

SIMON GUY ROCHELEAU

**PETIT ROBOT MARCHEUR :
PLATEFORME TOUT-TERRAIN (PROMPT)**

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

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2010

Résumé

L'exploration planétaire utilise des robots à roues depuis plusieurs années maintenant. Cependant, même si elles ont du succès, ces missions spatiales sont limitées à des terrains relativement plats et sédimentaires. Les zones explorées sont très intéressantes, mais elles le sont moins au point de vue de la recherche de traces potentielles de vie lorsqu'elles sont comparées à certains endroits plus risqués. Il est entendu que les agences spatiales ne peuvent prendre le risque d'envoyer des véhicules au coût important dans ces zones à la géologie peu commune. C'est pourquoi l'exploration spatiale évoluera peut-être vers l'utilisation de petits robots à faible coût assez agiles pour explorer ces terrains riches en informations géologiques.

La recherche de vie sur Mars pour expliquer notre existence fait rêver. Les contraintes de cette mission sont cependant nombreuses puisque la planète n'est pas très hospitalière. Après avoir examiné plusieurs options, le Laboratoire de robotique de l'Université Laval a développé un petit robot marcheur inspiré des insectes. Ce mémoire décrit les étapes de design que la plateforme tout-terrain a franchies, soient l'analyse, la conception, la fabrication et l'expérimentation. Le système a traversé ce processus rigoureux avec succès, mais a toujours besoin d'améliorations. C'est là tout l'intérêt du projet, envoyer un robot parfaitement fonctionnel et autonome sur Mars pour parcourir aisément cette planète qui a tant de secrets à découvrir.

Avant-propos

J'aimerais d'abord remercier le professeur Clément Gosselin pour sa direction, son soutien, sa confiance et ses encouragements, ainsi que les professionnels de recherche du Laboratoire de robotique, chacun avec leurs talents : Thierry Laliberté, Boris Mayer-St-Onge et Simon Foucault.

Je souhaiterais aussi remercier le professeur Jean Ruel et toute l'équipe de l'atelier de fabrication mécanique, en particulier Martin Dallaire, technicien en usinage, et Michel Dominique, technicien en électronique.

Je voudrais également remercier le professeur Marc Richard pour son enseignement dynamique et pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire, ainsi que Johanne Pouliot et Sylvie Brodeur du département de génie mécanique qui rendent les tâches administratives agréables.

Je remercie aussi Denis Ouellet, professionnel de recherche pour le Laboratoire de vision et systèmes numériques (LVSN), pour son implication dans le dossier des caméras et le partage de ses connaissances.

Je souhaite remercier le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG) et le programme des Chaires de recherche du Canada qui rendent possible, par leur soutien financier, de relever des défis tels que de créer un robot marcheur pour l'exploration spatiale.

J'aimerais aussi remercier Érick Dupuis et Tom Lamarche de l'Agence spatiale canadienne (ASC) de nous avoir fourni les requis initiaux du robot et de nous accorder l'accès au Terrain d'émulation de Mars (TEM), ainsi que mes amis et coéquipiers exceptionnels, Vincent Duchaine et Pascal Bochud, avec qui ce fut un réel plaisir d'entreprendre ce projet.

Enfin, mes derniers remerciements s'adressent à ma famille, ma belle-famille et mes amis pour leurs encouragements sincères et soutenus, ainsi qu'à Josiane, ma merveilleuse compagne de vie, pour la correction du mémoire, mais surtout pour son amour inconditionnel tout au long de cette aventure.

$\rightarrow \infty \dots \& \Rightarrow !!$

Vers l'infini... et plus loin encore !!

Buzz Lightyear

Table des matières

Résumé	i
Avant-propos	ii
Table des matières	v
Liste des tableaux	x
Liste des figures	xi
Introduction	1
1 Contexte	3
1.1 Rovers spatiaux	4
1.2 Robots marcheurs	4
1.3 Hexapode	5
1.4 PROMPT V1	6
1.4.1 Requis du système	6
1.4.2 Évolution du prototype	8
1.4.3 Leçons apprises et conclusions	12
1.5 PROMPT V2	12
1.5.1 Requis du système	13
1.6 Conclusion	14
2 Analyse	15
2.1 Modèle	16
2.2 Cinématique	17

2.3	Dynamique	22
2.3.1	Formulation de Lagrange	24
2.4	Conclusion	25
3	Conception	26
3.1	Contraintes	27
3.1.1	Polygone de contact	27
3.1.1.1	Résistance à la perte d'équilibre	28
3.1.2	Design initial	29
3.1.3	Orientation et position des moteurs	31
3.2	Modélisation	33
3.3	Revue de design	33
3.3.1	Présentation du design	34
3.4	PROMPT V2	35
3.5	Plateforme (assemblage)	36
3.5.1	Plateforme (pièce)	37
3.5.2	Actionneur	38
3.5.2.1	Moteur	38
3.5.2.2	Support central	38
3.5.3	Supports	39
3.5.3.1	Support latéral	40
3.5.3.2	Support à arbre	40
3.5.3.3	Support à roulement	40
3.5.4	Éléments de transmission de puissance	41
3.5.4.1	Arbres	42
3.5.4.2	Engrenages	42
3.5.4.3	Pignons	42
3.5.4.4	Chaînes	43
3.5.5	Pattes	44
3.5.6	Batterie	44
3.5.7	Câbles et connexions de la plateforme	44
3.6	Couvercle (assemblage)	45
3.6.1	Couvercle (pièce)	46
3.6.2	Caméra (assemblage)	46
3.6.2.1	Support à caméra	46
3.6.2.2	Caméra (pièce)	47
3.6.3	Panneau solaire (assemblage)	47

3.6.4	Circuits électroniques	47
3.6.4.1	ZigBee Interface RS-232	48
3.6.4.2	ServoPod-USB	49
3.6.4.3	GPS	49
3.6.4.4	Circuit d'interface	49
3.6.5	Câbles et connexions du couvercle	50
3.7	Équipement	51
3.7.1	ZigBee Interface USB	51
3.7.2	Récepteur caméra	51
3.7.3	Ordinateur	52
3.7.4	Câbles et connexions du GSE	52
3.8	Résultats du CDR	52
3.9	Conclusion	53
4	Fabrication	54
4.1	Architecture du système	55
4.2	Plateforme	55
4.2.1	Supports	56
4.2.2	Tensionneurs	57
4.2.3	Espaceurs	58
4.2.4	Roulements	58
4.2.5	Pattes	59
4.2.6	Bottes	60
4.3	Couvercle (assemblage)	63
4.3.1	Couvercle (pièce)	63
4.3.2	Panneau solaire	64
4.4	Caméras	65
4.5	Environnement graphique	67
4.6	Conclusion	68
5	Expérimentation	69
5.1	Laboratoire de robotique	70
5.2	Agence spatiale canadienne	70
5.3	Résultats initiaux	71
5.3.1	Chapeaux	71
5.3.2	Vis de pression	72
5.3.3	Chaînes	73

5.3.4	Bottes	73
5.4	Foire Sciences & Technologies	74
5.4.1	Engrenages	74
5.4.2	Anneaux élastiques	75
5.4.3	Arbres	76
5.4.4	Tensionneurs	76
5.5	Désassemblage	77
5.5.1	Pignons	78
5.5.2	Arbres	79
5.6	Résultats quantitatifs	81
5.6.1	Vitesse	81
5.6.2	Garde au sol	82
5.6.3	Autonomie	82
5.7	Conclusion	83
Conclusion		84
5.8	Principales réalisations	84
5.9	Travaux futurs	85
Bibliographie		86
A Index		89
A.1	Extensions multimédias	90
B Dessins mécaniques		91
B.1	Dessins d'assemblage	92
B.2	Dessins de fabrication	95
C Feuilles de spécifications		96
C.1	Matériaux	97
C.2	Pièces	97
D Programmes informatiques		98
D.1	Microcontrôleur (DSP)	99
D.2	MATLAB	99
D.3	XBee-PRO	99
E Autres documents		100
E.1	Matrice de conformité	101
E.2	Arbre de produit	101

