l'avance se calcule comme suit :

$$M = \text{Nombre de commandes nécessaires}$$

$$M = 3(n - 1) - 2f_1 - f_2 \quad \text{où}$$

n = Nombre total d'assemblages mobiles
(incluant le châssis)

f_1 = Nombre d'articulations à un DDL

f_2 = Nombre d'articulations à 2 DDL

$$M = 3(6 - 1) - 2 \cdot 7 - 0 ; M = 1$$

Figure 6.2 Calculs de la cinématique de l'avance

Un seul moteur est suffisant pour faire tourner le système d'avance, si l'on considère le levier comme fixe.

Les liens de la cinématique du levier sont présentés ci-dessous.

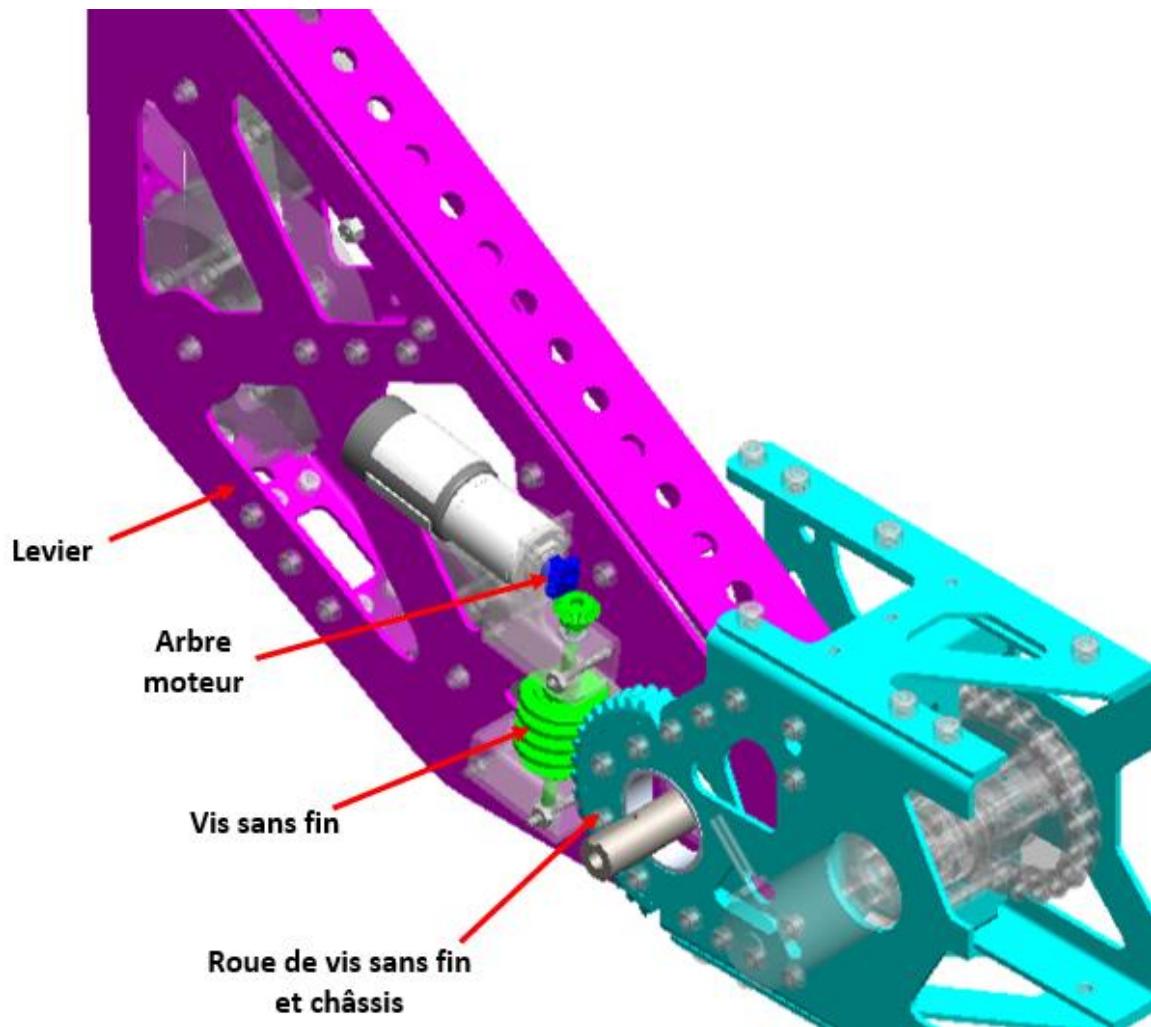


Figure 6.3 Cinématique du levier

La description des articulations est ci-dessous.

Tableau 6.2 Articulations de la cinématique du levier

Liaison		Articulation	Description
Roue de vis sans fin et châssis	Vis sans fin	Engrenage (2DDL)	La vis sans fin pousse sur les dents de la roue de vis sans fin fixée au châssis.
Vis sans fin	Arbre moteur	Engrenage (2DDL)	La vis sans fin est entraînée par l'engrenage conique de l'arbre moteur.
Arbre moteur	Levier	Pivot (1DDL)	L'arbre possède un pivot sur le moteur. Ce dernier est fixé rigidement au levier.
Vis sans fin	Levier	Pivot (1DDL)	L'arbre de la vis sans fin est maintenu en pivot sur le levier.
Levier	Roue de vis sans fin et châssis	Pivot (1DDL)	Le levier tourne autour de l'arbre principal. On considère ce dernier rigide pour séparer ce groupe de l'avance.

Le nombre de DDL pour la cinématique de l'avance se calcule comme suit :

$$M = \text{Nombre de commandes nécessaires}$$

$$M = 3(n - 1) - 2f_1 - f_2 \quad \text{où}$$

$$n = \text{Nombre total d'assemblages mobiles (incluant le châssis)}$$

$$f_1 = \text{Nombre d'articulations à un DDL}$$

$$f_2 = \text{Nombre d'articulations à 2 DDL}$$

$$M = 3(4 - 1) - 2 \cdot 3 - 2 ; M = 1$$

Figure 6.4 Calculs de la cinématique de l'avance

Un seul moteur est suffisant pour faire tourner le système d'avance, si l'on considère le levier comme fixe.

6.2 Trajectoires

La cinématique de l'avance n'a pas de trajectoire à étudier puisque les pièces ne bougent pas de façon significative par rapport à leur enveloppe, pour l'étendue totale de la liberté de mouvement.

Au sujet du levier trajectoires de ce dernier ont été évalués afin de limiter sa course. L'étendue maximale avant interférence du levier est de 48.6° , permettant une garde au sol de $9\frac{3}{4}''$ pour le robot. Les positions limites sont illustrées sur les figures à la page suivante.

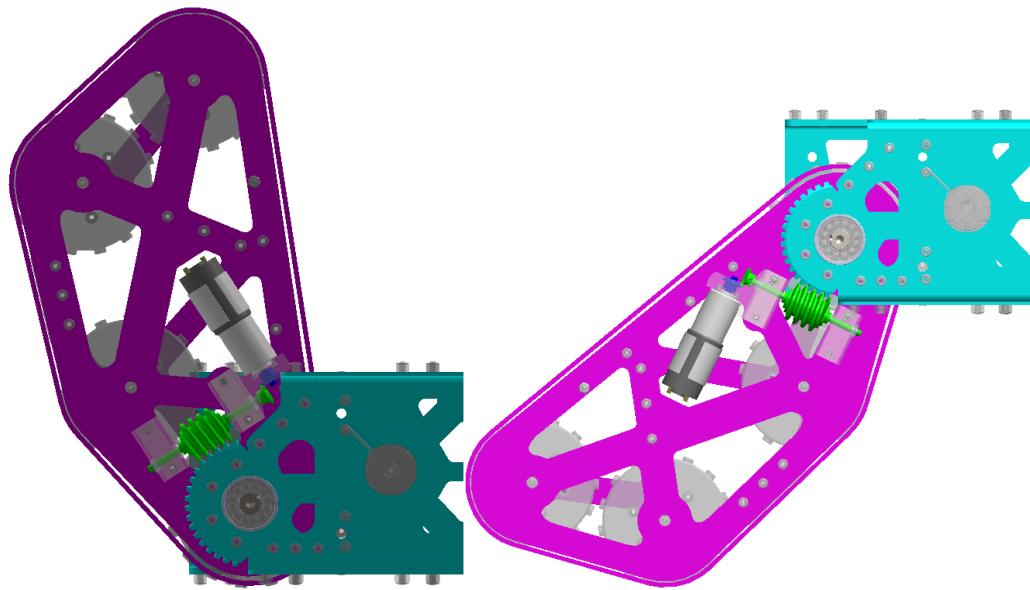


Figure 6.5 Positions limites du levier

6.3 Espaces, limites et tolérances

Un jeu de $\frac{1}{16}$ " est pris en considération autour de l'enveloppe extérieure de la chaîne et de la courroie afin de garantir qu'il n'y aura pas d'interférence sous les effets dynamiques. Un jeu identique est aussi considéré entre le levier et le châssis pour les mêmes raisons (À l'exception de la vis sans fin). Les postions limites de ce dernier sont illustrées aux figures précédentes. Une vue de près est présentée aux figures suivantes.

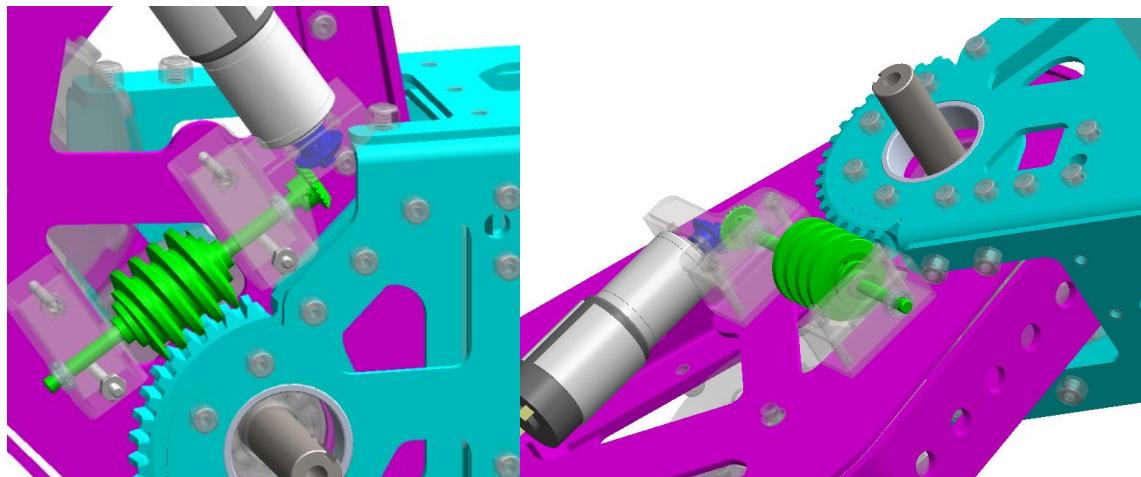


Figure 6.6 Positions limites du levier (Vue rapprochée)

7 AMDEC

L'AMDEC est une analyse permettant de réduire les risques de défaillances du module de mobilité en identifiant des modes des défaillances, leurs causes et leurs effets. Celui-ci fonctionne en estimant la probabilité de détection des défaillances, l'occurrence des défaillances ainsi que la gravité de l'impact de cette défaillance sur le module complet. L'analyse se fait sur tous les composants importants du module.

7.1 Décomposition fonctionnelle

Le module de mobilité est conçu spécifiquement pour un robot de type secouriste. Il doit donc avoir ces principales fonctionnalités en tout temps lorsqu'il est déployé. L'analyse est orientée vers ces fonctions afin de diminuer le risque de défaillance. Les principales fonctions sont :

- Déplacement du robot ;
- Gravir des obstacles ;
- Résister à des conditions difficiles ;
- Offrir de la manœuvrabilité.

Le module est découpé en plusieurs sous-composants, où ceux-ci jouent un rôle dans chacune de ces fonctions. Ces composants sont présentés dans les tableaux à la section 7.3.

7.2 Modes de défaillance

Les modes de défaillance sont les façons dont le comportement d'un système peut être ébranlé. Plusieurs modes sont associés à chaque fonction d'un module. Les principaux modes de défaillance associée au module de mobilité sont :

- Perte de motricité;
- Perte de la capacité à se déplacer;
- Rotation des bras interrompue;
- Perte de vitesse ;
- Diminution de la force déployée par les bras;
- Perte de contrôle sur la rotation ou la mobilité;
- Perte de manœuvrabilité.

7.3 Tableau d'AMDEC

Les tableaux aux prochaines pages présentent l'analyse de défaillance pour les principaux composants du module de mobilité. La criticité, C, est le produit de la probabilité de détection, D, de l'occurrence, O, et de la gravité, G. Les nombres de couleurs rouges représentent la criticité maximale pour un composant.

Tableau 7.1 Tableau d'AMDEC

Composant	Fonction	Mode	Cause	Effet	Détection	D	O	G	C
Transmission du levier	Assure la rotation des leviers aux extrémités	Coincement de la rotation	Débris incrusté dans le mécanisme	Utilisateur limité dans ses manœuvres	Utilisateur	4	10	4	160
			Perte d'alimentation au moteur	Utilisateur limité dans ses manœuvres	Utilisateur	4	3	6	72
			Engrenage abimés	Utilisateur limité dans ses manœuvres	Utilisateur	8	2	6	96
		Diminution de la vitesse de rotation	Débris incrusté dans le mécanisme	Perte de rapidité d'exécution	Utilisateur	4	10	4	160
			Désalignement à l'axe de rotation	Perte de rapidité d'exécution	Utilisateur	7	3	4	84
		Rotation libre du levier	Bris de la fixation moteur	Robot incapable de franchir des obstacles	Utilisateur	4	4	6	96
			Perte de contact entre engrenage	Robot incapable de franchir des obstacles	Utilisateur	6	2	6	72
			Engrenage brisé	Robot incapable de franchir des obstacles	Utilisateur	4	2	6	48
		Perte de force pour soulever le robot	Engrenage abimés	Difficulté à franchir des obstacles	Utilisateur	8	2	4	64
			Débris incrusté dans le mécanisme	Difficulté à franchir des obstacles	Utilisateur	4	10	4	160
		Rotation au-delà des limites	Limite pas déterminé	Bris sur le reste du robot	Utilisateur	6	7	2	84
Transmission du mouvement d'avance	Assure la transmission du moteur aux roues et au chenilles	Le robot n'a plus de motricité	Chaîne sectionnée	Robot inutilisable	Utilisateur	2	2	8	32
			Bris du support moteur	Robot inutilisable	Utilisateur	4	3	8	96
			Engrenage brisé	Robot inutilisable	Utilisateur	4	1	8	32
		La vitesse maximale est réduite	Débris dans le système	Perte de rapidité d'exécution	Utilisateur	4	10	4	160
			Chaîne mal lubrifiée	Perte de rapidité d'exécution	Utilisateur	4	4	4	64
			Engrenage désaligné	Perte de rapidité d'exécution	Utilisateur	7	3	4	84
		Le déplacement n'est plus possible	Perte d'alimentation au moteur	Robot inutilisable	Utilisateur	4	3	8	96
			Engrenage coincé	Robot inutilisable	Utilisateur	6	3	8	144
		Perte de précision	Perte de la tension dans la chaîne	Utilisateur perd de la manœuvrabilité	Utilisateur	3	2	2	12
		Perte du couple aux roues	Encrassement de la chaîne	Perte de rapidité d'exécution	Utilisateur	4	10	4	160
			Usure des dents de l'engrenage	Perte de rapidité d'exécution	Utilisateur	8	2	4	64
Châssis central	Supporte tous les composants du système	Détachement du châssis au robot	Mauvais couple de serrage aux vis de fixation	Robot inutilisable	Utilisateur	5	2	8	80
			Vis brisées	Robot inutilisable	Utilisateur	5	2	8	80
			Tôle déchirée	Robot inutilisable	Utilisateur	3	2	8	48
		Perte des bras rotatifs	Flexion à l'encastrement du roulement	Difficulté à franchir des obstacles	Utilisateur	7	2	6	84
			Tôle pliée	Difficulté à franchir des obstacles	Utilisateur	4	3	6	72
		Le châssis est mal fixé au robot	Mauvais couple aux vis de fixation	Utilisateur perd de la manœuvrabilité	Utilisateur	6	4	5	120

Tableau 7.1 Tableau d'AMDEC (Page #2)

Châssis central	Protège les composants	Mauvais fonctionnement du robot	Bris d'un composant dû à l'exposition	Utilisateur perd de la manœuvrabilité et peut devenir inutilisable	Utilisateur	2	7	4	56
Châssis des leviers	Gravir des obstacles	Perte de propulsion par les chenilles	Roues mal fixées	Difficulté à franchir des obstacles	Utilisateur	5	3	6	90
			Roulements coincées	Difficulté à franchir des obstacles	Utilisateur	7	2	6	84
			Flexion de la tôle	Difficulté à franchir des obstacles	Utilisateur	5	2	6	60
		Perte de la rotation du bras	Tôle plié	Difficulté à franchir des obstacles	Utilisateur	4	2	6	48
			Interférence entre le bras et le châssis central	Difficulté à franchir des obstacles	Utilisateur	3	2	4	24
	Protège les composants du bras	Mauvais fonctionnement de la rotation des bras	Roulement brisé	Difficulté à franchir des obstacles	Utilisateur	5	2	4	40
			Bris de la transmission du levier	Difficulté à franchir des obstacles	Utilisateur	4	3	6	72
		Durée de vie des composants écourtées	Exposition à des conditions difficiles	Mauvais fonctionnement à long terme	Utilisateur	3	3	6	54
Système de déplacement	Déplacement du robot	Perte de propulsion par les chenilles	Courroie crantée sectionnée	Difficulté à franchir des obstacles	Utilisateur	3	3	6	54
			Roue de chenille brisée	Difficulté à franchir des obstacles	Utilisateur	4	3	5	60
			Débarquement de Courroie crantée	Difficulté à franchir des obstacles	Utilisateur	3	5	4	60
		Perte de propulsion par les roues	Crevaison d'un pneu	Perte de rapidité d'exécution	Utilisateur	3	4	3	36
			Roue endommagé	Utilisateur perd de la manœuvrabilité	Utilisateur	4	3	3	36
			Perte d'une roue	Utilisateur perd de la manœuvrabilité	Utilisateur	4	3	6	72
			Perte d'alimentation des moteurs	Robot inutilisable	Utilisateur	4	3	8	96
Groupe motopropulseur	Déplacement du robot	Le robot ne se déplace plus	Moteurs endommagés	Robot inutilisable	Utilisateur	6	3	8	144
			Alimentation inconstante	Perte de rapidité d'exécution	Utilisateur	4	4	4	64
		Perte de vitesse	Friction à l'arbre moteur	Perte de rapidité d'exécution	Utilisateur	6	3	4	72
			Perte d'alimentation des moteurs	Utilisateur perd de la manœuvrabilité	Utilisateur	4	3	6	72
	Rotation des bras	Perte de la rotation des bras	Moteurs endommagés	Utilisateur perd de la manœuvrabilité	Utilisateur	6	3	6	108
			Perte de force pour soulever le robot	Friction à l'arbre moteur	Utilisateur	6	3	3	54
		Alimentation inconstante	Alimentation inconstante	Difficulté à franchir des obstacles	Utilisateur	4	4	3	48

7.4 Actions correctives

L'analyse montre que certains points de la conception peuvent être améliorés pour prévenir les défaillances. La cause de défaillance qui est la plus problématique est l'encrassement des transmissions et la possibilité de débris dans le système. L'action préventive reliée à ce problème peut être d'ajouter des protecteurs pour couvrir les parties critiques du système. D'autres problèmes peuvent être contournés en effectuant de la maintenance préventive. Les actions correctives sont prises lorsque la criticité dépasse 50. La criticité devient assez importante qu'il devient obligatoire d'investir du temps et de l'argent afin de pallier le problème.

7.5 Tableau d'AMDEC avec actions correctives

Les tableaux ci-dessous présentent des solutions pour répondre aux causes de défaillance à criticité élevée. À des fins de visibilité, la colonne des effets, de détection et les D, O, G, C initiales sont retirées, mais sont identiques au premier tableau.

Tableau 7.2 Tableau d'AMDEC Révisé avec des actions correctives

Composant	Fonction	Mode	Cause	Action Préventives	D'	O'	G'	C'
Transmission du levier	Assure la rotation des leviers aux extrémités	Coincement de la rotation	Débris incrusté dans le mécanisme	Ajout d'un couvercle protégeant le système	4	3	4	48
			Perte d'alimentation au moteur	-	4	3	6	72
			Engrenage abimés	Utiliser des engrenages à plus haute résistance	8	1	6	48
		Diminution de la vitesse de rotation	Débris incrusté dans le mécanisme	Ajout d'un couvercle protégeant le système	4	3	2	24
			Désalignement à l'axe de rotation	Utiliser de la quincaillerie plus résistante	7	2	4	56
		Rotation libre du levier	Bris de la fixation moteur	Revisiter le design du support	4	2	6	48
			Perte de contact entre engrenage	Augmenter la précision sur la position des engrenages	6	1	6	36
			Engrenage brisé	-	4	1	6	24
		Perte de force pour soulever le robot	Engrenage abimés	Utiliser des engrenages à plus haute résistance	8	1	4	32
			Débris incrusté dans le mécanisme	Ajout d'un couvercle protégeant le système	4	3	2	24
		Rotation au-delà des limites	Limite pas déterminé	Ajout d'interrupteur de fin de course	2	2	2	8
Transmission du mouvement d'avance		Le robot n'a plus de motricité	Chaîne sectionnée	-	2	2	8	32
			Bris du support moteur	Revisiter le design du support	4	2	8	64
			Engrenage brisé	-	4	1	8	32
		La vitesse maximale est réduite	Débris dans le système	Ajout d'un garde pour la chaîne et les engrenages	4	3	4	48
			Chaîne mal lubrifiée	Maintenance préventive en lubrifiant régulièrement	3	3	4	36
			Engrenage désaligné	Augmenter la précision sur la position des engrenages	6	2	4	48

Tableau 7.2 Tableau d'AMDEC Révisé avec des actions correctives (Page #2)

Transmission du mouvement d'avance	Assure la transmission du moteur aux roues et au chenilles	Le déplacement n'est plus possible	Perte d'alimentation au moteur	-	4	3	8	96	
			Engrenage coincé	Vérifier le dégagement autour du système et ajout d'un protecteur	5	2	8	80	
		Perte de précision	Perte de la tension dans la chaîne	-	3	2	2	12	
			Encrassement de la chaîne	Ajout d'un garde pour la chaîne	4	3	4	48	
		Perte du couple aux roues	Usure des dents de l'engrenage	Utiliser des engrenages à plus haute résistance	8	1	4	32	
Châssis central	Supporte tous les composants du système	Détachement du châssis au robot	Mauvais couple de serrage aux vis de fixation	Vérification des couples de serrage régulièrement	3	2	8	48	
			Vis brisées	Maintenance préventive en changeant les vis prématûrement	3	1	8	24	
		Perte des bras rotatifs	Tôle déchirée	-	3	2	8	48	
			Flexion à l'encastrement du roulement	Revoir le design de l'encastrement	7	1	6	42	
		Tôle pliée	Maintenance préventive en changeant les tôles abimées prématûrement	3	2	6	36		
	Protège les composants	Le châssis est mal fixé au robot	Mauvais couple aux vis de fixation	Vérification des couples de serrage régulièrement	3	3	5	45	
		Mauvais fonctionnement du robot	Bris d'un composant dû à l'exposition	Ajout de plaques protectrices	3	3	4	36	
Châssis des leviers	Gravir des obstacles	Perte de propulsion par les chenilles	Roues mal fixées	Utiliser des lock nuts ou vérifier le serrage de vis régulièrement	3	2	6	36	
			Roulements coincées	Utiliser des roulements scellés	7	1	6	42	
			Flexion de la tôle	Maintenance préventive en changeant les tôles abimées prématûrement	3	2	6	36	
		Perte de la rotation du bras	Tôle plié	-	4	2	6	48	
			Interférence entre le bras et le châssis central	-	3	2	4	24	
	Protège les composants du bras	Mauvais fonctionnement de la rotation des bras	Roulement brisé	-	5	2	4	40	
			Bris de la transmission du levier	Ajout de plaques protectrices	4	2	6	48	
Système de déplacement	Déplacement du robot	Perte de propulsion par les chenilles	Durée de vie des composants écourtées	Exposition à des conditions difficiles	Ajout de plaques protectrices	3	2	6	36
			Courroie crantée sectionnée	Utiliser une courroie plus résistante	3	2	6	36	
			Roue de chenille brisée	Revisiter le design	4	2	5	40	
		Débarquement de Courroie crantée	Utiliser des guides pour diriger la courroie	3	3	4	36		

Tableau 7.2 Tableau d'AMDEC Révisé avec des actions correctives (Page #3)

Système de déplacement	Déplacement du robot	Perte de propulsion par les roues	Crevaison d'un pneu	-	3	4	3	36
			Roue endommagé	-	4	3	3	36
			Perte d'une roue	Utiliser un système de fixation sécuritaire	4	2	6	48
Groupe motopropulseur	Déplacement du robot	Le robot ne se déplace plus	Perte d'alimentation des moteurs	-	4	3	8	96
			Moteurs endommagés	Utiliser des plaques protectrices	6	2	8	96
		Perte de vitesse	Alimentation inconstante	-	4	4	4	64
			Friction à l'arbre moteur	Assurer un bon dégagement autour du moteur	6	2	4	48
	Rotation des bras	Perte de la rotation des bras	Perte d'alimentation des moteurs	-	4	3	6	72
			Moteurs endommagés	Utiliser des plaques protectrices	6	2	6	72
		Perte de force pour soulever le robot	Friction à l'arbre moteur	Assurer un bon dégagement autour du moteur	6	2	3	36
			Alimentation inconstante	-	4	4	3	48

8 DFA

La DFA permet d'analyser l'assemblage du produit afin de l'optimiser. Dans ce projet, deux DFA ont été faites pour deux éléments différents.

8.1 Module de support

Afin d'améliorer et de faciliter l'assemblage lors de la production, nous avons évalué différentes alternatives afin d'assembler le module de support boulonné. La solution originale nécessitait l'utilisation de boulon, écrous et rondelle à chacun des points de fixation. La vue explosée du module de support avec cette quincaillerie est illustrée ci-dessous.

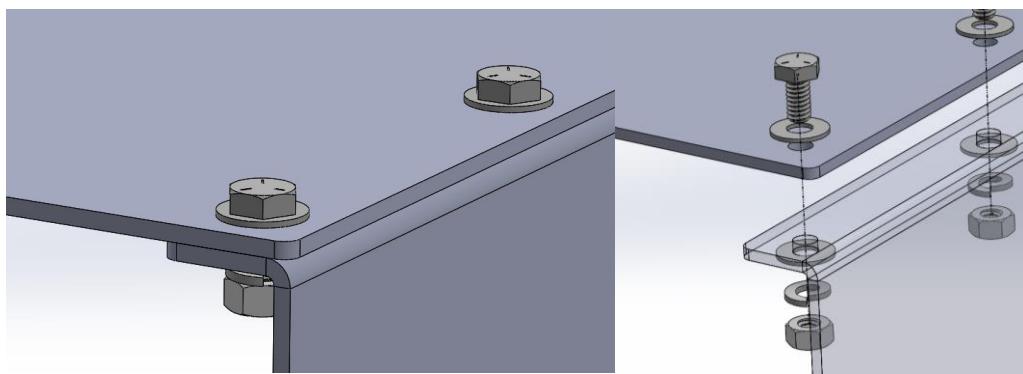


Figure 8.1 Assemblage avec boulons des supports

La seconde alternative remplace alors l'utilisation de boulon par des goujons qui seront préalablement inséré dans chacun des plaques faisant partie du module de support boulonné. La figure suivante présente alors la vue explosive de cette alternative.

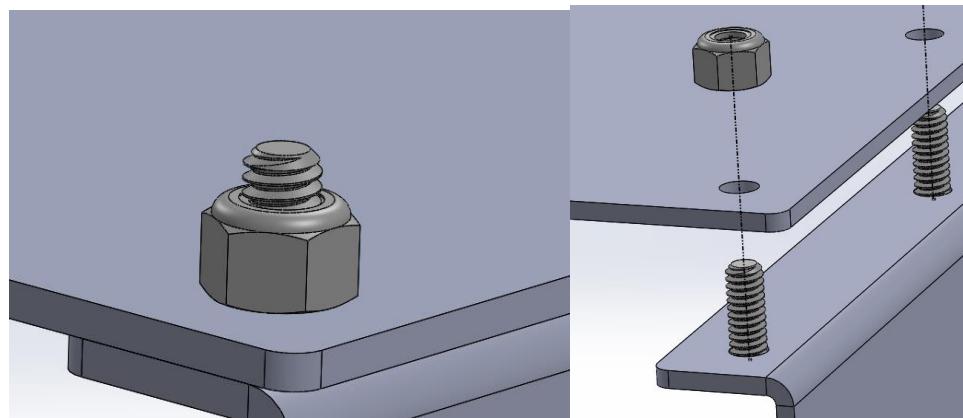


Figure 8.2 Assemblage avec des goujons filetés des supports

Par la suite, à l'aide de la méthode de Poli, il est possible de déterminer le temps global d'assemblage en plus d'estimer l'efficacité d'assemblage de chacune des deux alternatives (boulons et goujons). Les détails de ces estimations sont alors présentés dans les tableaux ci-dessous.