E.3	Base de données	101
E.4	Registre de risques	101
E.5	Échéancier	101
E.6	Calcul des dimensions	102
E.7	Choix des moteurs	102
E.8	Choix des caméras	102
E.9	Calcul de la résistance des branches	102

Liste des tableaux

A.1 Extensions multimédias.	90
-------------------------------------	----

Liste des figures

1	Région de Mars avec une géologie accidentée.	2
1.1	Évolution entre PROMPT V1.1, V1.2 et V1.3.	8
1.2	Configuration des pattes de PROMPT V1.1.	9
1.3	Remplacement des éléments de transmission entre PROMPT V1.1 et V1.2.	10
1.4	Configuration intérieure de PROMPT V1.3.	11
1.5	PROMPT V1.3 avec son couvercle.	11
1.6	Expérience au TEM de l'ASC avec PROMPT V1.3.	12
2.1	Modèle CAO de PROMPT V1.1 et son système de coordonnées.	16
2.2	Modèle d'une roue sans jante.	17
2.3	Comparaison des critères de performance.	19
2.4	Division d'un pas en trois portions.	20
3.1	Comparaison des polygones de contact.	28
3.2	Longueur de la chaîne.	30
3.3	Modèle CAO de PROMPT V2.1.	35
3.4	Modèle de la plateforme (vue isométrique).	36
3.5	Modèle de la plateforme (vue de dessus).	36
3.6	Modèle de la plateforme (vue de face).	37
3.7	Modèle de la plateforme (pièce).	37
3.8	Modèle de l'actionneur.	38
3.9	Modèle du moteur.	39
3.10	Modèle du support central.	39
3.11	Modèle du support latéral.	40

3.12	Modèle du support à arbre.	41
3.13	Modèle du support à roulement.	41
3.14	Modèle des arbres.	42
3.15	Modèle des engrenages coniques droits.	43
3.16	Modèle des pignons.	43
3.17	Modèle de la chaîne.	44
3.18	Modèle de la patte.	45
3.19	Modèle de la batterie.	45
3.20	Modèle du couvercle.	46
3.21	Modèle de la caméra (assemblage).	47
3.22	Modèle du panneau solaire.	48
3.23	Émetteur-Récepteur ZigBee Interface RS-232.	48
3.24	ServoPod-USB.	49
3.25	GPS.	50
3.26	H-Bridge.	50
3.27	Émetteur-Récepteur ZigBee Interface USB.	51
4.1	Base.	56
4.2	Supports avant et arrière, gauche et droit.	57
4.3	Tensionneurs avant et arrière.	58
4.4	Patte.	59
4.5	Bloc de cire à usiner.	60
4.6	Bottes au moment du moulage.	61
4.7	Bottes après le démoulage.	61
4.8	Bottes lors de l'usinage.	62
4.9	Bottes prêtes à l'assemblage.	62
4.10	Couvercle (assemblage).	63
4.11	Couvercle (pièce).	64
4.12	Panneau solaire.	65
4.13	Caméras et récepteur.	66
4.14	Adaptateur de capture audio-vidéo USB.	66
4.15	Environnement graphique de PROMPT V2.	67
5.1	Expérience au Laboratoire de robotique avec PROMPT V2.1.	70
5.2	Expérience au TEM de l'ASC avec PROMPT V2.1.	71
5.3	Problème de déformation des chapeaux.	72
5.4	Expérience à la Foire Sciences & Technologies avec PROMPT V2.1.	74

5.5	Configuration intérieure de PROMPT V2.1.	75
5.6	Problème d'usure anormale des engrenages coniques droits.	75
5.7	Problème du désassemblage des anneaux élastiques.	76
5.8	Problème de corrosion des arbres.	77
5.9	Problème du désassemblage des vis de pression des tensionneurs.	77
5.10	Problème de coincement des vis de pression désassemblées.	78
5.11	Problème de désassemblage des pignons.	78
5.12	Problème de désassemblage des arbres centraux.	79
5.13	Problème d'alignement des vis de pression des arbres centraux.	80
5.14	Problème d'orientation des pignons centraux.	80
5.15	Problème de précision d'usinage des arbres centraux.	81

Introduction

L'Homme étudie la nature qui l'entoure et l'environnement dans lequel il évolue depuis son éveil. Il est en quête de la vérité sur son passé et s'est doté, au fil du temps, d'outils formidables pour tenter d'y arriver. La géologie et l'astronomie en sont deux particulièrement puissants. En effet, la géologie étudie les éléments naturels qui composent la Terre afin, entre autres, de percer le mystère de sa genèse. L'astronomie, elle, cherche à comprendre l'Univers dans son infinité et l'ensemble des corps célestes qu'il englobe.

Ces deux sciences appuient leurs avancées respectives sur des technologies de plus en plus évoluées et sophistiquées. Les rovers combinent ces deux disciplines en étant des robots géologues développés pour l'exploration spatiale. Ces merveilles techniques se déplacent sur des astres pour en découvrir le passé. Actuellement, deux d'entre eux poursuivent leur mission sur la planète Mars : Spirit et Opportunity. Ces deux rovers succèdent à Sojourner qui fut le premier engin à rouler sur le sol martien. Ils ont tous les trois été fabriqués par la National Aeronautics and Space Administration (NASA).

Jusqu'ici, le Canada s'est illustré dans le domaine spatial par sa force en robotique avec, comme fleurons, les bras canadiens qui sont installés à bord des navettes spatiales américaines ainsi que sur la Station spatiale internationale. Afin d'accroître son implication dans l'exploration planétaire tout en s'appuyant sur son savoir-faire, l'Agence spatiale canadienne (ASC) cherche à étendre son expertise en robotique mobile. C'est dans ce contexte qu'elle a demandé en 2005 à trois finissants au baccalauréat en génie

mécanique de l'Université Laval de développer une plateforme capable de se déplacer en terrain accidenté sans se retrouver dans une position la rendant inutilisable. Ces endroits sont particulièrement riches en informations géologiques et les échantillons qui peuvent y être prélevés sont très précieux (voir figure 1).



Figure 1 : Région de Mars avec une géologie accidentée.

Le projet PROMPT est parrainé depuis le tout début par le Laboratoire de robotique de l'Université Laval et a maintenant évolué en sujet de maîtrise. Ce mémoire présente le contexte initial du projet, les études cinématiques et dynamiques qui ont été effectuées, la conception et la fabrication des différentes versions du prototype ainsi que les expériences qui ont été réalisées pour tester la viabilité du concept.

Chapitre 1

Contexte

Mars possède un climat très rigoureux. En effet, la température y varie de $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ avec une moyenne d'environ $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Aussi, l'atmosphère de la planète est remplie de poussière. Les instruments qui y sont envoyés doivent donc être conçus pour fonctionner dans de telles conditions extrêmes en plus de pouvoir résister aux accélérations et aux vibrations subies lors du décollage de la Terre et de l'atterrissage sur Mars ainsi qu'aux radiations, aux variations de température et au vide qui existent lors du voyage dans l'espace.