Tableau 8.1 Évaluation de Poli pour un assemblage boulonné

Pièce	Description	Quantité théoriques Np	Temps par pièce (sec)	Temps total Tt (sec)
AdapterPlate	Plaque de fixation du module de support	1	1	8
6384K367	Roulement à bille pour arbre 3/4"	4	1	4
6384K361	Roulement à bille pour arbre 1/2"	2	1	4
MainShaftBearingPressFitSleeve	Manche press fit pour 6384K367	2	0	8
MotorShaftBearingPressFitSleeve	Manche press fit pour 6384K361	2	0	8
92865A938	Boulon Hex 1/4-20 x 5/8" long	30	0	8
91102A750	Rondelle de blocage pour boulon 1/4	30	0	7.5
95462A029	Écrou 1/4-20	30	0	8
BottomSheet	Plaque de support du bas	1	1	8
92620A413	Boulon Hex 10-24 x 3/4" long	12	0	8
90480A011	Écrou 10-24	52	0	8
91102A740	Rondelle de blocage #10	52	0	7.5
MovementMotorAssy	Moteur	2	1	4
91251A240	Boulon 6 pans creux 10-24 x 3/8" long	8	0	8
TorsionStiffenerLeft	Renfort de torsion gauche	1	1	8
TorsionStiffenerRight	Renfort de torsion Droit	1	1	8
92620A412	Boulon Hex 10-24 x 1/2" long	8	0	8
Shaft	Arbre rotatif	2	1	8
91309A624	Boulon hex 3/8-16 x 1" long	4	0	8
91101A231	Rondelle de blocage pour vis 3/8"	4	0	7.5
92141A051	Rondelle plate 18-8 pour vis 3/8"	4	0	7.5
TopSheet	Plaque de support du haut	1	1	8
WormGearStiffener	Renfort de l'engrenage	2	1	8
92620A414	Boulon Hex 10-24 x 1" long	20	0	8
ShimTop	Espaceur du haut	2	0	8
ShimBottom	Espaceur du bas	2	0	8
57545K415	Engrenage Pitch:10 / Ratio 40:1	2	1	8
OuterSheet	Plaque extérieur du module de support	1	1	8
MainShaftBearingSleeve	Manche pour roulement à bille	2	0	4
WheelAdapter	Adaptateur pour roue	2	0	4
92196A253	Boulon 6 pans creux 10-24 x 2" long	12	0	8
Wheel	Roue	2	1	4
SupportSleeve	Manche de support	2	0	4
98510A117	Clé 3/16"x3/16" x 12" long	2	0	7.5
		Total:	13	241.5
		Total (heures) :		0.65
		Rendement (3*Np/Taf)		1.68%

Tableau 8.2 Évaluation de Poli pour un assemblage avec goujons

Pièce	Description	Quantité théoriques Np	Pièces	Temps par pièce (sec)	Temps total Tt (sec)
AdapterPlate	Plaque de fixation du module de support	1	1	4	4
6384K367	Roulement à bille pour arbre 3/4"	4	1	4	16
6384K361	Roulement à bille pour arbre 1/2"	2	1	4	8
MainShaftBearingPressFitSleeve	Manche press fit pour 6384K367	2	0	8	16
MotorShaftBearingPressFitSleeve	Manche press fit pour 6384K361	2	0	8	16
90640A129	Écrou de blocage 1/4-20	30	0	8	240
BottomSheet	Plaque de support du bas	1	1	4	4
90631A011	Écrou de blocage 10-24	52	0	8	416
MovementMotorAssy	Moteur	2	1	4	8
91251A240	Boulon 6 pans creux 10-24 x 3/8" long	8	0	8	64
TorsionStiffenerLeft	Renfort de torsion gauche	1	1	4	4
TorsionStiffenerRight	Renfort de torsion Droit	1	1	4	4
Shaft	Arbre rotatif	2	1	8	16
91309A624	Boulon hex 3/8-16 x 1" long	4	0	8	32
91101A231	Rondelle de blocage pour vis 3/8"	4	0	7.5	30
92141A051	Rondelle plate 18-8 pour vis 3/8"	4	0	7.5	30
TopSheet	Plaque de support du haut	1	1	4	4
WormGearStiffener	Renfort de l'engrenage	2	1	4	8
ShimTop	Espaceur du haut	2	0	4	8
ShimBottom	Espaceur du bas	2	0	4	8
57545K415	Engrenage Pitch:10 / Ratio 40:1	2	1	4	8
OuterSheet	Plaque extérieur du module de support	1	1	4	4
MainShaftBearingSleeve	Manche pour roulement à bille	2	0	4	8
WheelAdapter	Adaptateur pour roue	2	0	4	8
92196A253	Boulon 6 pans creux 10-24 x 2" long	12	0	8	96
Wheel	Roue	2	1	4	8
SupportSleeve	Manche de support	2	0	4	8
98510A117	Clé 3/16"x3/16" x 12" long	2	0	7.5	15
Total:		13	154.5	1091	
Total (heures) :				0.30	
Rendement (3*Np/Taf)				3.57%	

Les trois premières colonnes des tableaux ci-dessus présentent alors les numéros de pièces, une description de chacune de celle-ci ainsi que la quantité de pièce nécessaire afin d'assembler le module de support. Par la suite, il est possible d'observer, dans la quatrième colonne, la quantité minimale de pièce théorique nécessaire à l'assemblage. Chacune de ces pièces sont alors énumérées ci-dessous :

AdapterPlate / BottomSheet / TorsionStiffenerLeft / TorsionStiffenerRight / TopSheet / WormGearStiffener / OuterSheet

Ces pièces sont des pièces essentielles à l'assemblage car celles-ci doivent être séparées du restant afin d'assurer l'assemblage et le désassemblage du module de support et sa fonctionnalité.

6384K367/6384K361

Ces roulements sont des pièces essentielles à l'assemblage car un mouvement est nécessaire entre ceux-ci et les plaques du module de support.

Moteur

Le moteur est une pièce essentielle de l'assemblage car celui-ci doit être isolée des autres pièces et doit pouvoir être ajusté et remplacer lors de l'assemblage.

Shaft / Wheel

L'arbre principal et la roue sont une pièce essentielle de l'assemblage car un mouvement est nécessaire entre celui-ci et les plaques de fixation du module. De plus, celles-ci doivent être fabriqué de matériel différent au reste du support du module.

57545K415

L'engrenage est une pièce essentielle de l'assemblage car celui-ci doit être fabriqué à partir d'un matériel différent que les plaques de fixation du module. D'ailleurs, il n'est vraiment pas économique de le faire à même les autres pièces à cause de son procédé de fabrication.

Aussi, il est possible d'observer le temps d'assemblage estimé pour chacun des pièces en fonction du tableau de la méthode de Poli.

À l'aide du temps d'assemblage total estimé et du nombre de pièce essentielle à l'assemblage, il est possible de déterminer le rendement de chacun des deux assemblages.

Pour l'assemblage boulonné, le tableau présente un rendement de 1.68% comparativement à un rendement de 3.57% pour l'assemblage avec des goujons et des écrous de blocage. Le nombre de pièce essentielles dans les deux assemblages est le même, mais le fait d'utiliser des goujons qui sont préalablement pressés dans les plaques au lieu d'utiliser des boulons hexagonaux permet de diminuer le temps d'assemblage et de faciliter l'alignement des plaques. De plus, en remplaçant les écrous standard et des rondelles de blocage par des écrous de blocage, cela permet de diminuer le temps d'assemblage et la manipulation de petite pièce.

8.2 Brides de fixation

Par la suite, afin de faciliter l'assemblage du système de propulsion complet au corps du robot, nous avons évalué trois différentes alternatives de fixation. La première méthode de fixation consiste à l'utilisation de boulons et rondelle de blocage allait se fixer dans des trous filetés sur le corps du robot.

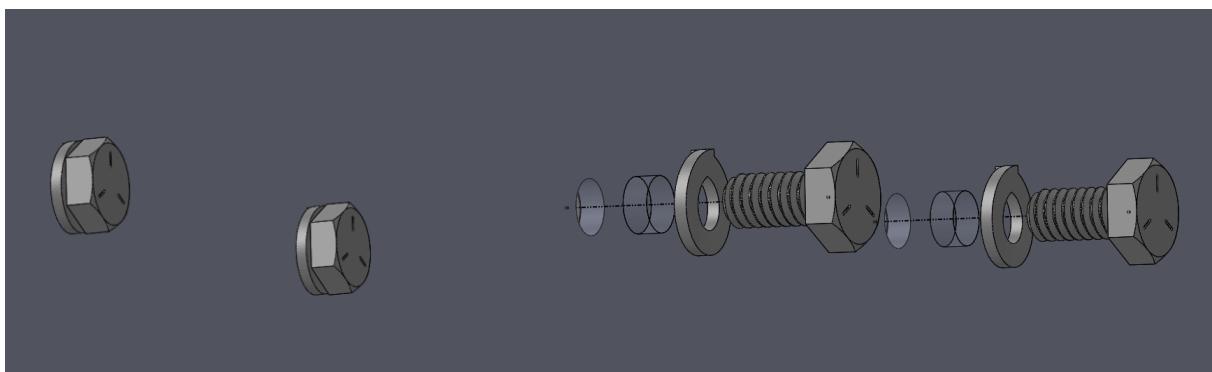


Figure 8.3 Fixation au châssis avec des boulons

La seconde alternative consiste à fixer le module de propulsion sur des goujons filetés qui seront préalablement installé sur le robot à l'aide d'écrous standard et de rondelle de blocage.

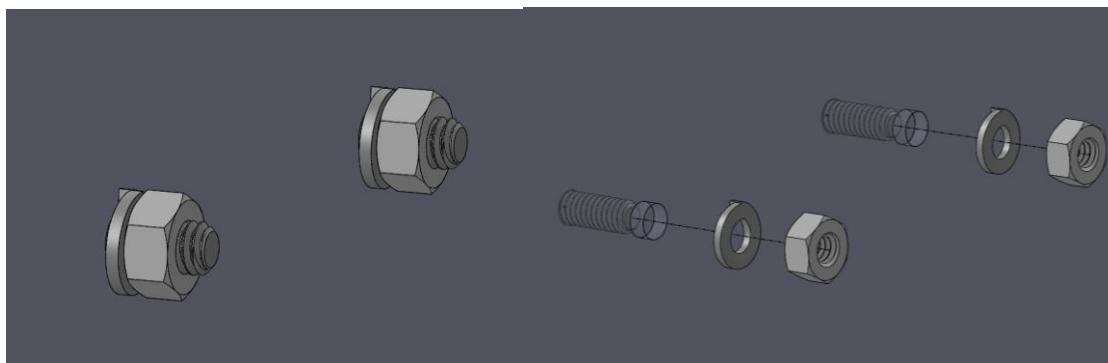


Figure 8.4 Fixation au châssis avec des écrous sur goujons

La troisième alternative consiste à utiliser les mêmes goujons et la seconde alternative, mais d'y fixer le robot à l'aide d'écrous pouvant facilement être insérés à la main puis finalisés à l'aide d'une clé à 6 pans hexagonales au travers l'assemblage complet.

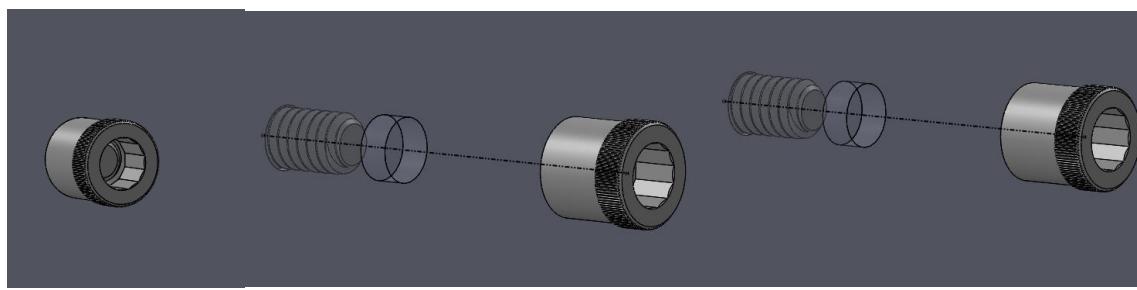


Figure 8.5 Fixation au châssis avec des écrous Allen

Ces trois alternatives sont analysées à l'aide de la méthode de Poli afin d'estimer le temps d'assemblage ainsi que le rendement de chacune de celle-ci. Les détails sont alors illustrés dans les trois tableaux suivants.

Tableau 8.3 Évaluation de Poli pour une fixation avec boulons

Pièce	Description	Quantité théoriques Np	Pièces Temp par pièce (sec)	Temps total Tt (sec)
ModuleDeDéplacement	Module complet de déplacement	1	1	11.5
92620A578	Boulon hex 5/16-18 x 1/2" long	6	0	11.5
91102A755	Rondelle de blocage 5/16	6	0	7.5
Total:		1	30.5	125.5
Total (heures):				0.03
Rendement (3*NP/Taf):				2.39%

Tableau 8.4 Évaluation de Poli pour une fixation avec goujons et écrous

Pièce	Description	Pièces Quantité théoriques Np	Temps par pièce (sec)		Temps total Tt (sec)
			11.5	11.5	
ModuleDeDéplacement	Module complet de déplacement	1	1	11.5	11.5
95462A030	Écrou hex 5/16-18	6	0	8	48
91102A755	Rondelle de blocage 5/16	6	0	7.5	45
		Total:	1	27	104.5
				Total (heures):	0.03
				Rendement (3*NP/Taf):	2.87%

Tableau 8.5 Évaluation de Poli pour une fixation avec goujons et écrous 6 pans creux

Pièce	Description	Pièces Quantité théoriques Np	Temps par pièce (sec)		Temps total Tt (sec)
			11.5	11.5	
ModuleDeDéplacement	Module complet de déplacement	1	1	11.5	11.5
92066A030	Écrou à 6 pans creux 5/16-18	6	0	4	24
		Total:	1	15.5	35.5
				Total (heures):	0.01
				Rendement (3*NP/Taf):	8.45%

À l'aide de ces trois tableaux, il est alors possible d'observer chacune des pièces, une courte description pour chacune de celle-ci ainsi que la quantité nécessaire afin de réaliser chacune des alternatives. De plus, la pièce essentielle théorique présenté est la même pour chacun des trois alternatives. Cette pièce se trouve à être le module complet de déplacement. Cette pièce est essentielle car elle se trouve à devoir être séparé des autres pièces afin d'assurer l'assemblage et le démontage.

Par la suite, une estimation du temps d'assemblage pour chacune des pièces est estimée à l'aide du tableau de Poli.

Grâce au nombre de pièce essentielle ainsi que le temps d'assemblage, il est possible de déterminer le rendement de chacune des alternatives. Pour la solution utilisant des boulons et rondelle de blocage, celle-ci obtient un rendement de 2.39%. Ce rendement s'explique par le fait que l'alignement des boulons en même temps que maintenir le module de propulsion peut s'avérer difficile à réaliser. La deuxième alternative obtient un résultat similaire de 2.87%. Ceci s'explique par le fait qu'il est difficile d'atteindre les boulons avec les bons outils car ils se trouvent dans des endroits restreints. L'alternative proposant des boulons permettant de se viser à la main sont alors la meilleure option avec un rendement de 8.45% car ceux-ci permettent d'accélérer le processus d'installation et permet l'accès facile à des petits outils tel que des clés Allen.

9 DFM

Pour ce système de propulsion conçu spécialement pour le club étudiant Capra, l'optique de ce projet était principalement que le module soit réalisable afin que chacune des pièces le composant soit fabriqué et assemblé au sein des établissements de l'ÉTS. Le système de propulsion offert au club est alors une solution viable étant donné que la majorité des pièces qui seront utilisées dans ce projet sont des composantes standards se retrouvant chez plusieurs détaillants locaux. Concernant les pièces usinées, la majorité de celle-ci ont été conçus en fonction des outils et équipements qui sont mis à la disposition des étudiants à l'ÉTS. En d'autres termes, certaines composantes qui doivent être usinées pourront l'être grâce aux étudiants et aux équipements mis à leur disposition afin de diminuer les coûts de fabrication. Quelques pièces non-standard devront être fabriquées par des fournisseurs externes afin de pouvoir obtenir les résultats voulus.

De plus, certaines modifications lors de la conception ont été apportées à quelques pièces afin de pouvoir réduire les coûts liés au matériel. Chacune de ces améliorations sont alors énumérées ci-dessous.

9.1 Remplacement du bloc de support par une plaque de support

La plaque de support du module de propulsion permet de loger les roulements nécessaires au bon fonctionnement du système moteur ainsi que l'arbre principal. Le logement du roulement doit alors avoir une profondeur égale à l'épaisseur du roulement qui est de 0.5 pouce pour lui permettre d'être bien logé et localisé. Afin d'éviter l'utilisation d'un bloc d'acier de 0.5 pouce (Épaisseur nécessaire seulement pour supporter la largeur du roulement), celle-ci fut alors remplacée par une plaque d'aluminium découpée au laser puis pliée. Ceci permet alors de réduire le poids, le réduire les coûts d'usinage et de matériel brute. Le roulement sera alors supporté par un manchon qui peut être facilement usinée sur un tour conventionnel et qui sera pressé et soudé dans la plaque d'acier (Voir plans avec l'identifiant « AdapterPlate » dans l'Annexe J).