Ayant ces exigences en tête, l'équipe de concepteurs a effectué une séance de remue-méninges pour proposer cinq solutions possibles. De celles-ci, le concept du robot marcheur s'est révélé le moyen le plus efficace pour accomplir la tâche de se déplacer en terrain hasardeux. La démarche des prototypes PROMPT est inspirée de celle des insectes à six pattes comme les fourmis et les coquerelles. Ils se déplacent en tripode. Cette technique de marche consiste à d'abord prendre appui sur un premier trépied formé par trois de leurs pattes et d'enchaîner la séquence avec un deuxième trépied formé par leurs trois autres pattes. En alternant ainsi les points de contact avec le sol, les plateformes se déplacent avec une parfaite stabilité dans toutes les configurations possibles.

1.1 Rovers spatiaux

Bientôt quarante ans auront passé depuis que Lunokhod 1 atterrit sur la Lune en 1970 [1]. Il fut le premier robot télécommandé à fouler le sol d'un astre autre que la Terre. Trois ans plus tard, en 1973, l'Union soviétique envoya un second robot, Lunokhod 2, dans la foulée du programme Luna [2]. Ils furent les précurseurs des rovers modernes, ces robots mobiles conçus pour l'exploration spatiale. Du côté américain, la plateforme Rocky 4 fut développée en 1992 pour démontrer la viabilité d'un véhicule équipé d'une suspension de type *rocker-bogie* [3]. Ce prototype mena la NASA à poursuivre sur cette lancée en créant le rover Sojourner [4] qui atterrit sur la planète rouge en 1996 à bord de la mission Mars Pathfinder. Ce fut le premier robot à rouler sur Mars. Il fut suivi en 2003 par les rovers jumeaux Spirit et Opportunity de la mission Mars Exploration Rover (MER) qui sont toujours opérationnels à ce jour. Les étapes de leur conception et de leur fabrication sont décrites dans [5]. Deux nouveaux rovers sont actuellement en développement : le Mars Science Laboratory (MSL) Rover, baptisé Curiosity, qui devrait être lancé par la NASA en 2011 et l'ExoMars Rover de l'European Space Agency (ESA) dont le lancement est planifié pour 2016. Ces rovers spatiaux sont tous équipés de roues.

1.2 Robots marcheurs

Cependant, les avantages à utiliser des robots à pattes pour l'exploration spatiale sont connus depuis plusieurs années déjà. En effet, le Massachusetts Institute of Technology's Artificial Intelligence Laboratory (MIT AI Lab) créa une série de robots autonomes se servant de pattes comme moyen de locomotion : Genghis en 1989 [6], Hannibal et Attila de 1989 à 1991 [7]. Ils furent fabriqués avec l'intention de développer de futures missions spatiales basées sur des petits robots autonomes et à faible coût [8]. À ce moment, le Carnegie Mellon University's Robotics Institute (RI) travaillait aussi sur un robot nommé Ambler développé comme banc d'essai pour le Jet Propulsion Laboratory (JPL) [9]. C'était un imposant véhicule lorsque comparé avec les robots du MIT AI Lab. En 1996, l'ESA Automation & Robotics (A & R) Group développèrent PROLERO (PROtotype of LEgged ROver), aussi connu sous le nom de WAROMA (Walking Robot for Mars Applications) [10]. Plus récemment, deux autres robots

à pattes ont fait avancer la technologie : RHex et Whegs. Le premier fut créé par l'University of Michigan, McGill University et l'University of California, Berkeley en 2000 [11] et le deuxième, par le Biologically Inspired Robotics Laboratory à la Case Western Reserve University (CWRU) en 2001 [12]. Ces deux robots seront étudiés plus en détail à la section 1.4.1.

Malgré les années de recherche qui furent effectuées et les nombreux prototypes de robots marcheurs qui furent fabriqués, ces derniers n'ont toujours pas la cote pour en faire des rovers. L'héritage spatial acquis au cours des premières missions, la haute efficacité de la roue en terrain plat et sur de longues distances, l'importante expérience industrielle et la rapidité avec laquelle sont développées les nouvelles technologies sont toutes des raisons qui font en sorte que les robots marcheurs ne sont pas encore considérés comme des candidats valides pour l'exploration planétaire. Cette tendance s'explique peut-être par le fait que les robots marcheurs sont complexes à opérer, pas suffisamment autonomes et que la technologie est encore assez exotique. De plus, des missions de démonstration sont requises pour bâtir leur expérience spatiale. Aussi, les systèmes embarqués et l'équipement scientifique ne cessent de croître en nombre et en taille. Cela explique peut-être pourquoi les rovers de la NASA sont de plus en plus imposants, de Sojourner à MSL, tandis que la littérature scientifique a déjà préconisé l'utilisation de petits rovers autonomes et à faible coût pour l'exploration spatiale [7, 8].

1.3 Hexapode

En 2005, le Laboratoire de robotique de l'Université Laval a développé un premier robot marcheur nommé Hexapode [13, 14]. Son design est basé sur une étude biomimétique de la morphologie de la fourmi. Cette plateforme est un système complexe actionné par dix-huit moteurs à courant continu. Elle a été créée avec l'intention d'étudier différents types de démarches et de réaliser un robot capable de s'adapter adéquatement aux obstacles à franchir. Les critères de performance qui ont guidé la conception d'Hexapode sont la mobilité, l'autonomie et l'adaptabilité du robot. Les travaux de recherche ont permis d'analyser et d'expérimenter des démarches stables et efficaces. Des notions telles que les polygones de support et de retour, l'équilibrage statique, la programmation hiérarchique et la prise de décision ont toutes été étudiées.

1.4 PROMPT V1

Les travaux entourant le développement d'Hexapode ont servi d'inspiration pour concevoir et fabriquer un nouveau robot marcheur nommé PROMPT, un acronyme pour *Petit RObot Marcheur : Plateforme Tout-terrain*. La section qui suit porte sur la création du premier prototype, PROMPT V1, et présente les requis du système, son évolution, les leçons apprises et les conclusions du projet.

1.4.1 Requis du système

Les objectifs à atteindre lors de la réalisation de PROMPT V1 étaient fondés sur les spécifications de design fournies par l'ASC en 2005. Le but était d'étudier les avantages potentiels d'un petit robot marcheur par rapport aux solutions traditionnelles utilisées pour l'exploration planétaire. Le système robotique proposé devait être simple et fiable mécaniquement et électroniquement afin de réduire les coûts et, surtout, les risques de défauts durant les missions spatiales.

Les principaux requis du système, tels que soumis dans le cahier des charges, étaient énoncés ainsi :

- Avancer et reculer
- Tourner de 90 degrés sur une distance égale à la longueur du robot
- Surmonter des obstacles de 5 cm
- Monter et descendre des pentes de 30 degrés
- Se déplacer en terrain accidenté sans rester coincé
- Être contenu dans un volume de $10 \times 10 \times 15$ cm maximum
- Peser au maximum 750 g, sans l'électronique
- Supporter une chute de 30 cm
- Transporter une charge utile

Les spécifications concernant l'électronique et les systèmes de contrôle n'étaient pas définies au début du projet. Le focus était surtout placé sur l'aspect mécanique de la plateforme. Néanmoins, certains requis inhérents au domaine spatial devaient être gardés à l'esprit tout au long du processus de design : utiliser l'énergie solaire comme source d'énergie primaire, minimiser le nombre d'actionneurs et maximiser l'autonomie de la plateforme.

Fondé sur la littérature et les analyses préliminaires (voir l'extension 1 dans le tableau A.1 présenté à l'annexe A.1), l'utilisation de roues sans jante semblait être l'approche la plus prometteuse pour un système tout-terrain. Cette solution allie la simplicité de contrôle et le pouvoir d'évoluer rapidement en terrain accidenté. RHex et Whegs ont été utilisés comme points de comparaison. En effet, ces deux robots remarquables inspirés de la coquerelle et les recherches effectuées pour les développer ont ouvert la voie à une nouvelle génération de robots mobiles.

Les éléments identifiés comme ceux possédant le plus de potentiel étaient les suivants :

- Utiliser la démarche tripode pour marcher et courir
- Se propulser à l'aide de moteurs à courant continu
- Faire tourner les moteurs à une vitesse constante
- Maximiser la longueur des branches versus la longueur du robot
- Ne nécessiter aucune énergie pour maintenir une configuration statique

Comme ce projet n'était pas une recherche biomimétique portant sur le choix du type de marche, il a été décidé d'emblée que la plateforme se déplacerait en tripode. Effectivement, plusieurs études ont démontré que cette démarche est la plus répandue chez les insectes. Elle confère une stabilité statique et dynamique et semble être une des plus rapides.

1.4.2 Évolution du prototype

D'abord, il était primordial de retracer l'historique du premier prototype, PROMPT V1, de sa conception, de sa fabrication et des tests qui ont été effectués afin d'établir les fondements qui devaient plus tard servir de base pour la deuxième plateforme. Les avantages à effectuer un tel exercice étaient d'éviter de tomber dans les mêmes pièges et de ne pas répéter les mêmes erreurs. La sophistication du prototype a été faite lors de deux révisions majeures. La figure 1.1 montre l'évolution entre PROMPT V1.1, V1.2 et V1.3.

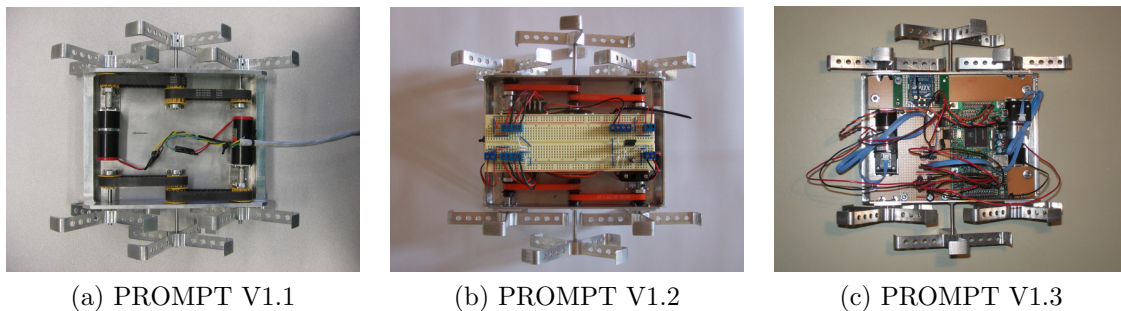
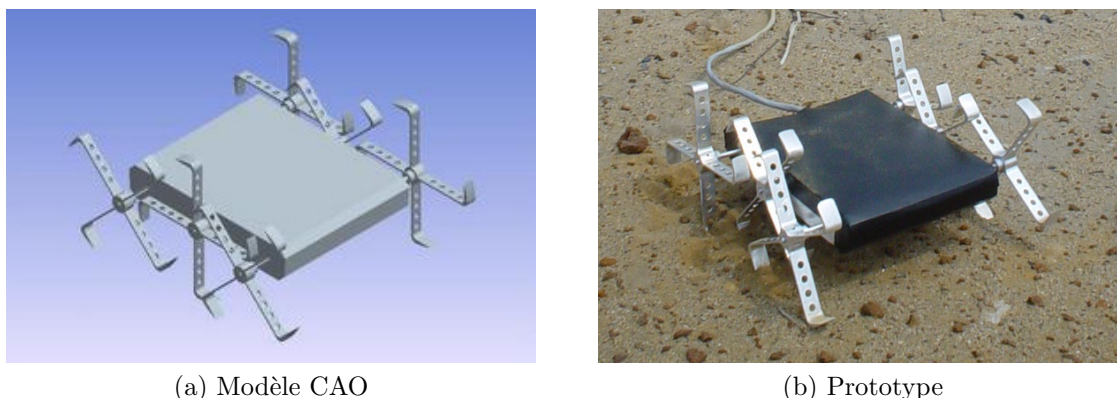


Figure 1.1 : Évolution entre PROMPT V1.1, V1.2 et V1.3.

La première version de la plateforme, PROMPT V1.1, était propulsée par deux moteurs à courant continu. La puissance était transmise de chaque côté du robot par des courroies et des poulies crantées. Six piles NiMH branchées en série étaient utilisées et placées à bord. Chaque moteur était contrôlé indépendamment par un interrupteur à trois états : avant, arrêt et arrière. Il n'y avait pas de moyen formel pour respecter la démarche tripode. Le contrôleur était placé à l'extérieur et relié au robot par un câble.

Il pesait 0,9 kg et mesurait $26 \times 23 \times 12,5$ cm. La longueur des branches était de 6,25 cm. Dans cette version, les pattes du milieu étaient placées près du corps tandis que les pattes avant et arrière étaient placées à l'extérieur, tel que montré à la figure 1.2. Une animation de l'assemblage des principaux composants est présentée à l'extension 3 et le design de la première version du prototype est décrit en détail dans [15].

PROMPT V1.1 a été testé sous cette configuration au Centre spatial John H. Chapman de l'ASC sur un site analogue simulant la topographie martienne : le Terrain d'émulation de Mars (TEM) (voir extension 4). Cette expérience a prouvé que le concept de base était adéquat pour se déplacer en terrain accidenté et qu'il pouvait aussi résister



(a) Modèle CAO

(b) Prototype

Figure 1.2 : Configuration des pattes de PROMPT V1.1.

à une chute de 30 cm. En outre, il a été constaté que des obstacles de 5 à 6 cm étaient faciles à surmonter. Cependant, le design mécanique initial a rapidement démontré ses faiblesses. Les courroies crantées en néoprène renforcé et les arbres en aluminium n'étaient clairement pas des choix judicieux. De plus, la configuration des pattes était aussi un problème. Lorsque le robot se retrouvait sur le côté, il n'était plus en mesure de se remettre sur pied par lui-même dû aux deux pattes en contact avec le sol formant alors un support stable.

Ces problèmes ont été corrigés par une nouvelle itération de design qui a mené à PROMPT V1.2. Les actionneurs et les dimensions du robot ont été conservés, mais la configuration a été changée. Les pattes avant et arrière ont été placées près du corps tandis que celles du centre ont été placées à l'extérieur. Cet arrangement donne aux points de contact une forme hexagonale. Aussi, les arbres d'aluminium ont été remplacés par des arbres en acier inoxydable et les éléments de transmission de puissance, par des courroies en polyuréthane et des poulies crantées en polycarbonate, tel qu'illustré à la figure 1.3.

Un autre changement important a été apporté : les composants électroniques ont été placés à bord du robot et une télécommande permettait de le contrôler à distance. Avec cette amélioration, PROMPT V1.2 est devenu sans-fil et a gagné en liberté de mouvement. Équipé de toutes ces nouvelles fonctionnalités, le robot pesait environ 1 kg.

Par contre, il n'y avait toujours pas de façon formelle de respecter la démarche tripode en raison du fait que les deux actionneurs étaient totalement indépendants.