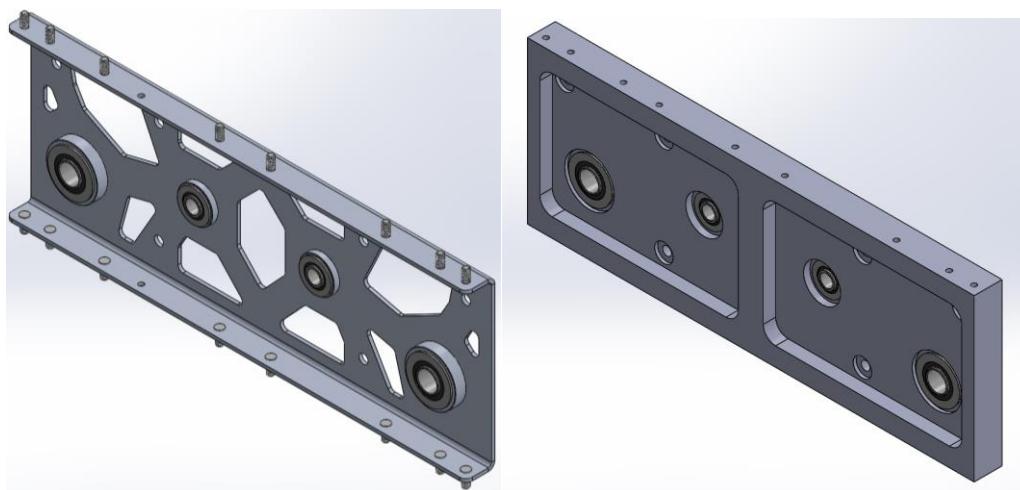


Figure 9.1 Plaque adaptatrice avant et après les améliorations

9.2 Standardisation de l'épaisseur des plaques

Le module de propulsion étant principalement fabriqué à l'aide de plaque, il était alors avantageux d'utiliser des plaques ayant une épaisseur normalisée afin de pouvoir réduire les coûts liés à la propreté du matériel et ainsi permettre une économie d'échelle, et un meilleur contrôle de l'inventaire. De plus, les plaques d'acier et d'aluminium sont facilement transformables à l'aide de la découpe au laser et du pliage à l'aide de presse.

9.3 Impression 3D des roues de la chenille

Les roues de la chenille seront fabriquées à partir de plastique et de métal, afin de faciliter la production et de réduire les pertes de matériel. Le centre de la roue sera fabriqué à partir d'une plaque qui sera découpée avec le lot pour le châssis afin d'obtenir la forme voulue. Autour de cette plaque découpée viendra se joindre deux morceaux de plastiques ayant été imprimée et permettra d'élargir la roue. Cette façon de procéder permet d'obtenir une roue plus large afin de supporter la largeur de la chenille tout en ayant les dents de la roue solide afin de permettre une rotation de la chenille efficace sans bris.

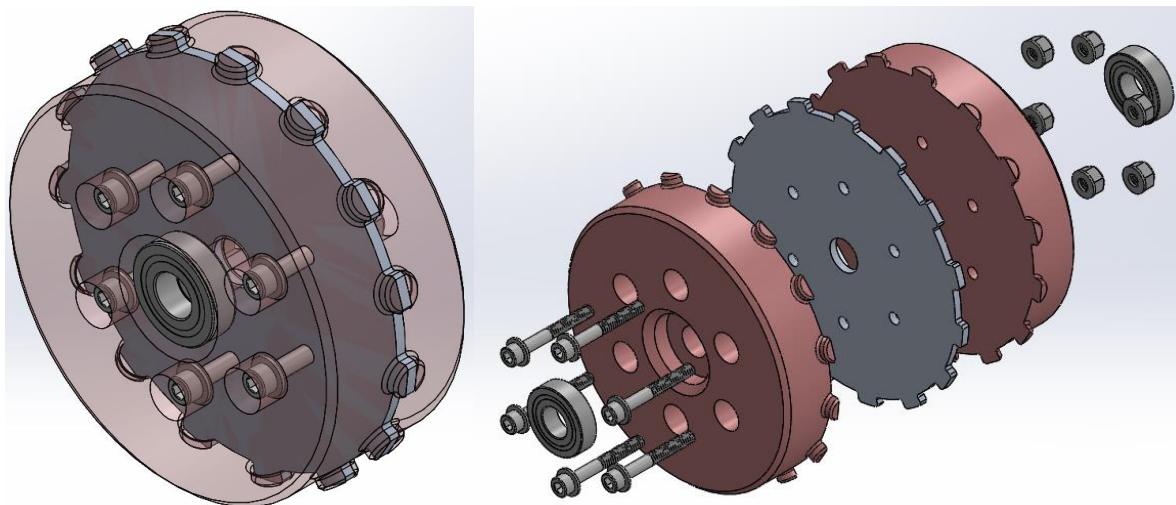


Figure 9.2 Roue composite plaque-impression 3D

Conclusion

Finalement, le but du projet était de concevoir un système de déplacement qui sera fixé sur le robot du club Capra afin de remplacer leur système de propulsion actuel. Le système doit permettre au robot de parcourir des terrains accidentés et à surpassé des obstacles le plus efficacement possible. Afin que le robot du club Capra soit le plus compétitif, le système de propulsion doit principalement être rapide, léger, compact et à faible coût pour que ce projet puisse être réalisable. De plus, le système doit répondre à une multitude de contraintes imposées afin de pouvoir participer aux compétitions.

À la suite d'une analyse de la maison de la qualité établies en fonction des spécifications techniques, nous avons pu générer plusieurs différentes alternatives lors d'une période de remue méninge. Par la suite, nous avons procédé à un filtrage permettant de déterminer la solution finale. Pour ce projet, le concept répondant le mieux à chacun des critères est alors le Bras Chenillé.

Ensuite, nous avons alors procédé au processus de concrétisation du design. En d'autres termes, nous avons alors établies l'architecture de notre produit avec toutes les interactions entre chaque pièce et chaque module. De plus, nous avons effectué un modèle 3D de l'assemblage ainsi qu'une analyse cinématique afin de s'assurer du bon mouvement du produit à l'aide du logiciel de conception SolidWorks. Par la suite, nous avons effectué certains calculs afin de pouvoir dimensionner certaines composantes et ainsi optimiser notre assemblage. Cela nous a permis de déterminer le diamètre de l'arbre principal à 0.75 pouces, de concevoir les plaques de supports afin de pouvoir optimiser le poids du système tout en lui permettant d'être résistant aux forces. D'autres calculs ont été effectués en liens avec la sélection de composantes standards tel que pour le système de chaîne utilisé et pour les clavettes nécessaires. Ces calculs nous ont aussi permis de déterminer les matériaux nécessaires à la fabrication des pièces non standards en fonction du prix et de sa résistance.

Par la suite, nous avons effectué une analyse AMDEC afin de déterminer les modes de défaillance possible ainsi que des solutions pour diminuer leur effet. Nous avons aussi effectué une analyse DFA et DFM afin d'améliorer la conception des pièces et assemblages les plus critique du système de propulsion afin d'améliorer l'assemblage et la fabrication du produit. À la suite de ces analyses, nous avons alors remplacé les boulons par des goujons pressés dans les plaques, et les écrous avec des rondelles de blocage ont été remplacé par des écrous de blocages afin d'améliorer l'efficacité de l'assemblage. Pour ce qui est de la fabrication, les blocs usinés ont été remplacé par des tôles pliées. L'épaisseur de ces tôles est standardisée afin d'améliorer l'efficacité au niveau de la gestion du matériel. De plus, l'usinage de certaines composantes ont été remplacé par la fabrication additive afin d'améliorer l'utilisation du matériel lors de la fabrication.

À l'aide du montage finale, nous avons alors procédé à la réalisation de tous les dessins de détails nécessaire à la fabrication et à l'assemblage du produit final.

Éventuellement, il serait intéressant de pouvoir fabriquer chacune des composantes afin d'assembler le prototype final et ainsi pouvoir l'observer performer durant les compétitions.

Liste de références bibliographiques

Altair Engineering, Inc. (2019). Inspire. Troy, Michigan, USA.

ANSYS Inc. (2019). ANSYS Workbench 19.2. Southpointe, Pennsylvania, USA.

Applied Industrial Technologies. (2019). *Applied*. Récupéré sur Applied Industrial Technologies:
<https://www.applied.com/>

Budynas, G. R., & Nisbett, J. K. (2015). *Shigley's Mechanical Engineering Design, 10th Ed.* McGraw Hill.

Dassault Systèmes. (2019). SolidWorks. Vélizy-Villacoublay, Île-de-France, France.

Mackay, J. (2019, Mai 7). Interview avec le chef mécanique de CAPRA. (A. Mongrain, V. Lafleur, & G. Bourbeau, Intervieweurs)

MatWeb, LLC. (2019, Juillet). *MatWeb*. Récupéré sur MatWeb: <http://www.matweb.com/>

McMaster-Carr. (2019, Juillet). *McMaster*. Récupéré sur McMaster-Carr:
<https://www.mcmaster.com/>

Wagnac, É. (2018). Diapositives de MEC592 - Projet de conception de machines. Montreal.

ANNEXE A

SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES

Ci-dessous, les spécifications techniques sont expliquées en plus grand détail.

Vitesse à l'horizontale :

Afin de répondre au besoin de rapidité du robot, la maximisation de la vitesse à l'horizontale servira à évaluer les performances des concepts. La plupart des parcours sont majoritairement plats et la vitesse à l'horizontale s'estime bien. La vitesse actuelle du robot est d'environ 1 m/s et l'objectif est d'améliorer cette vitesse à 1.3 m/s. Cette vitesse se compare aux vitesses atteintes par les robots des compétiteurs.

Consommation électrique :

La minimisation de la consommation électrique au pic de puissance correspond au besoin d'avoir une meilleure économie d'énergie. La consommation maximale actuelle du robot est 1200 watts et est considérée comme très élevée. Un objectif de 800 watts est plus raisonnable.

Volume :

Afin de mesurer la compacité du robot, le volume de la plus petite boîte englobant le module lorsqu'il est rétracté, s'il y a lieu, sera à minimiser. Le robot avec le système de déplacement actuel a un volume de 50L et ce volume est plutôt grand pour la compétition.

Masse :

La facilité au transport se traduit par la masse des modules. Celle-ci sera à minimiser. Le système de déplacement ne devrait pas être plus de 15 lbs par côté, puisque le robot lui-même possède déjà une masse importante.

Facteur de sécurité :

Le robot est opéré sur des terrains à obstacles irréguliers, donc il se doit de résister à de grands impacts. La maximisation du facteur de sécurité est la plus simple des façons d'augmenter la fiabilité mécanique du robot. Un facteur de sécurité de 3 est alors visé.

Angle de renversement :

La stabilité s'exprime par la maximisation de l'angle de renversement du robot. Ce dernier est évalué lorsque les modules sont dans leur position la plus stable. On estime qu'un angle maximal de renversement de 45 degrés serait optimal.

Coût :

Le concept est abordable si son prix de fabrication est minimisé. Le club Capra serait prêt à investir de 3000\$ à 6000\$ pour un nouveau système de déplacement, dépendamment de ses performances.

Esthétique :

L'esthétique s'évalue par une évaluation subjective d'une échelle de 1 à 10 qui sera à maximiser. Une appréciation de 7/10 est visée.

ANNEXE B

EXPLICATION DES COTES ET DES COMPROMIS/SYNERGIES

Ci-dessous, les synergies et compromis décelés sont brièvement expliqués.

Augmentation de la vitesse à l'horizontale et diminution de la consommation électrique

Il y a un compromis à faire entre la vitesse à l'horizontale et la consommation électrique puisque l'augmentation de la vitesse du robot implique généralement de moteurs plus forts. Ces moteurs consomment évidemment plus d'électricité.

Augmentation de la vitesse à l'horizontale et diminution de la masse

Ces deux spécifications techniques se complètent bien puisqu'une diminution de masse implique que les frictions internes du système seront moins grandes (proportionnelles à la force gravitationnelle). Des frictions internes moins grandes impliquent que les moteurs auront une plus grande partie du couple disponible pour atteindre des vitesses élevées.

Augmentation de la vitesse à l'horizontale et augmentation du facteur de sécurité

Il y a un compromis à faire entre la vitesse du robot et le facteur de sécurité. Un robot plus rapide sera sujet à recevoir des impacts plus énergétiques (la masse fois la vitesse au carré). Les pièces devront donc être plus résistantes pour supporter les pics de contraintes.

Augmentation de la vitesse à l'horizontale et diminution du coût

Il y a un compromis à faire entre la vitesse et le coût du robot. Effectivement, pour atteindre des vitesses élevées, le robot aura besoin de pièces de bonne qualité (moins de friction sur les parties rotatives, moteurs plus forts), qui sont plus chères.

Diminution de la consommation électrique et diminution de la masse

Ces deux spécifications techniques se complètent puisqu'une diminution de masse implique que les frictions internes du système seront moins grandes (proportionnelles à la force gravitationnelle). Des frictions internes moins grandes impliquent le système de locomotion sera plus efficient. Par conséquent, la consommation sera plus petite.

Diminution du volume et diminution de la masse

Ces deux spécifications techniques se complètent puisqu'une diminution de la masse du robot implique qu'il y a moins de matière occupant du volume.

Diminution du volume et augmentation de l'angle de renversement

Il y a un compromis entre ces deux spécifications puisque l'angle de renversement est déterminé par la hauteur du centre de masse et la distance entre les points d'appui extrêmes. Le volume est indirectement lié à la distance entre les points d'appui (dimensions externes) et par conséquent la réduction de ce dernier entraîne la réduction de la stabilité.

Diminution de la masse et diminution du coût

Ces deux spécifications techniques se complètent puisqu'une diminution de la masse du robot implique qu'il y a moins de pièces/composants à acheter.

Augmentation du facteur de sécurité et diminution du coût

Ces deux spécifications se nuisent puisque l'augmentation du facteur de sécurité implique soit des pièces dans un matériel de meilleure qualité, ou des pièces plus grosses, ces deux cas étant plus chers.

Diminution du coût et esthétisme

Ces deux spécifications se nuisent puisque des matériaux de meilleure qualité (et plus chers) sont souvent plus attrayants.

Ci-dessous, les cotes pour chaque attribut envers les spécifications techniques sont expliquées.

Être rapide :

- Cet attribut est directement proportionnel à la vitesse à l'horizontale. La vitesse horizontale est la spécification technique répondant le mieux à cet attribut. En effet, plus le robot est rapide, plus sa vitesse à l'horizontale sera élevée d'où la cote de 9;
- Cet attribut est inversement proportionnel à la consommation électrique, car plus la vitesse du robot va augmenter, plus le robot consommera d'énergie, d'où la cote de -3;
- Cet attribut est inversement proportionnel à la masse. En effet, plus la masse sera élevée, plus le robot aura de la difficulté à se déplacer, d'où la cote de -3;
- Cet attribut est inversement proportionnel au facteur de sécurité. Même si la corrélation est faible, plus le facteur de sécurité sera élevé, plus les composantes seront surdimensionnées pour résister aux contraintes et le robot aura plus de difficulté à se déplacer due au poids, d'où sa cote de -1.

Être économique en énergie :

- Cet attribut est inversement proportionnel à la vitesse horizontale. C'est-à-dire que plus la vitesse sera élevée, plus il consommera de l'énergie, d'où la cote de -3;
- Cet attribut est directement proportionnel à la consommation électrique. Cette spécification technique est celle ayant la corrélation la plus forte avec cet attribut. En effet, la consommation électrique est l'expression même de l'économie d'énergie, d'où la cote de 9;
- Cet attribut est directement proportionnel avec la masse du système. Même si la corrélation entre les deux est moins forte, moins la masse sera élevée, moins il aura besoin d'énergie pour se déplacer, d'où la cote de 3.

Être compact :

- Cet attribut est directement proportionnel avec le volume du système. Le volume est la spécification technique ayant la plus forte corrélation avec cet attribut. Effectivement, plus le volume est réduit, plus le système sera compact, d'où la cote de 9;
- Cet attribut est directement proportionnel avec la masse. Même si la corrélation est moins forte, plus la masse du système sera réduite, plus les composantes seront petites et donc le système sera alors plus compact, d'où la cote de 5;
- Cet attribut est inversement proportionnel à l'angle de renversement. Plus l'empattement du système sera réduit, moins son angle de renversement sera élevé, d'où la cote de -3.

Est facile à transporter :

- Cet attribut est directement proportionnel avec la consommation électrique du système. Même si la corrélation est faible, moins le robot consommera de l'énergie, moins il sera nécessaire de disposer de batterie, donc de réduire la masse du système, d'où la cote de 1;
- Cet attribut est directement proportionnel avec le volume, car plus le volume sera réduit, plus il sera facile à transporter, d'où la cote de 5;
- Cet attribut est directement proportionnel avec la masse. En effet, cette spécification technique possède la corrélation la plus élevée avec cet attribut, car plus la masse sera réduite, plus il sera facile à transporter, d'où la cote de 9.