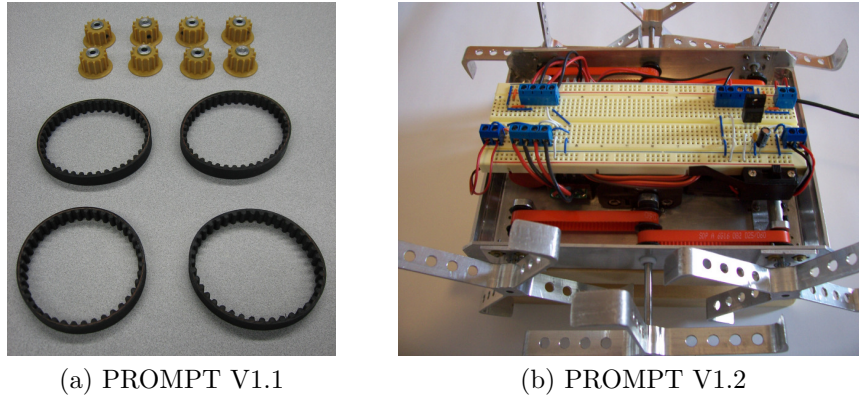


Figure 1.3 : Remplacement des éléments de transmission entre PROMPT V1.1 et V1.2.

La solution est venue d'une nouvelle version du robot : PROMPT V1.3. Les éléments de transmission de puissance ont été conservés, mais les moteurs et les composants électroniques ont été modifiés. Les anciens moteurs ont été remplacés par un modèle plus puissant avec un encodeur.

PROMPT V1.3 est la version actuelle du premier prototype. L'agencement des composants à l'intérieur de la plateforme est montré à la figure 1.4. Il est contrôlé via un programme MATLAB qui sert d'interface entre le clavier d'ordinateur de l'utilisateur et le robot. Cinq commandes de haut niveau sont utilisées : avancer, reculer, tourner à gauche, tourner à droite et arrêter. Une caméra est installée à l'avant du robot. L'information en provenance de la caméra est alors transmise à l'utilisateur afin que celui-ci choisisse l'itinéraire à suivre. La commande de l'utilisateur est ensuite lancée via un émetteur sans-fil qui communique avec un récepteur placé à bord du robot. Ce module transfère ensuite la commande au microcontrôleur qui, lui, gère les instructions de bas niveau. Un premier contrôleur PID est utilisé pour commander la vitesse du moteur gauche et un second veille à ce que le moteur droit suive le déplacement du premier.

Un couvercle fait de polystyrène thermoformé, sur lequel un panneau solaire est monté, complète l'assemblage (voir figure 1.5). La plupart des composants électroniques sont attachés à ce couvercle. Cet agencement facilite grandement le processus d'ouverture et de fermeture de la plateforme. Au moment de rédiger le présent document, les panneaux solaires ne sont pas encore utilisés pour charger les piles, mais c'est une fonctionnalité qui sera ajoutée sous peu. En raison de l'espace disponible à l'intérieur

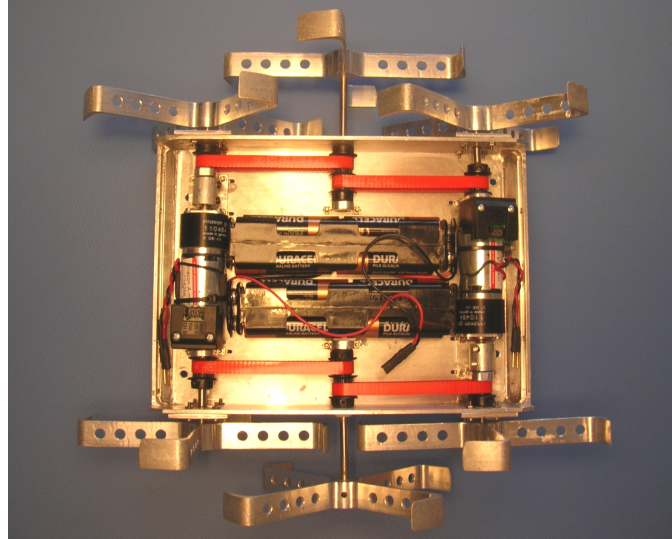


Figure 1.4 : Configuration intérieure de PROMPT V1.3.

du robot, huit piles alcalines (1,5 V) connectées en série ont été utilisées pour donner les 12 V nécessaires pour l'alimentation au lieu de dix batteries NiMH (1,2 V). Avec toutes ces modifications, PROMPT V1.3 pèse maintenant 1,1 kg. Il a été testé à l'ASC en décembre 2008 (voir figure 1.6). Le robot se déplace d'avant en arrière à 1 longueur de corps par seconde, tourne sur lui-même et est totalement réversible. Le design des deuxième et troisième versions du prototype est décrit en détail dans [16]

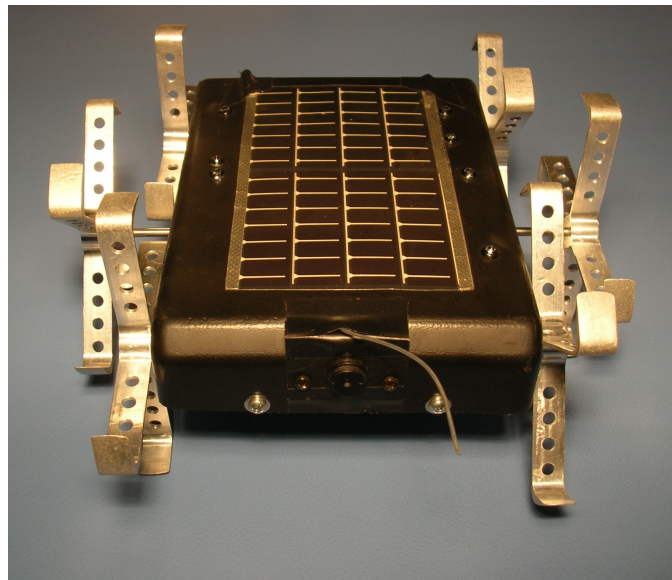


Figure 1.5 : PROMPT V1.3 avec son couvercle.



Figure 1.6 : Expérience au TEM de l'ASC avec PROMPT V1.3.

1.4.3 Leçons apprises et conclusions

Les grandes leçons tirées de cette première expérience ont été d'améliorer la fiabilité et l'efficacité des éléments de transmission de puissance ainsi que de comprendre l'influence de la configuration des pattes sur le comportement de la plateforme. Un autre élément important à considérer était d'arriver à prendre des mesures quantitatives à bord du robot et de les transmettre au centre des commandes. Ainsi, les différents paramètres qui décrivent l'état du système pourraient être connus en temps réel et l'utilisateur pourrait prendre des décisions en conséquence. Le but ultime du projet est qu'un jour, le robot soit en mesure d'effectuer ces choix de façon autonome. C'est avec toutes ces idées d'amélioration en tête que le projet de concevoir, fabriquer et tester un deuxième prototype a été entrepris.

1.5 PROMPT V2

Fort des expériences vécues lors du développement de PROMPT V1, le projet de créer un robot marcheur pouvant un jour être sélectionné pour participer à une mission d'exploration spatiale s'est poursuivi. Une nouvelle analyse a été effectuée pour préparer la conception et la fabrication d'un deuxième prototype : PROMPT V2. Ce dernier a

permis d'intégrer les nombreuses idées d'amélioration qui ont surgi depuis le début de l'aventure. Il fait l'objet de la majeure partie de ce mémoire. La section qui suit présente les requis qui ont guidé les travaux entourant son développement.

1.5.1 Requis du système

La première étape a consisté à énumérer les requis du système issus du cahier des charges. Les requis initiaux qui ont menés à la création de PROMPT V1 ont été fournis par l'ASC. Ces exigences n'ont pas toutes été respectées lors de la réalisation du premier prototype. La dimension, la masse et la consommation électrique dépassent les paramètres spécifiés. Ces déviations sont surtout dues à la disponibilité et au prix des composants. Aussi, des compromis ont dû être faits lors du design comme, par exemple, pour pouvoir intégrer les moteurs.