Est durable :

- Cet attribut est inversement proportionnel à la vitesse horizontale. Effectivement, plus la vitesse horizontale augmente, moins le système sera durable, car il sera soumis à plus de contraintes, d'où la cote de 3;
- Cet attribut est directement proportionnel avec le facteur de sécurité. Cette spécification technique possède la corrélation la plus forte avec cet attribut étant donné que plus le facteur de sécurité sera élevé lors de la conception, plus le système sera durable, d'où la cote de 9.

Est stable :

- Cet attribut est inversement proportionnel au volume. Même si la corrélation est faible, plus le volume sera diminué, moins le système sera stable, d'où la cote de -1;
- Cet attribut est directement proportionnel à l'angle de renversement. Avec la corrélation la plus forte, plus l'angle de renversement sera élevé, plus le produit sera stable, d'où la cote de 9.

Est abordable :

- Cet attribut est inversement proportionnel à la vitesse horizontale. En effet, plus la vitesse horizontale sera élevée, moins le produit sera abordable, d'où la cote de -3;
- Cet attribut est inversement proportionnel à la consommation électrique. Même avec une corrélation faible, plus le produit consommera de l'énergie, moins il sera abordable, car il nécessitera plus de composantes, d'où la cote de -1;
- Cet attribut est directement proportionnel, mais avec une corrélation faible. Effectivement, plus le volume sera réduit, il y aura alors moins de composantes et alors le produit sera plus abordable, d'où la cote de 1;
- Cet attribut est directement proportionnel avec la masse. En effet, plus la masse sera faible, plus le produit sera abordable dû à la réduction de matière, d'où la cote de 3;
- Cet attribut est inversement proportionnel au facteur de sécurité. Plus le facteur de sécurité sera élevé, plus le produit sera conçu en excédant les performances, ce qui va le rendre moins abordable, d'où la cote de -3;
- Cet attribut est directement proportionnel au coût. Plus il est abordable, moins les coûts seront élevés, d'où la cote maximale de 9;
- Cet attribut est inversement proportionnel à l'esthétisme. Même avec une faible corrélation, plus l'esthétique sera améliorée, moins le produit sera abordable, d'où la cote de -1.

Est attrayant :

- Cet attribut est directement proportionnel à l'esthétique d'où la cote de 9.

ANNEXE C DESSINS DES CONCEPTS

Dans cette section, les différents dessins des 15 concepts filtrés auparavant sont illustrés.

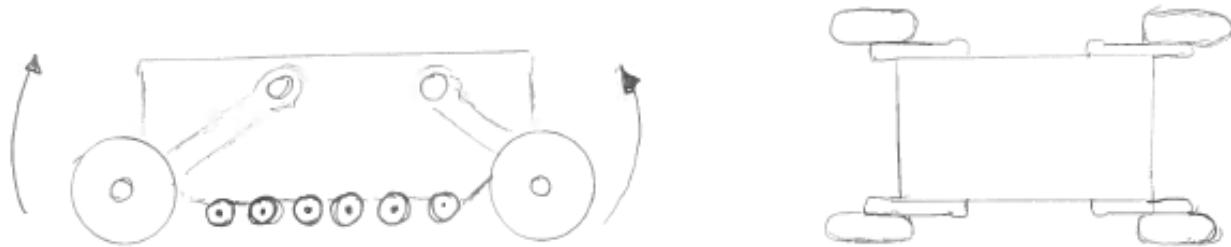


Figure C.1 Croquis préliminaire du concept #1

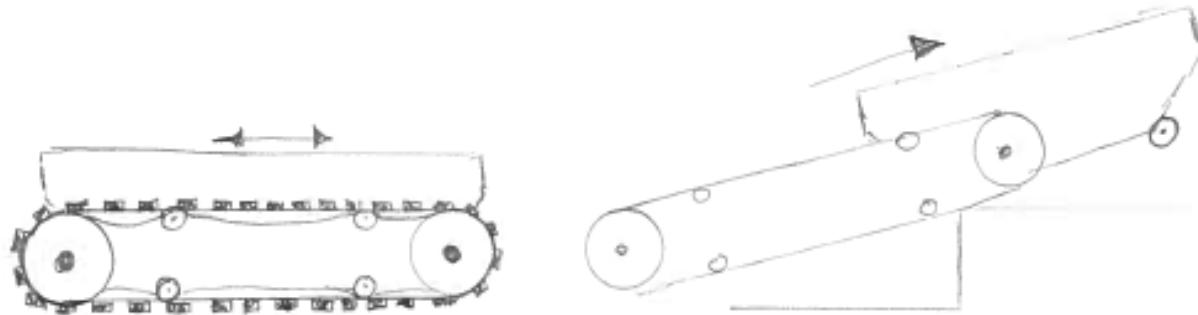


Figure C.2 Croquis préliminaire du concept #2



Figure C.3 Croquis préliminaire du concept #3

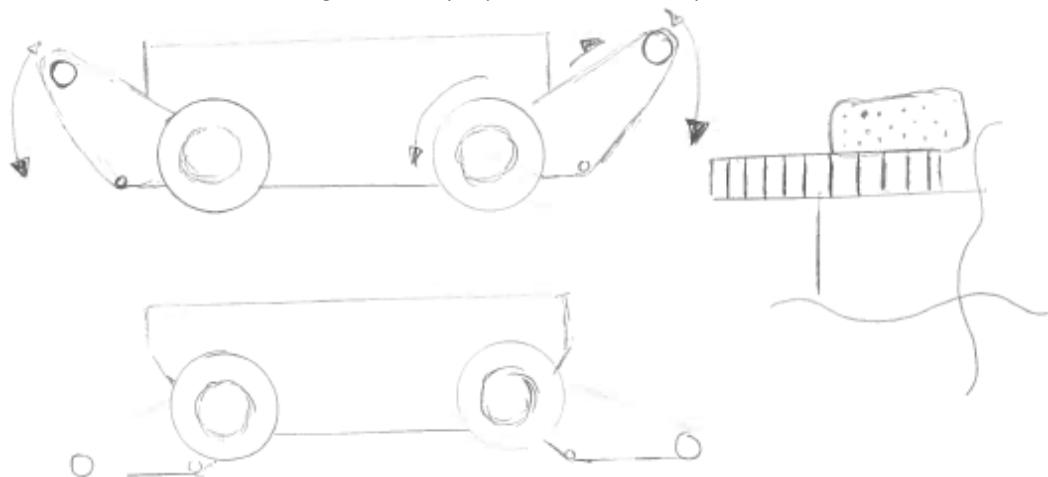


Figure C.4 Croquis préliminaire du concept #4

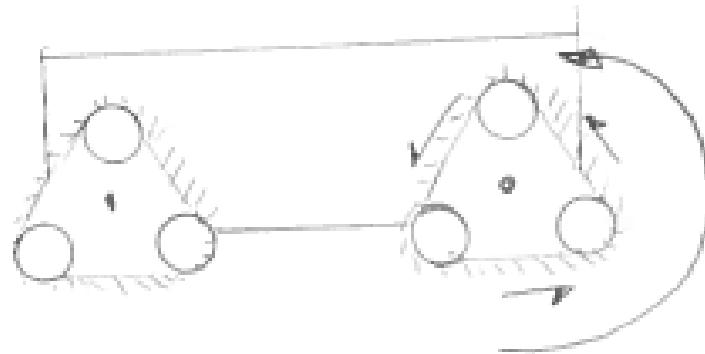


Figure C.5 Croquis préliminaire du concept #5

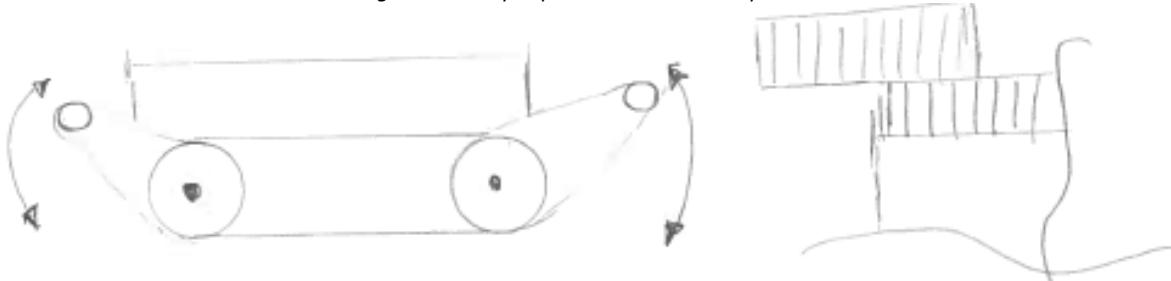


Figure C.6 Croquis préliminaire du concept #6

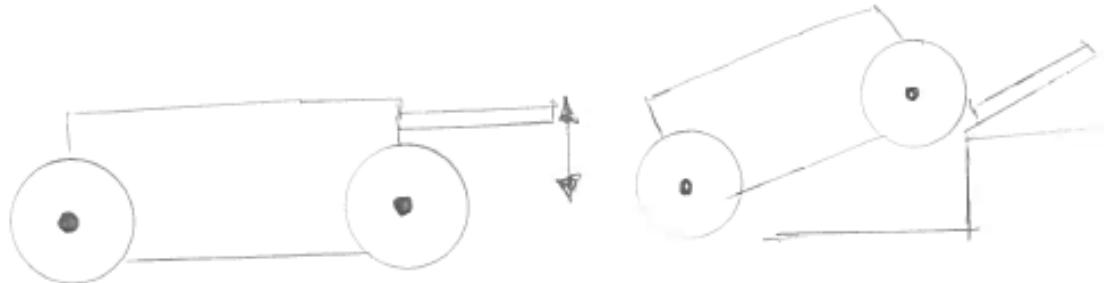


Figure C.7 Croquis préliminaire du concept #7

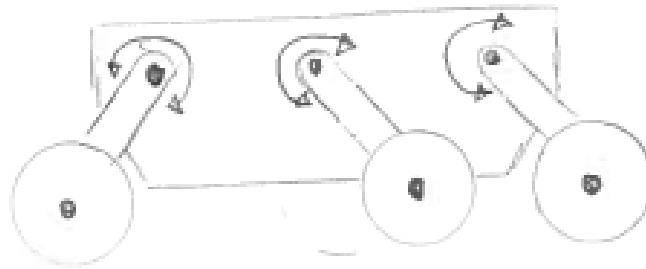


Figure C.8 Croquis préliminaire du concept #8

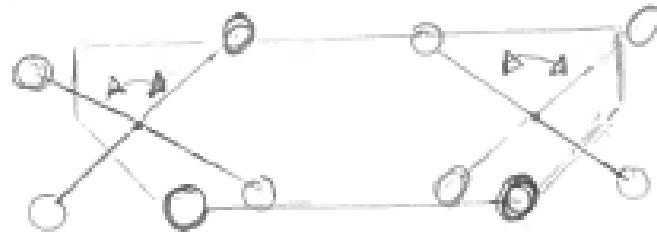


Figure C.9 Croquis préliminaire du concept #9

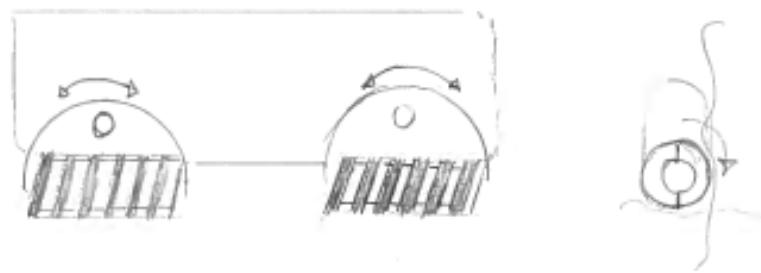


Figure C.10 Croquis préliminaire du concept #10

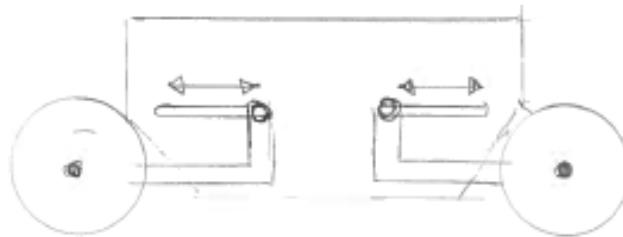


Figure C.11 Croquis préliminaire du concept #11



Figure C.12 Croquis préliminaire du concept #12

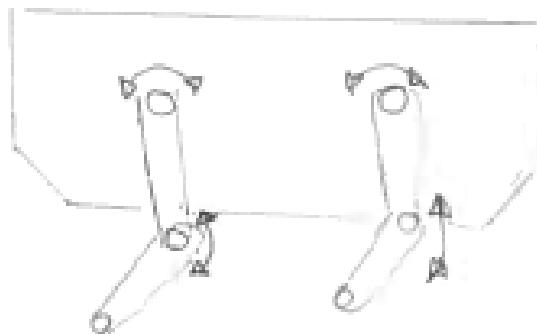


Figure C.13 Croquis préliminaire du concept #13

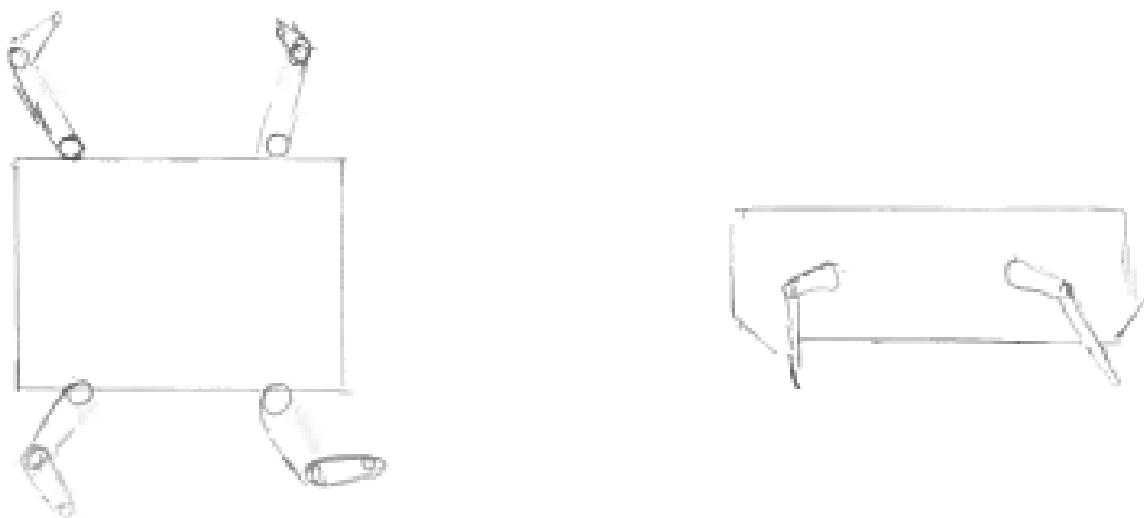


Figure C.14 Croquis préliminaire du concept #14

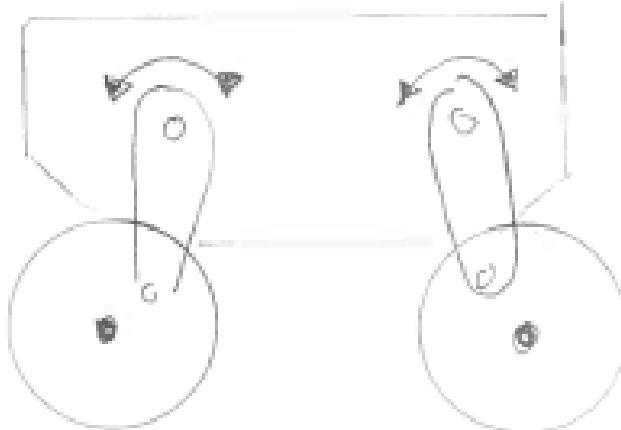


Figure C.15 Croquis préliminaire du concept #15

ANNEXE D

DÉTAILS DE LA CONFIGURATION DE LA TRANSMISSION DU LEVIER

D.1. Demi vis sans fin

Voici les principales fonctionnalités de la configuration de demi vis sans fin :

- **Transformation du mouvement**

La vitesse de rotation à la sortie du train planétaire est réduite de 118RPM à 2.95RPM pour le levier. Cela représente un moment disponible pour le levier de 162.5 Nm, en considérant une efficience de 60% pour le mécanisme à la sortie. Le levier serait capable de lever 1.1 fois le poids du robot au bout du levier. Le levier parcourt sa course complète en 9.2 secondes.