Pour PROMPT V2, il n'existait pas au départ de cahier des charges listant les requis du système, car le client était la même personne qui concevait, fabriquait et testait la plateforme. Devant ce manque d'objectivité face aux besoins du produit, une matrice de conformité a été créée afin de lister les objectifs visés par la réalisation du projet. Cette matrice de conformité est une liste qui permet d'énumérer les requis du système et de vérifier qu'ils sont respectés. Elle est disponible à l'annexe E.1

L'information qui y est présentée est divisée en neuf principaux groupes :

- Mobilité
- Optique
- Mécanique
- Électrique
- Informatique
- Environnement
- Intégration

- Durabilité
- Qualité

La capacité à respecter plusieurs requis était déjà connue au moment d'entreprendre le projet, car l'analyse et la conception ont été effectuées en conséquence. Certains autres requis ont dû être vérifiés plus tard dans le projet, soit par similarité, par inspection ou par test. D'autres critères ont été listés afin de préparer le terrain pour de nouvelles améliorations, mais il était évident qu'ils ne seraient pas respectés par PROMPT V2, soit pour des raisons de temps, de coûts ou de désir de mettre l'emphase sur des objectifs jugés prioritaires à ce stade de développement.

1.6 Conclusion

Les rovers spatiaux et les robots marcheurs ont d'abord été passés en revue pour fournir une base solide au projet et servir de référence tout au long des travaux de recherche. Ensuite, le contexte entourant le développement du premier prototype, PROMPT V1, les requis du système, son évolution et les leçons apprises ont été présentés pour permettre d'établir les requis du deuxième prototype, PROMPT V2.

Chapitre 2

Analyse

Les robots marcheurs PROLERO, RHex et Whegs sont des plateformes qui se déplacent de façon similaire. Ces trois systèmes ont servi de points de repère avec lesquels comparer les performances de PROMPT V2. Ainsi, en étudiant le mouvement du robot lorsqu'il se déplace et les forces qui sont impliquées, le concept du robot a été raffiné pour pouvoir optimiser sa consommation d'énergie et son habileté à franchir des obstacles.

2.1 Modèle

La figure 2.1 montre le tout premier modèle CAO de PROMPT V1 ainsi que le système de coordonnées utilisé tout au long de ce travail. Il est effectivement le même que celui de PROMPT V2. Les angles de roulis (Φ), de tangage (Θ) et de lacet (Ψ) constituent les rotations autour des axes x , y , et z , respectivement.

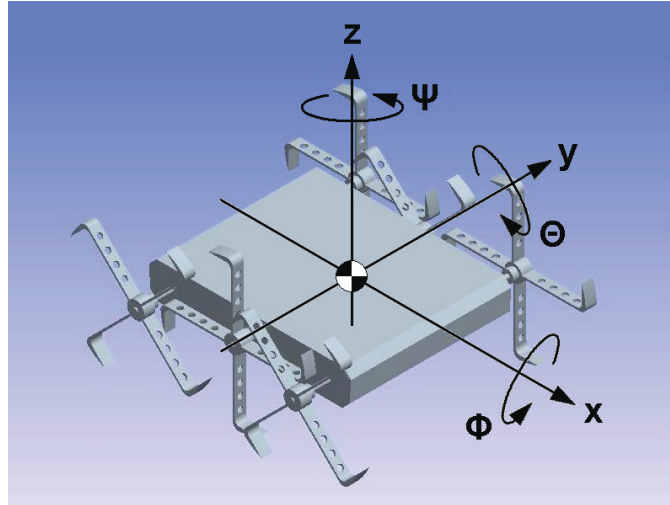


Figure 2.1 : Modèle CAO de PROMPT V1.1 et son système de coordonnées.

La plateforme possède six roues sans jante avec quatre branches chacune. Ces pièces seront simplement nommées *pattes* dans le présent texte. Les deux trépieds doivent être déphasés de 45 degrés afin de permettre au robot de marcher en tripode. Deux moteurs électriques à courant continu, un par côté, propulsent le système. Ils entraînent chacun trois pattes grâce à des éléments de transmission de puissance. Ainsi, la plateforme peut tourner sur elle-même. Cela la rend hautement maniable et capable de se faufiler dans d'étroits passages.

Pour diminuer l'amplitude d'oscillation de la plateforme et ainsi minimiser la consommation d'énergie, un pied est placé au bout de chaque branche. Ce pied est un arc circulaire d'un rayon égal à la longueur de la branche et d'un angle central de 20 degrés. Cette dernière mesure a été choisie arbitrairement au début de la phase de conception.

2.2 Cinématique

Le choix du nombre de branches par patte est fondé sur deux considérations opposées : la hauteur des obstacles qui sont franchissables et l'amplitude d'oscillation du centre de masse de la plateforme le long de l'axe vertical. En effet, plus le nombre de branches par patte augmente, plus la hauteur des obstacles diminue, mais moins l'amplitude d'oscillation est élevée. Au départ, suivant les requis de l'ASC, la plateforme devait être en mesure de franchir des obstacles d'une certaine hauteur (5 cm).

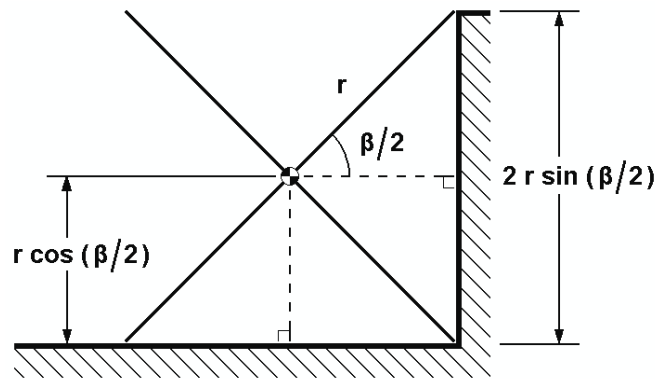


Figure 2.2 : Modèle d'une roue sans jante.

Tel qu'illustré par la figure 2.2, la hauteur limite théorique qu'une patte peut atteindre, h_{lim} , est exprimée par :

$$h_{lim} = 2r \sin(\beta/2) \quad (2.1)$$

où r est la longueur des branches, $\beta = 2\pi/n$ est l'angle entre les branches et n est le nombre de branches par patte (pour $n = 1$, $\beta = \pi$). De là, le premier critère de performance, η_1 , est défini comme le ratio entre la hauteur limite théorique et la hauteur maximum atteignable pour une patte à une branche, ce qui mène à :

$$\eta_1 = h_{lim}/2r = \sin(\beta/2) \quad (2.2)$$

qui donne théoriquement 100% pour une patte à une ou deux branches, 86,6% pour une patte à trois branches et 70,7% pour une patte à quatre branches.

L'autre élément de comparaison est inhérent au caractère spatial du projet et prend la consommation d'énergie en considération. Marcher plutôt que rouler est toujours

associé à une variation de la position du centre de masse le long de l'axe vertical. Cette variation a un coût en terme d'énergie et est proportionnelle à l'amplitude du mouvement.

Ainsi, le second critère de performance, η_2 , est défini comme le ratio entre la position la plus basse de la plateforme, h_{min} , et la position la plus élevée, h_{max} . Le moment où la plateforme atteint la position la plus basse se produit lorsque deux branches sont en contact avec le sol et la plus élevée, lorsqu'une des branches est perpendiculaire au sol. La première situation est représentée à la figure 2.2.

Puisque $h_{min} = r \cos(\beta/2)$ et que $h_{max} = r$, alors :

$$\eta_2 = h_{min}/h_{max} = \cos(\beta/2) . \quad (2.3)$$

Ces résultats sont pour une seule patte, mais, si le robot marche en tripode, l'angle entre deux pattes est divisé par deux. Le second critère de performance devient alors :

$$\eta_2 = \cos(\beta/4) \quad (2.4)$$

qui donne 70,7% pour une patte à une ou deux branches, 86,6% pour une patte à trois branches et 92,4% pour une patte à quatre branches.