- **Coût**

Le coût de cette configuration est principalement influencé par le moteur (2x 50\$) et les engrenages (2x 50\$ et 1x 120\$). Ceux-ci totalisent 320 \$ par côté à eux seuls. Le restant du montage spécifique peut être estimée à environ 100\$ additionnels.

- **Compacité**

Cette configuration s'intègre bien à l'assemblage et représente une épaisseur de 1.5 po additionnels. Seul le moteur occupe un grand espace, mais il n'est pas vraiment problématique pour l'instant. Au besoin, il sera possible de le mettre à 90° le long du levier avec un montage d'engrenages coniques.

- **Étendue du mouvement**

La course du levier est d'environ 120 degrés, avant que les différents éléments entrent en collision, ce qui est entièrement satisfaisant.

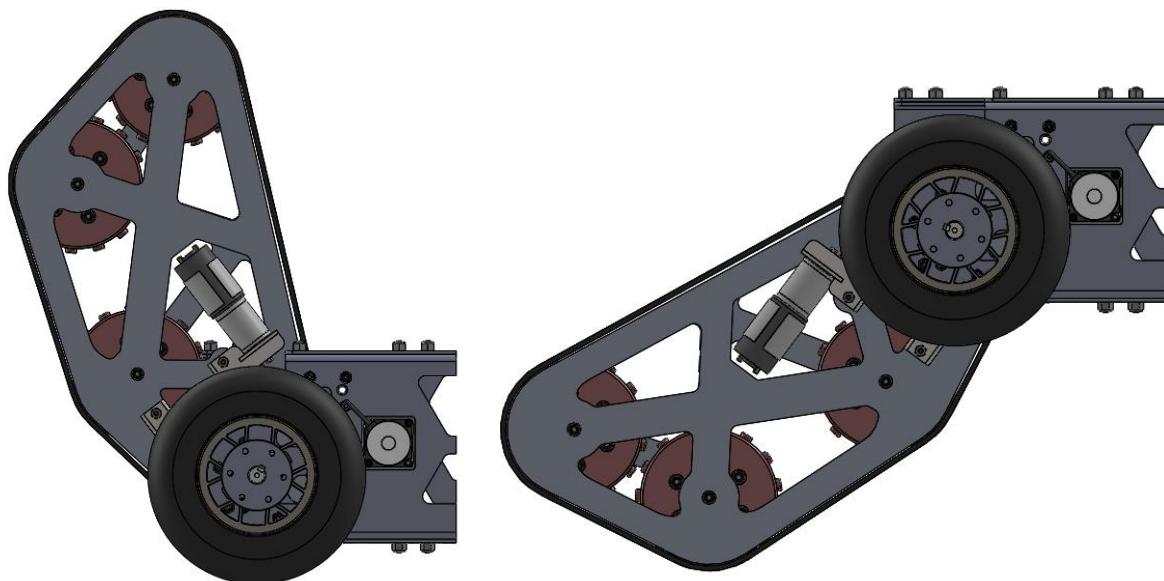


Figure D.1 Étendue du mouvement de la demi-vis sans fin

- **Résistance mécanique**

La résistance mécanique de cette configuration est estimée comme plutôt élevée, puisqu'il n'est pas nécessaire d'ajouter beaucoup de pièces ni d'enlever beaucoup de matière sur le support pour faire de l'espace aux composantes essentielles.

- **Facilité d'assemblage**

Cette configuration est facile à assembler, puisque les différentes composantes ont des méthodes de fixation simples et n'entrent pas en conflit avec l'assemblage du châssis puisqu'elles ne sont qu'attachées qu'à deux pièces, indépendamment.

- **Durabilité**

Cette configuration a une composante d'usure : la roue de la vis sans fin. Cette dernière risque de s'user prématurément si du sable ou de la poussière se retrouve dans l'engrenage.

- **Efficience**

Cette configuration a une efficience moyenne, à cause de la vis sans fin, qui est connue pour un bas rendement. Cependant, l'auto-blocage du mécanisme rend la consommation nulle lorsque le levier n'est pas en mouvement.

- **Nombre de pièces**

Cette configuration a un nombre de pièces moyen et le montage de la vis sans fin représente un sous-assemblage à lui seul.

D.2. Vis sans fin avec poulie et ressort

Voici les principales fonctionnalités de la configuration de la vis sans fin avec poulie et ressort :

- **Transformation du mouvement**

Cette configuration transmet le mouvement de rotation du moteur par deux transformations, cependant, un couple résistif est appliqué par le ressort afin de garder la tension dans la corde réduit le couple utile du moteur lorsque celui-ci fait descendre le levier. Un avantage de cette configuration est la forme complexe que l'on peut donner à la poulie de support autour de l'arbre afin d'avoir un ratio de réduction variable en fonction de l'angle. On pourrait estimer les performances un peu moindres à la configuration 1 à cause de la perte dans le ressort.

- **Coût**

Le coût de cette configuration est principalement influencé par le moteur (2x 50\$), les engrenages (2 kits de 30\$). Le restant du montage spécifique peut être estimée à environ 200\$ additionnels pour les poulies et les roulements.

- **Compacté**

Cette configuration est extrêmement compacte, puisque la corde est très peu épaisse et les composantes peuvent être positionnées de façon à utiliser les espaces vides plus loin du point de pivot.

- **Étendue du mouvement**

La course du levier est d'environ 120 degrés, avant que les différents éléments entrent en collision, ce qui est satisfaisant. Des guides supplémentaires pour les ressorts et les cordes pourraient être utilisés afin d'élargir la zone d'action du mécanisme

- **Résistance mécanique**

Cette configuration a une résistance mécanique inférieure à cause de sa grande quantité de pièces essentielles.

- **Facilité d'assemblage**

Cette configuration est plus difficile à assembler à cause de ses nombreuses pièces et à cause du ressort à tendre manuellement.

- **Durabilité**

Cette configuration est moins durable à cause de ses nombreuses pièces et parce qu'il est possible de mêler la corde de tension.

- **Efficiency**

Cette configuration est moins efficiente à cause du ressort forçant contre le moteur dans un sens.

- **Nombre de pièces**

Le nombre de pièces de cette configuration est plutôt élevé afin de guider et attacher les cordes en plus du montage de poulie d'enroulement.

D.3. Vérin électrique

Voici les principales fonctionnalités de la configuration de la vis sans fin avec poulie et ressort :

- **Transformation du mouvement**

La force du vérin fait un moment sur le levier. Toutefois la distance varie en fonction de l'extension et il est difficile d'avoir une bonne distance de levier sans que le vérin n'obstrue le levier à quelque part dans sa course.

- **Coût**

Cette configuration est plutôt chère, car les vérins sont plutôt dispendieux (300\$ chaque). Cependant, il n'y a pas d'autre éléments dispendieux dans cette configuration.

- **Compacté**

Cette configuration n'est vraiment pas compacte puisque le vérin est très grand par rapport à sa course.

- **Étendue du mouvement**

Cette configuration a une faible étendue de mouvement à cause de la taille du vérin. L'étendue du mouvement est illustrée à la figure suivante.

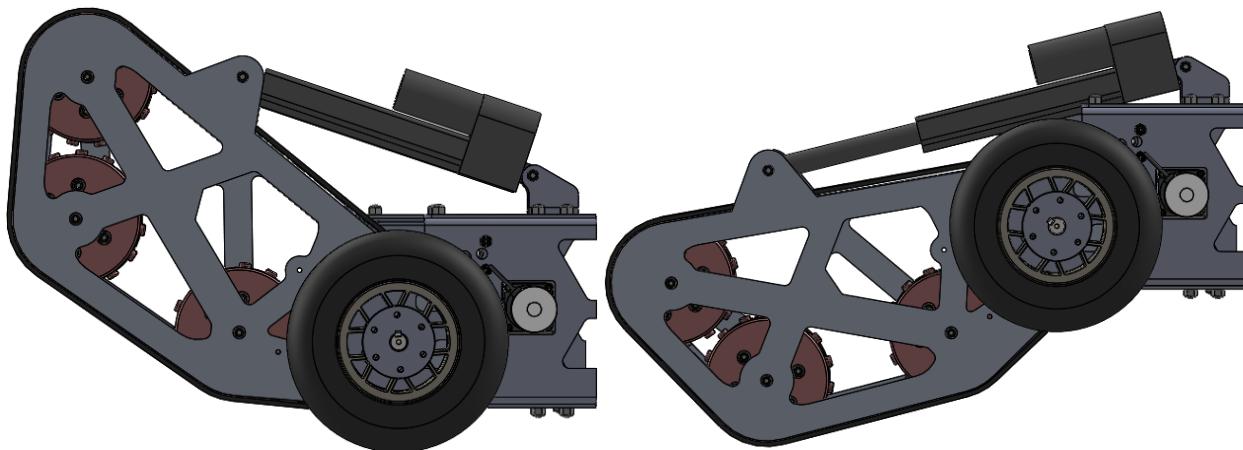


Figure D.2 Étendue du mouvement du vérin

- **Résistance mécanique**

Cette configuration a une bonne résistance mécanique à cause de sa simplicité.

- **Facilité d'assemblage**

Cette configuration est très facile à assembler à cause de sa petite quantité de pièces.

- **Durabilité**

Cette configuration est très durable à cause de sa faible quantité de pièce et de l'actuateur industriel choisi.

- **Efficience**

Cette configuration est plus efficiente à cause de l'utilisation d'un actuateur industriel fermé et lubrifié.

- **Nombre de pièces**

Cette configuration ne possède que trois pièces supplémentaires essentielles, soit le vérin et les deux goupilles de pivot.

ANNEXE E

CALCULS D'ÉLÉMENTS DE MACHINE

E.1. Clavettes

Arbre moteur

Dimensions de l'arbre moteur :

- Diamètre (d) : 0.75 pouce (19.05 mm)

Dimension de la clavette :

- Largeur/Hauteur (b) : 0.1875 pouce (4.7625 mm)
- Longueur (L) : 0.5 pouce (12.7 mm)

Torque maximal ressenti :

- Torque (T) : 40 000 Nmm

Calcul contrainte de cisaillement (σ_s) ressentie dans la clavette

$$\sigma_s = \frac{T}{b*L*(\frac{d}{2})}$$

$$\sigma_s = \frac{40000 \text{ Nmm}}{4.7625 \text{ mm} * 12.7 \text{ mm} * (\frac{19.05 \text{ mm}}{2})}$$

$$\sigma_s = 69.43 \text{ MPa}$$

Calcul contrainte de compression (σ_c) dans la clavette

$$\sigma_c = \frac{T}{(\frac{b}{2})*L*(\frac{d}{2})}$$

$$\sigma_c = \frac{40000 \text{ Nmm}}{(\frac{4.7625 \text{ mm}}{2}) * 12.7 \text{ mm} * (\frac{19.05 \text{ mm}}{2})}$$

$$\sigma_c = 138.86 \text{ MPa}$$

Les propriétés mécaniques de la clavette sont alors :

Acier AISI 1045 (laminé à chaud) (% moyen de carbone)	Tension	655
	Compression	(-)655
	Cisaillement	483

E.2. Worm Gears

<u>Gear</u>	<u>Worm</u>	<u>Torque motor</u>	
$n_G = 40$	$n_w = 13 \text{ RPM}$	\uparrow	$P_x = P_T = \frac{P}{\eta} = 0,31416$
$\phi_h = 14,5^\circ$	$d_w = 1,05''$		$C = \frac{d_G + d_w}{2} = \frac{9'' + 1,05''}{2} = 5,025$
$d_G = 4''$	$P = 10$		
$F = 5/8''$	$\text{Puissance moteur} = \frac{12,27 \cdot 57270,84 \text{ N-mm}}{60} = 0,0965 \text{ hp}$		$L = P_x \cdot n_w = 0,3907$
$P = 10$			$1,05''$
			$\lambda = \tan^{-1} \left(\frac{L}{n_w d_w} \right) = 5,71^\circ$
			$\Rightarrow n_G = \frac{1,05}{40} \cdot n_w = 0,375 \text{ RPM}$
			$V_w = \frac{n_w \cdot d_w}{12} = 3,9269 \text{ ft/min}$
			$V_G = \frac{n_G \cdot d_G}{12} = 0,3906 \text{ ft/min}$
			$V_s = \frac{V_w}{\cos(\lambda)} = \frac{3,9466 \text{ ft/min}}{\cos(5,71^\circ)}$
$f = 0,08$			
$W_{tg} = W_G \cdot \frac{\cos \phi_h \sin \lambda + f \cos \lambda}{\cos \phi_h \cos \lambda - f \sin \lambda} = 149,3266 \text{ f}$			
$W_{wf} = \frac{f \cdot W_{tg}}{f \sin \lambda - \cos \phi_h \cos \lambda} = -67,9166 \text{ f}$			
$W_{all} = C_s \cdot D^{0.8} F_e \cdot C_m \cdot C_v = 1182,64 \text{ lbf}$			
$C_s = 1000$	$C = 0,5929$		
$C_m = 1,7524$	$F = 5/8$		
$C_v = 0,6561$			
$P_n = P_f / \cos(\lambda) = 10,049$	$\Rightarrow \sigma = \frac{W_{tg}}{P_x \cdot F \cdot 0,1} = 41,5 \text{ ksi}$	$\Rightarrow SF = \frac{\sigma_{all}}{\sigma} = \frac{60,53}{41,5} = 1,458$	
$P_x = \frac{P}{P_n} = 0,3126$			
$\phi_h = 14,5^\circ$	$y = 0,1$	$\sigma_{all} \cdot \frac{W_{all}}{P_x F \cdot 0,1} = 60,53 \text{ ksi}$	

E.3. Roulements

$$\Rightarrow N = 100 \text{ RPM}$$

Fiabilité = 99%

$H_R = 10000 \text{ h}$

$$\text{Charge maximale} \Rightarrow F_R = 45,54 \cdot 9,81 = 446,74 \text{ N}$$

$$- F_E = X \cdot V \cdot F_R + Y \cdot F_A \Rightarrow \text{axiale Séclement} \Rightarrow F_E = F_R$$

$$H_{10} = \frac{10000}{0,02 + 4439 \cdot \ln\left(\frac{1}{R}\right)^{1/1,483}} = 45539 \text{ h}$$

↳ 99%

$$\Rightarrow C_{10} = F_E \cdot \left[\frac{60 \cdot H_{10} \cdot N}{10^6} \right]^{1/3} ; N = 100 \text{ RPM}$$

$$\Rightarrow C_{10} = 2,89 \text{ kN}$$

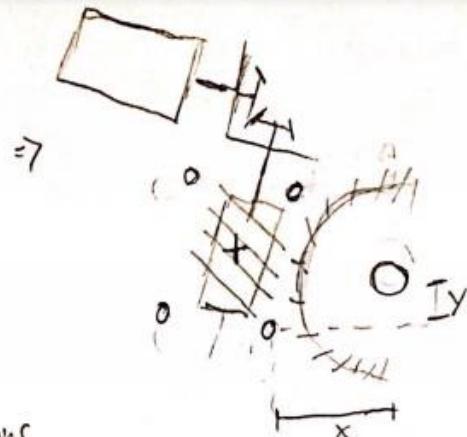
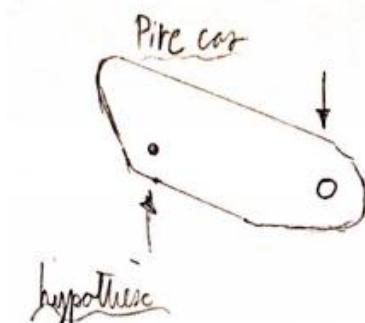
\Rightarrow Roulement utilisé, capacité maximale de 1300 lbf dynamic et 1000 lbf statique

$$\Rightarrow F_{\text{dynamic}} = \frac{5,78 \text{ AN}}{2,89 \text{ KN}} = 2$$

$$F_{\text{statique}} = \frac{4,45 \text{ AN}}{0,44674} = 9,96$$

E.4. Boulons de l'assemblage de la vis sans fin

Calcul boulons



- Charge répartie aux 4 boulons

$$\begin{aligned} & \text{Free body diagram: } F_R \text{ at top-left, } F_i \text{ at bottom-left, } R \text{ at center.} \\ & \sum F_y = 0 = -45,54 f_y \cdot 9,81 + R \\ & \Rightarrow R = 446,747 N \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Free body diagram: } F_R \text{ at top-left, } F_i \text{ at top-right, } M_A = 0 \text{ at center.} \\ & \sum M_A = 0 = 446,747 \cdot 293,57 - F_i \cdot 78,17 \\ & \Rightarrow F_i = 1677,78 N \end{aligned}$$

$$F_{\text{boulon}} = \frac{F_i}{4} = 419,443 N$$

Cisaillement Simple

$$\tau = \frac{F}{A_r} = \frac{419,443}{7,716} = 54,36 \text{ MPa} \Rightarrow FS = \frac{S_{sy}}{\tau} = 4,57$$

Point milieu

x	y
78,17	13,78

Stud 8-32 classe 1

$$\begin{aligned} A_r &= 7,716 \text{ mm}^2 \\ A_t &= 9,03 \text{ mm}^2 \\ S_p &= 227,527 \text{ MPa} \\ S_{sy} &= 248,24 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{UT} &= 413,68 \text{ MPa} \\ E &= 200000 \text{ MPa} \\ L &= 38,1 \text{ mm} \\ d &= 4,166 \text{ mm} \end{aligned}$$

Serrage

$$F_i = 0,6 \cdot S_p \cdot A_t = 1232,7 \text{ N}$$

$$T = 0,2 \cdot F_i \cdot d = 1027,1 \text{ Nmm}$$

$$\tau_c = \frac{16 T_b}{\pi d^3} \quad T_b = 0,5 \cdot T = 513,56 \text{ Nmm}$$

$$\tau_a = 150,7 \text{ MPa} \Rightarrow \tau_{\text{total}} = \tau_a + \tau_c = 205,063 \text{ MPa}$$

$$\sigma = \frac{F_i}{A_t} = 136,52 \text{ MPa}$$

$$\sigma_I = \frac{\sigma}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2} = 284,39 \text{ MPa}$$

$$\sigma_I = \frac{S_u t}{F_S} \Rightarrow F_S = 1,45$$

Souffre

Contact aluminium-aluminium $\mu = 1,35 \Rightarrow F_i \cdot \mu > F_{\text{boulon}} \Rightarrow \text{aucun glissement}$

ANNEXE F

ANALYSE PAR ÉLÉMENTS FINIS DE L'ARBRE PRINCIPAL

Afin de pouvoir confirmer les facteurs de sécurité attendus de l'arbre, une analyse par éléments finis est effectuée sur ANSYS Workbench.

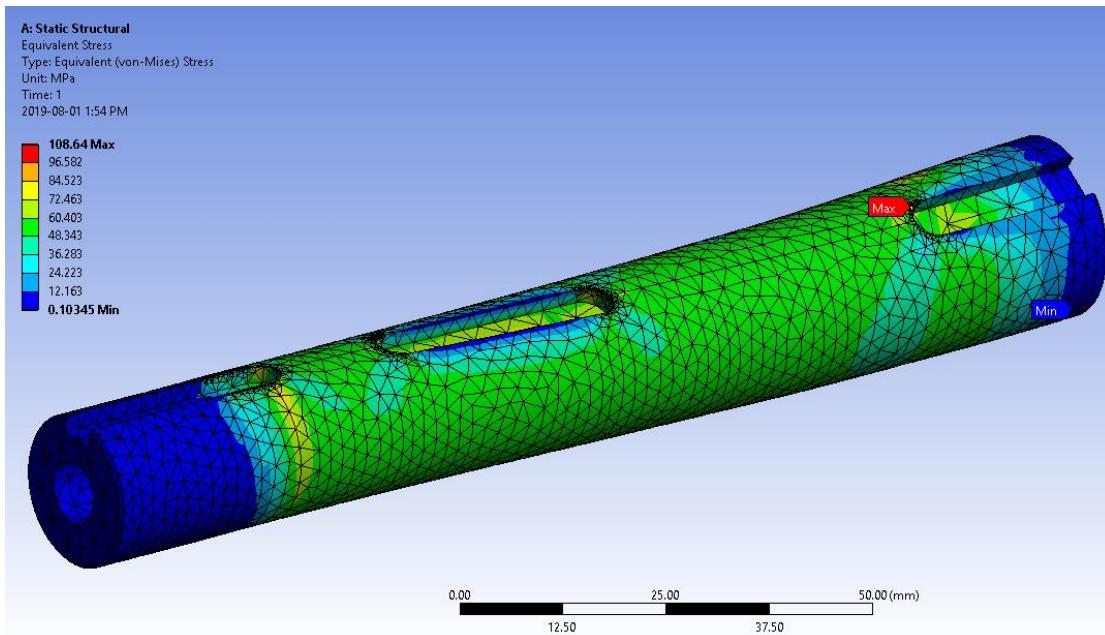


Figure F.1 Modèle convergé ANSYS de l'arbre principal en chargement sur roue

En premier lieu, une analyse de convergence est effectuée afin de confirmer la validité du modèle. Pour arriver à cette fin, le modèle est soumis à un même chargement et l'évolution de la contrainte maximale pour un raffinement de maillage est étudiée. Le résultat de cette analyse est illustré à la figure ci-dessous.

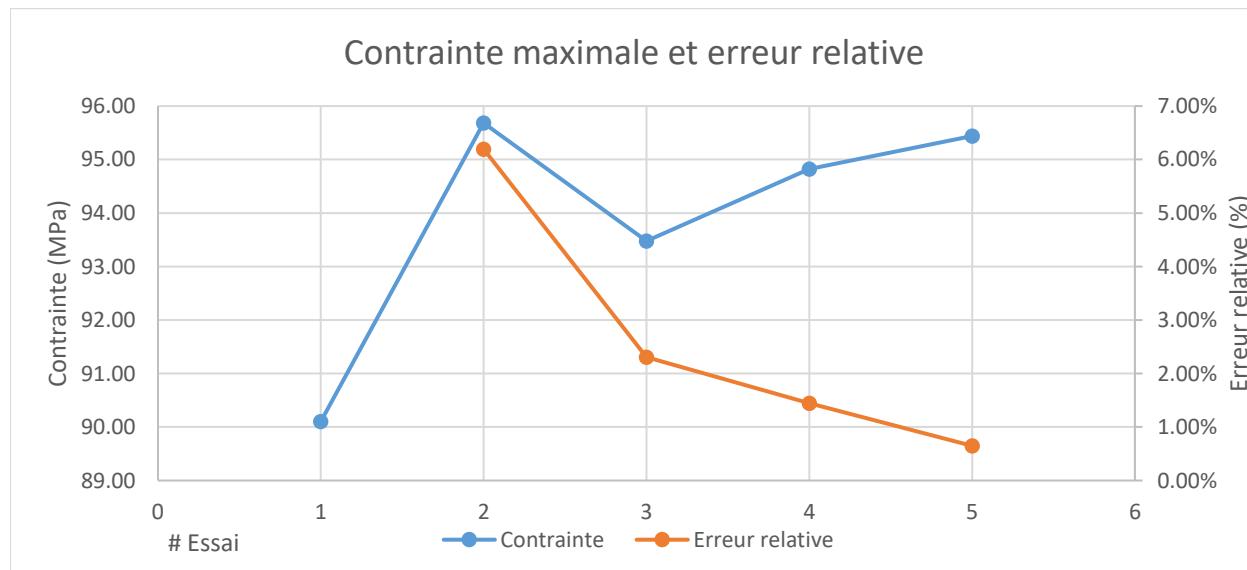


Figure F.2 Contrainte maximale et erreur relative en fonction du maillage

Les tailles d'éléments pour les essais de la Figure F.2 sont respectivement 1mm, 0.5mm 0.2mm, 0.1mm et 0.05mm.

Les résultats des analyses Workbench sont dans le tableau ci-dessous. L'acier utilisé est un 1045 avec une contrainte d'écoulement de 530 MPa.

Tableau F.1 Résultat de l'analyse par élément fini de l'arbre principal

Cas de chargement	Contrainte maximale (Von-mises, MPa)	Facteur de sécurité	Lieu
Poids sur la roue	108.6	4.88	Manchon de roue
Poids sur la chenille	96.8	5.48	Manchon de chenille

Le résultat de l'analyse pour le poids sur la chenille est à la figure ci-dessous.

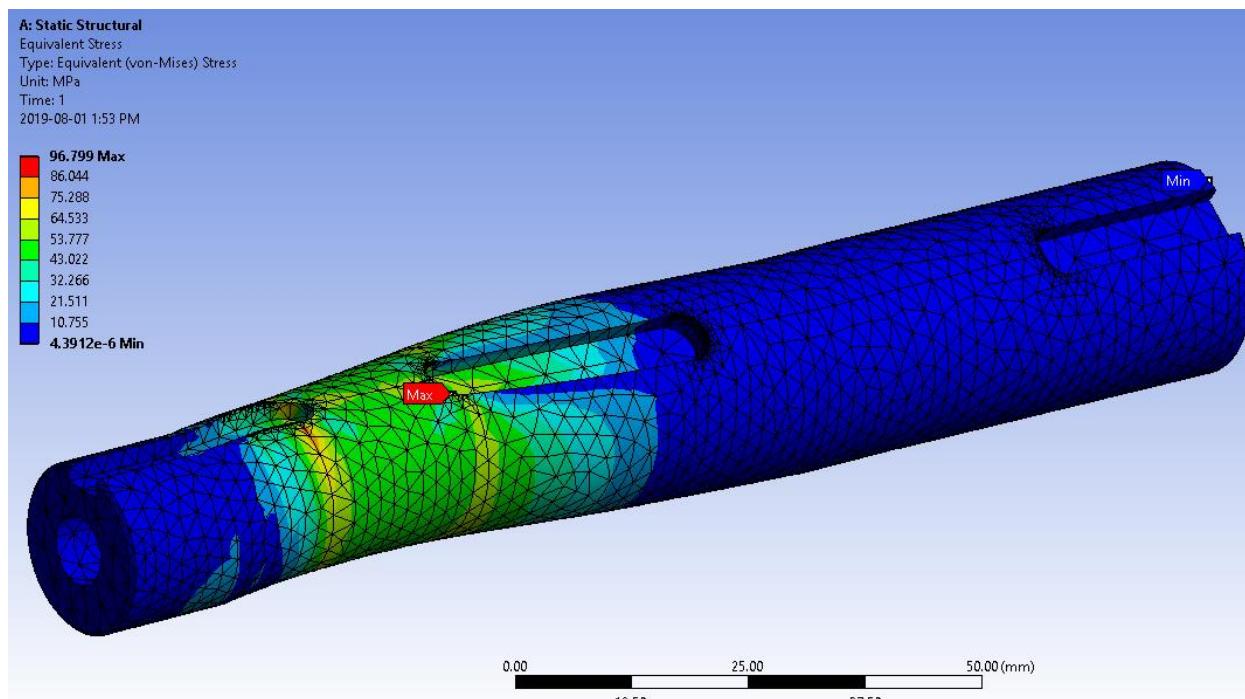


Figure F.3 Modèle convergé ANSYS de l'arbre principal en charge sur chenilles

ANNEXE G

CALCULS DE FATIGUE POUR LES PLAQUES

Le matériau du modèle analysé des plaques est de l'aluminium 2024 T6. On peut estimer que la limite d'endurance équivaut à :

$$Se' \simeq 0.4 * Sut$$

À l'aide de l'équation de Marin, on estime la limite d'endurance de la pièce par :

$$Se = ka * kb * kc * kd * ke * kf * Se'$$

Le facteur de fini de surface, Ka, est estimé en tenant compte que les plaques sont rectifiées ou meulées.

$$ka = a * Sut^b \text{ où } a = 1.58 \text{ et } b = -0.085$$

$$ka = 1.017$$

L'influence de la grosseur de pièce est estimée par le critère de grosseur, Kb, estimé par 1 puisque la charge est axiale.

$$kb = 1$$

Le facteur de charge, Kc, est estimé à l'aide de l'équation 6-26 du Shigley's Mechanical Engineerign Design. La force est considérée axiale.

$$kc = 0.85$$

Le facteur de température est estimé à 1 puisque le robot est opéré à température ambiante.

$$kd = 1$$

Pour le facteur de fiabilité, on estime la fiabilité à 95% ce qui donne un facteur de 0.868.

$$ke = 0.868$$

Le facteur Kt, facteur de contrainte en fatigue, est estimé à 1 puisqu'il n'y a aucune entaille.

$$kf = 1$$

Donc, la limite d'endurance de la pièce est de : $Se = 133.85 \text{ MPa}$

Les contraintes normales sont ensuite calculées avec les contraintes maximales et minimum sondées aux zones A et B.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \text{ et } \sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

Selon le diagramme de GoodMan modifié, deux zones sont prises en compte. La zone délimitée par la ligne de Goodman et celle délimitée par la ligne de résistance d'écoulement. Dans notre cas, les contraintes se retrouvent dans la zone 1. Donc l'équation pour trouver les facteurs de sécurité est :

$$FS = \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}}$$

Les facteurs de sécurité résultants sont présentés dans le tableau ci-dessous avec la Figure G.1 qui présente les contraintes dans un graphique de Goodman modifié.

Tableau G.1 Facteurs sécurité aux zones identifiées pour les deux configurations

		Sonde			
		A-2	B-2	A-1	B-1
FS		2.29	1.84	0.89	0.98

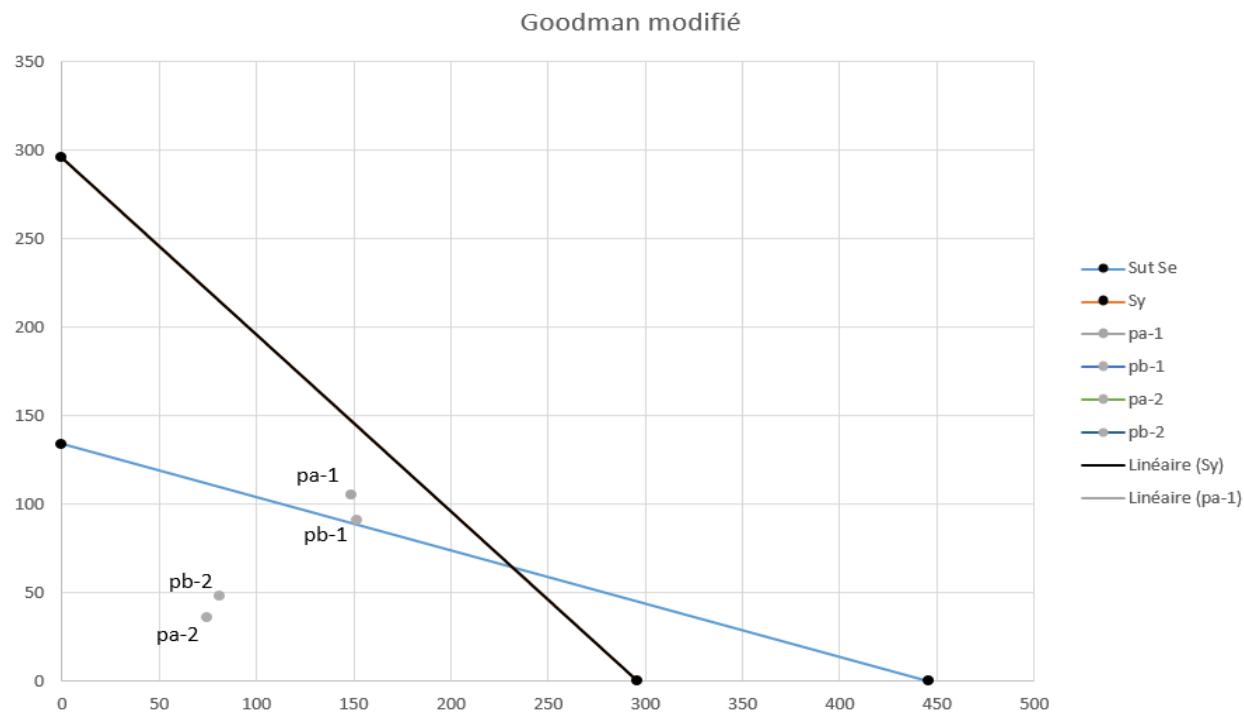
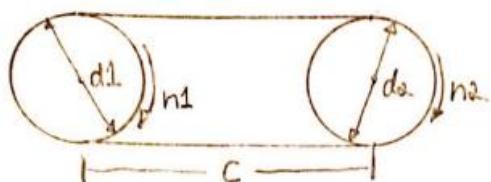


Figure G.1 Diagramme de Goodman modifié avec contraintes résultantes

Les points représentés sur le graphique sont les coordonnées des contraintes pour chacune des zones à risque. On remarque que la première itération dépasse la limite de Goodman. La deuxième itération présente des facteurs de sécurité se rapprochant du facteur de sécurité voulu.