Le choix optimal est la solution des pattes à trois branches si une importance égale est donnée à η_1 et η_2 tel que montré à la figure 2.3. Néanmoins, la solution des pattes à quatre branches est celle qui a été retenue. Il a été décidé de se concentrer sur la diminution de l'amplitude d'oscillation puisque le requis concernant la hauteur de l'obstacle à franchir (5 cm) était déjà respecté par le design des pattes (la longueur des branches est de 6,25 cm). De plus, pour l'exploration planétaire, l'efficacité énergétique doit être maximisée afin d'obtenir un cycle de travail élevé. En effet, la consommation d'énergie est proportionnelle à l'amplitude du mouvement, Δh , dû à la perte d'énergie potentielle gravitationnelle à chaque pas, ΔU_g , suivant la relation :

$$\Delta U_g = mg\Delta h \quad (2.5)$$

où m est la masse de la patte et g est la gravité.

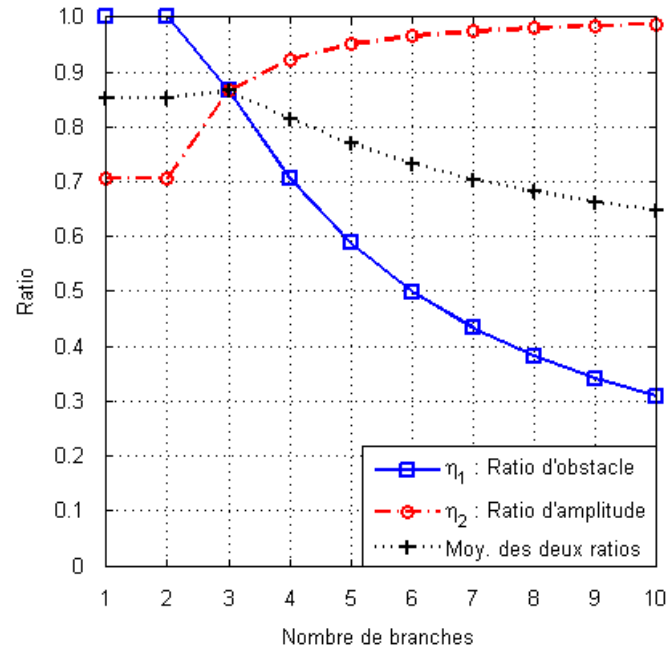


Figure 2.3 : Comparaison des critères de performance.

Lorsque le robot marche en tripode, l'amplitude d'oscillation du centre de masse le long de l'axe vertical est exprimé par :

$$\Delta h = h_{max} - h_{min} = r[1 - \cos(\beta/4)] \quad (2.6)$$

ou, sous une forme normalisée, par :

$$\Delta h/h_{max} = 1 - \cos(\beta/4) \quad (2.7)$$

ce qui donne 29,3% pour une patte à une ou deux branches, 13,4% pour une patte à trois branches et 7,6% pour une patte à quatre branches.

Tel que mentionné plus tôt, un pied est placé au bout de chacune des branches. L'ajout de cette caractéristique diminue l'amplitude d'oscillation. Pour chaque pas entre deux branches d'une patte, le mouvement est divisé en trois portions, tel qu'illustré à la figure 2.4.

La position du centre de masse de la patte et, par extension, celle de la plateforme,

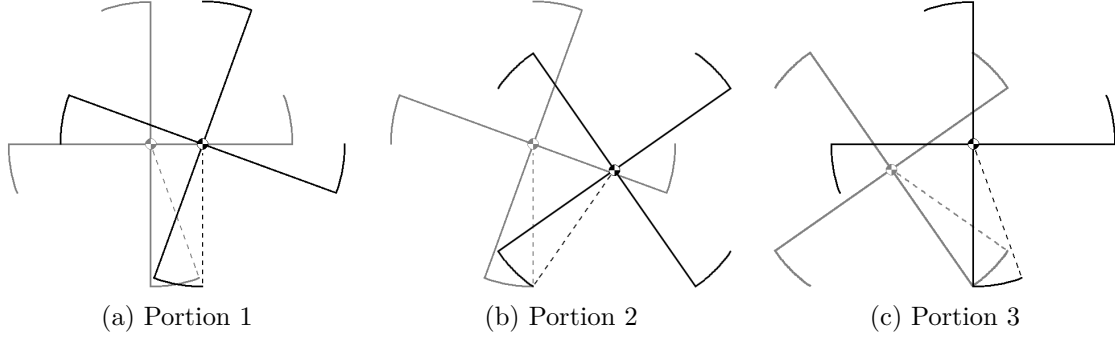


Figure 2.4 : Division d'un pas en trois portions.

est donnée par :

$$\vec{p}_1 = \begin{bmatrix} r\theta \\ 0 \\ r \end{bmatrix} \text{ pour } 0 \leq \theta < \gamma \quad (2.8)$$

$$\vec{p}_2 = \begin{bmatrix} r[\gamma + \sin(\theta - \gamma)] \\ 0 \\ r \cos(\theta - \gamma) \end{bmatrix} \text{ pour } \gamma \leq \theta < \frac{\beta + \gamma}{2} \quad (2.9)$$

$$\vec{p}_3 = \begin{bmatrix} r[\gamma + 2 \sin(\frac{\beta - \gamma}{2}) - \sin(\beta - \theta)] \\ 0 \\ r \cos(\beta - \theta) \end{bmatrix} \text{ pour } \frac{\beta + \gamma}{2} \leq \theta < \beta \quad (2.10)$$

où γ est l'angle central de l'arc et θ est la position angulaire de la patte qui est donnée par :

$$\theta = \omega t \quad (2.11)$$

où ω , la vitesse angulaire de la patte par rapport à son propre centre de masse, est considérée comme constante et t est le temps. L'amplitude d'oscillation est obtenue en calculant la coordonnée z de la position du centre de masse au début et à la fin de

chaque portion du pas. Ainsi, elle devient :

$$\Delta h = \begin{cases} 0 & \text{pour } 0 \leq \theta < \gamma \\ r[\cos(\frac{\beta-\gamma}{2}) - 1] & \text{pour } \gamma \leq \theta < \frac{\beta+\gamma}{2} \\ -r[\cos(\frac{\beta-\gamma}{2}) - 1] & \text{pour } \frac{\beta+\gamma}{2} \leq \theta < \beta . \end{cases} \quad (2.12)$$

Cette équation peut être normalisée en divisant par la longueur de la branche. Pour une patte seule de PROMPT V2 ($\beta = 90$ degrés et $\gamma = 20$ degrés), l'amplitude d'oscillation est égale à 18% de la longueur de la branche.

Une autre information précieuse qui peut être calculée à partir de l'équation de la position est la distance que le centre de masse parcourt le long de l'axe horizontal pour un pas entre deux branches :

$$\Delta x = r[\gamma + 2 \sin(\frac{\beta - \gamma}{2})] . \quad (2.13)$$

Cette équation peut aussi être normalisée en divisant par le rayon et est égale à 150% de la longueur de la branche pour une patte seule de PROMPT V2. Ces deux paramètres, Δh et Δx , seront utilisés dans la section suivante pour calculer l'efficacité énergétique d'une patte à quatre branches versus celle d'une patte à trois branches.