ANNEXE H CALCULS DE SÉLECTION POUR LES CHAINES



$$P = 350W$$

#1 Puissance effective

$$\bar{P} = k_s \cdot P$$

$k_s = 1,5$ (moteur électrique, machine génératrice à chocs sévères, renversement de la charge, conditions difficiles) \Rightarrow Tableau 15.9, Drouin & al, Éléments de machine Polytechniques, 1986

$$\Rightarrow \bar{P} = 1,5 \cdot 350W = 525W = 0,70hp$$

#2 Choix de la chaîne

Tableau 15.13 Trois choix possibles: #40-1 Pour calculs, choix #40-1
#35-2
#35-3

#3 Nombre de dents pignon moteur

$$PR' = \frac{P \cdot k_s}{k_a} \quad k_a = 1 \cdot (\text{nombre de rang} = 1) \Rightarrow \text{Sections-24, MEC528 - Éléments de machines}$$

$$\Rightarrow PR' = P = 0,70hp \quad \text{Tableau 15.1} \Rightarrow N_1 = 18 \text{ dents (100RPM, 0,75hp)}$$

#4 Nombre de dents roue

$$RV = \frac{N_2}{N_1} = 1 \Rightarrow N_2 = N_1 = N = 18 \text{ dents.}$$

#15 Longueur de chaîne

Entraxe $C = 5,22p_0 = 132,54\text{mm}$ (Conception préliminaire)

5.1 estimation de la longueur

$$440 \Rightarrow p = 0,5p_0 = 12,7\text{mm}$$

$$L = 2C + p \cdot \frac{(N_1 + N_2)}{2} + \frac{p^2}{C} \left(\frac{N_2 - N_1}{2R} \right)^2 = 193,68\text{mm} = 19,44p_0$$

5.2 Longueur exprimée en maillon

$$L_m = \frac{L}{P} = \frac{2C}{P} + \frac{N_1 + N_2}{2} + \frac{(N_2 - N_1)^2}{4R^2(C/P)} = 38,27 \Rightarrow 40 \text{ (préférable nombre pair)}$$

5.3 ajustement de la longueur

$$L = L_m \cdot p = 40 \cdot 12,7 = 508\text{mm} = 20p_0$$

5.4 ajustement de l'entraxe

$$C_m = \frac{C}{P} = \frac{L_m}{4} - \frac{(N_1 + N_2)}{2} + \sqrt{\left(\frac{L_m}{4} - \frac{N_1 + N_2}{8} \right)^2 - \frac{(N_2 - N_1)^2}{8R^2}}$$

$$C_m = 11$$

$$\Rightarrow 30 \leq C_m \leq 50 \quad \text{Selon l'espace disponible du concept, } C \leq 200\text{mm}$$

$$\Rightarrow C_m = 15 = \frac{C}{P} \Rightarrow C = 190,5\text{mm}$$

Le compromis

#16 Vérification de l'angle d'enroulement

$$\Theta = 180^\circ - 2 \sin^{-1} \left(\frac{dp_2 - dp_1}{2C} \right) \quad dp_1 = dp_2 = dp$$

$$dp = \frac{p \cdot N_1}{R} = 72,77\text{mm}$$

$$\Rightarrow \Theta = 180^\circ$$

Le Ok!

#7 Vérification de la résistance

$$FS = \frac{F_{\text{rupture}}}{F_1 + F_C}$$

$$F_{\text{rupture}} = 86.2 \cdot p^2 = 13950 \text{ N}$$

$$F_1 = 1000 \cdot \frac{P}{V} \quad \text{où } V = \frac{n \cdot p \cdot N}{60 \cdot 1000} = 0.381 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\Rightarrow F_1 = 918.635 \text{ N} \quad \text{Pm KW}$$

$$F_C = \rho \cdot V^2 \quad \rho = 0.60 \text{ kg/m}^3$$

$$F_C = 0.087 \cdot 10^3 \rightarrow \text{négligeable}$$

$$\Rightarrow FS = \frac{F_{\text{rupture}}}{F_1} = 15.9$$

Pression Ps doit être inférieure à Padm

$$A_r = 44 \text{ mm}^2 \quad \text{négligeable}$$

$$Ps = \frac{F_1 + F_C}{A_r} = 20.88 \text{ MPa}$$

$\Rightarrow PS < Padm \rightarrow \text{OK!}$

$$Padm = \frac{13950 \text{ N}}{44} = 316.36 \text{ MPa}$$

ANNEXE I

MODIFICATIONS APPORTÉES DEPUIS LE RAPPORT #1

Ci-dessous, les modifications apportées suite à la correction du premier rapport sont listées :

- **Page Titre :**
Reformatage de la page titre et ajout du titre de projet
- **Analyse du problème :**
Ajout des éléments manquants dans la présentation de l'analyse du problème : la recherche de solution ainsi que le choix de la solution finale
- **Description du produit :**
Ajout d'une image du robot actuel du club CAPRA pour mieux comprendre le produit final.
- **Objectif corporatif :**
Redéfinition de l'objectif corporatif.
- **Besoins et Attentes :**
Reformulation de la liste des besoins en évitant le mot « doit », pour une éventuelle confusion avec les contraintes.
- **Contraintes :**
Spécification plus précise de la première contrainte.
- **Concept 1 : Rover**
Modification de la justification pour le facteur de sécurité.

ANNEXE J

DOCUMENTATION D'INGÉNIERIE

Sur les prochaines pages, les différents documents d'ingénierie qui ont été produits sont compilés afin d'être en mesure de mettre en production un prototype.

En premier lieu, à la prochaine page, la nomenclature principale du projet est présentée avec une estimation grossière de tous les coûts.

Ensuite, tous les dessins sont joints.

Tableau J.1 Nomenclature complète du projet

PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY. (TOTAL)	QTY. (PAR PAQUET)	PRIX (\$ PAR PAQUET)	PRIX (\$)	FOURNISSEUR
VersaPlanetary Two Stage	Moteur d'avance avec réducteur	4	1	0.00	0.00	DÉJÀ EN POSSESSION
DriveWheelSideBody_1	Corps côté extérieur de la roue entraînante	4	1	3.00	12.00	IMPRESSION CAPRA
DriveWheelSideBody_2	Corps côté intérieur de la roue entraînante	4	1	3.00	12.00	IMPRESSION CAPRA
SideBody	Corps de roue entraînée	24	1	3.00	72.00	IMPRESSION CAPRA
BotSheet	Plaque du dessous	2	1	20.00	40.00	LASER
DriveWheelMidPlate	Plaque médiane de la roue entraînante	2	1	5.55	11.10	LASER
Lever_Plate_Exterior	Plaque de levier extérieure	4	1	31.90	127.60	LASER
Lever_Plate_Interior	Plaque de levier intérieure	4	1	32.90	131.60	LASER
MidPlate	Plaque médiane de roue entraînée	12	1	6.74	80.85	LASER
MotorMount_1	Plaque de montage du moteur #1	4	1	5.00	20.00	LASER
MotorMount_2	Plaque de montage du moteur #1	4	1	5.00	20.00	LASER
TopSheet	Plaque du dessus	2	1	5.40	10.80	LASER
WormGearStiffener	Raidisseur de la vis sans fin	4	1	5.02	20.08	LASER
AdapterPlate	Plaque adaptatrice au châssis CAPRA	2	1	35.00	70.00	LASER+PLIAGE
LowerStiffener	Raidisseur inférieur	4	1	4.00	16.00	LASER+PLIAGE
MedianStiffener	Raidisseur du milieu	4	1	6.94	27.75	LASER+PLIAGE
OuterSheet	Plaque extérieure	2	1	4.94	9.88	LASER+PLIAGE
TorsionStiffener_L	Renfort de torsion gauche	2	1	6.44	12.88	LASER+PLIAGE
TorsionStiffener_R	Renfort de torsion droit	2	1	15.00	30.00	LASER+PLIAGE
UpperStiffener	Raidisseur supérieur	4	1	15.00	60.00	LASER+PLIAGE
2011N111	Coussinet axial 6mm	8	1	0.92	7.36	McMaster-Carr
57545K427	Vis sans fin	4	1	49.45	197.80	McMaster-Carr
60355K601	Roulement à billes 1/2"	24	1	7.08	169.92	McMaster-Carr
6261K173	Chaine	4	1	13.62	54.48	McMaster-Carr
6384K361	Roulement à billes 1/2" avec épaulement	4	1	12.67	50.68	McMaster-Carr
6384K367	Roulement à billes 3/4" avec épaulement	16	1	16.59	265.44	McMaster-Carr
7804K113	Roulement à billes 6mm	8	1	6.46	51.68	McMaster-Carr
90119A108	Bague d'arrêt 6mm	16	100	5.45	5.45	McMaster-Carr
90480A009	Écrou 8-32	16	100	1.65	1.65	McMaster-Carr
90631A011	Écrou autobloquant 10-24	296	100	3.31	9.93	McMaster-Carr
90640A129	Écrou autobloquant 1/4-20	116	100	4.27	8.54	McMaster-Carr
91101A231	Rondelle de blocage 3/8"	8	100	4.80	4.80	McMaster-Carr
91251A240	Vis 10-24 de 3/8"	16	100	11.00	11.00	McMaster-Carr
91251A242	Vis 10-24 de 1/2"	16	100	11.19	11.19	McMaster-Carr
91251A247	Vis 10-24 de 1"	48	100	14.00	14.00	McMaster-Carr
91290A111	Vis M3 de 6mm	16	100	8.42	8.42	McMaster-Carr
91309A624	Vis 3/8" de 1"	8	100	12.91	12.91	McMaster-Carr
92066A030	Allen Nut 5/16"	12	5	7.20	21.60	McMaster-Carr

Tableau J.1 Nomenclature complète du projet (Page #2)

PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY. (TOTAL)	QTY. (PAR PAQUET)	PRIX (\$ PAR PAQUET)	PRIX (\$)	FOURNISSEUR
92141A011	Rondelle #10	192	100	2.33	4.66	McMaster-Carr
92141A033	Rondelle 1/2"	24	50	6.87	6.87	McMaster-Carr
92141A051	Rondelle 3/8	8	100	6.72	6.72	McMaster-Carr
92196A251	Vis 10-24 de 1-1/2"	72	50	9.72	19.44	McMaster-Carr
92196A253	Vis 10-24 de 2"	24	25	7.76	7.76	McMaster-Carr
92196A309	Vis 10-24 de 1/4"	24	50	4.33	4.33	McMaster-Carr
92210A242	Vis tête plate 10-24 de 1/2"	16	100	7.12	7.12	McMaster-Carr
92510A617	Espaceur ID 3/4" x 1/4" L	4	1	3.13	12.52	McMaster-Carr
92661A747	Cale .063"	16	10	8.72	17.44	McMaster-Carr
93580A130	Goujon fileté 8-32 de 1-1/2"	16	25	8.43	8.43	McMaster-Carr
93580A145	Goujon fileté 10-24 de 1/2"	96	50	8.74	17.48	McMaster-Carr
93580A149	Goujon fileté 10-24 de 3/4"	24	50	10.37	10.37	McMaster-Carr
93580A155	Goujon fileté 10-24 de 7/8"	40	50	11.46	11.46	McMaster-Carr
93580A189	Goujon fileté 1/4-20 de 5/8"	76	25	8.25	33.00	McMaster-Carr
98510A117	Clé 3/16"x3/16"x12"	2	1	1.05	2.10	McMaster-Carr
98870A337	Clé arrondie 1/8"x1/8"x1"	4	5	5.41	5.41	McMaster-Carr
2299K27_MOD1	Roue dentée Chaine ANSI 40, 20 dents, pour moteur	4	1	25.06	100.24	McMaster-Carr + USINAGE CAPRA
2299K27_MOD2	Roue dentée Chaine ANSI 40, 20 dents, pour arbre principal	4	1	25.06	100.24	McMaster-Carr + USINAGE CAPRA
57545K415_MOD	Roue de vis sans fin, usinée	2	1	117.22	234.44	McMaster-Carr + USINAGE CAPRA
IdlerShaft (U-PSFRH0.50-L1.93-F0.09-P0.375-T10)	Arbre de renvoi	12	1	31.90	382.80	MISUMI
Shaft (U-SFRW0.75-L5.88-T0.38-U0.38-WKC0.63- C2.50-K0.75-E1.25)	Arbre principal	4	1	40.00	160.00	MISUMI
615406	Engrenage conique	4	1	8.39	33.56	RobotShop
RB-And-174	Roue pneumatique 8"	4	1	52.29	209.16	RobotShop
RB-SCT-1017	Moteur de levier	4	1	53.32	213.28	RobotShop
Track	Chenilles	4	1	183.00	732.00	SDR

Tableau J.1 Nomenclature complète du projet (Page #3)

PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY. (TOTAL)	QTY. (PAR PAQUET)	PRIX (\$ PAR PAQUET)	PRIX (\$)	FOURNISSEUR
DrivingSleeve	Manchon de la roue entraînante	4	1	6.44	25.75	USINAGE CAPRA
Holder_Tube	Tube de soutien	8	20	15.00	15.00	USINAGE CAPRA
MainShaftBearingPressFitSleeve	Manchon intérieur de l'arbre principal	4	1	6.44	25.75	USINAGE CAPRA
MainShaftBearingSleeve	Manchon extérieur de l'arbre principal	4	1	6.44	25.75	USINAGE CAPRA
MotorShaftBearingPressFitSleeve	Manchon intérieur de l'arbre moteur	4	1	6.44	25.75	USINAGE CAPRA
ShaftAdapter	Adaptateur de roue dentée pour arbre 1/2"	4	1	20.00	80.00	USINAGE CAPRA
Shim_1	Espaceur de la plaque extérieure #1	4	1	6.63	26.50	USINAGE CAPRA
Shim_2	Espaceur de la plaque extérieure #2	4	1	6.63	26.50	USINAGE CAPRA
ShoulderedSleeve	Manchon de l'arbre de la vis sans fin	8	1	6.44	51.50	USINAGE CAPRA
SupportSleeve	Manchon espaceur de roue	4	1	6.44	25.75	USINAGE CAPRA
TeflonPlate	Tampon de glissement	4	1	2.90	11.60	USINAGE CAPRA
WheelAdapter	Adaptateur de roue	4	1	6.44	25.75	USINAGE CAPRA
WormAssemblyShaft	Arbre de la vis sans fin	4	1	23.28	93.12	USINAGE CAPRA

TOTAL (\$): 4490.93