Pour calculer la vitesse du centre de masse, la dérivée de la position est effectuée, ce qui donne :

$$\vec{v}_1 = \begin{bmatrix} r\omega \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ pour } 0 \leq \theta < \gamma \quad (2.14)$$

$$\vec{v}_2 = \begin{bmatrix} r\omega \cos(\theta - \gamma) \\ 0 \\ -r\omega \sin(\theta - \gamma) \end{bmatrix} \text{ pour } \gamma \leq \theta < \frac{\beta + \gamma}{2} \quad (2.15)$$

$$\vec{v}_3 = \begin{bmatrix} r\omega \cos(\beta - \theta) \\ 0 \\ r\omega \sin(\beta - \theta) \end{bmatrix} \text{ pour } \frac{\beta + \gamma}{2} \leq \theta < \beta . \quad (2.16)$$

Le module de la vitesse est constant tout au long des trois portions du pas :

$$v = r\omega . \quad (2.17)$$

Toutes les équations cinématiques présentées peuvent être utilisées pour un robot qui marche en tripode en remplaçant β par $\beta/2$. Ainsi, pour PROMPT V2, Δh et Δx deviennent respectivement 2,4% et 78% de la longueur de la branche.

2.3 Dynamique

Puisque le contexte de la présente étude est lié aux applications spatiales, il est évident que la faible consommation d'énergie doit être une priorité. Dans le design d'un robot, l'inefficacité peut être trouvée dans différents sous-systèmes tel que les composants mécaniques et électriques ou, plus probablement, dans le design lui-même. Alors que les composants peuvent être remplacés pour améliorer l'efficacité, le robot, lui, doit être conçu pour être efficace dès le départ.

Dans cette section, l'objectif est d'examiner la capacité théorique de la plateforme à minimiser la consommation d'énergie et d'aider, dans le futur, à caractériser expérimentalement les pertes découlant de la mécanique et des composants électriques du prototype.

Ainsi, la variation de l'énergie potentielle gravitationnelle d'une patte seule est calculée pour les trois portions d'un pas entre deux branches selon les équations (2.5)

et (2.12) :

$$\Delta U_g = mg\Delta h = mg \begin{cases} 0 & \text{pour } 0 \leq \theta < \gamma \\ r[\cos(\frac{\beta-\gamma}{2}) - 1] & \text{pour } \gamma \leq \theta < \frac{\beta+\gamma}{2} \\ -r[\cos(\frac{\beta-\gamma}{2}) - 1] & \text{pour } \frac{\beta+\gamma}{2} \leq \theta < \beta. \end{cases} \quad (2.18)$$

Par conséquent, l'énergie potentielle gravitationnelle ne varie pas durant la première portion du pas, mais varie lors des autres portions. L'énergie est perdue dans la seconde portion puisque les actionneurs ne sont pas équipés pour convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. De plus, ils doivent fournir de l'énergie pour garder la vitesse angulaire constante. En conséquence, pour un tour complet de la patte ($0 \leq \theta \leq 2\pi$), l'énergie requise est, sous une forme normalisée :

$$\frac{\Delta U_g}{mgr} = -n[\cos(\frac{\beta-\gamma}{2}) - 1]. \quad (2.19)$$

En faisant l'hypothèse que le robot marche en tripode, l'énergie requise devient alors, sous une forme normalisée :

$$\frac{\Delta U_g}{mgr} = -2n[\cos(\frac{\beta-2\gamma}{4}) - 1] \quad (2.20)$$

ce qui donne 80% pour $n = 3$ et $\gamma = 0$, 61% pour $n = 4$ et $\gamma = 0$, et 19% pour $n = 4$ et $\gamma = 20$ degrés.

En outre, si l'équation (2.13) est utilisée pour calculer la distance que le centre de masse d'une patte parcourt le long de l'axe horizontal pour un tour complet et que la plateforme marche en tripode, la distance totale est donnée par :

$$\Delta x_{total} = 2nr[\gamma + 2\sin(\frac{\beta-2\gamma}{4})] \quad (2.21)$$

ce qui donne 6 fois la longueur de la branche pour $n = 3$ et 6,12 fois pour $n = 4$. Si cette distance est comparée à celle parcourue par une roue pour un tour complet ($2\pi r$), l'efficacité d'une patte à trois branches est de 95,5% et celle d'une patte à quatre branches est de 97,4% si les deux robots marchent en tripode. Avec ses pieds de 20 degrés

d'arc, PROMPT V2 possède une efficacité de 99,6% par rapport à la roue.

Pour être en mesure de vraiment comparer la solution à trois branches avec celle à quatre branches, l'énergie requise par distance parcourue est calculée. Ainsi, elle est obtenue en utilisant les équations (2.20) et (2.21) :

$$\frac{\Delta U_g}{\Delta x_{total}} = \frac{-mg[\cos(\frac{\beta-2\gamma}{4}) - 1]}{[\gamma + 2 \sin(\frac{\beta-2\gamma}{4})]} \quad (2.22)$$

ce qui donne 13,4% mg J/m pour $n = 3$ et 9,95% mg J/m pour $n = 4$. La solution à quatre branches est ainsi 1,33 fois plus efficace, en terme d'énergie, que celle à trois branches. Ces résultats sont valides pour des roues sans jante et sans pied. Avec ses pieds, PROMPT V2 requiert 3,03% mg J/m pour marcher. Cette comparaison prend seulement en compte l'énergie potentielle gravitationnelle. Le système est considéré comme étant en régime permanent (l'accélération et l'accélération angulaire sont nulles) et le frottement est négligé.

2.3.1 Formulation de Lagrange

Un modèle dynamique est établi en utilisant la formulation de Lagrange pour obtenir un modèle plus détaillé de la plateforme. Avec l'hypothèse que le robot marche toujours en tripode et en modélisant aussi l'effet de la masse de la plateforme comme une masse ponctuelle au bout de chaque patte, l'équation dynamique résultante est :

$$\tau = (I_{yy} + \frac{m_{robot}}{3})\ddot{\theta} + \frac{m_{robot}}{3}gr \cos \theta \quad (2.23)$$

où I_{yy} est le moment d'inertie de la patte autour de son axe de rotation et m_{robot} est la masse de la plateforme.

Puisque les robots marcheurs possèdent une topologie variable, l'application de cette formule n'est pas triviale. En effet, sous cette forme, elle représente le couple requis lorsque la patte est en contact avec le sol. L'autre état existe lorsque le contact est perdu. Dans ce cas, le couple dépend seulement de l'inertie des pattes. En tenant seulement

compte de ces deux états et de leur domaine de validité, l'équation dynamique devient :

$$\tau = \begin{cases} \left(I_{yy} + \frac{m_{robot}}{3} \right) \ddot{\theta} + \frac{m_{robot}}{3} gr \cos \theta & , \frac{(3+4i)\pi}{8} \geq \theta \leq \frac{(5+4i)\pi}{8} \\ I_{yy} \ddot{\theta} & , \text{sinon} \end{cases} \quad (2.24)$$

où $i = 0,1,2,3,\dots$. Cette équation est uniquement valide pour une patte. Pour calculer le couple global requis lors de la démarche tripode, le couple total transmis à toutes les pattes doit être déterminé, donc trois pattes suivant l'équation (2.24) et trois autres suivant la même équation, mais déphasées de $\pi/4$. Ce modèle sera utilisé pour simuler la dynamique du robot.

2.4 Conclusion

Le modèle de PROMPT V2 a été présenté pour établir les repères de la plateforme. Les analyses cinématiques et dynamiques ont ensuite été effectuées dans le but de traduire les mouvements et les forces en équations mathématiques. Celles-ci ont permis de comparer différents modèles de robots marcheurs entre eux.

Chapitre 3

Conception

Pour réaliser un projet technique tel que la création de PROMPT V2, plusieurs étapes de design ont dû être franchies. Ces phases de travail ont été successives, mais elles ont aussi été itératives. Elles ont parfois dû être reprises plusieurs fois avant d'arriver au résultat final. La première étape a été d'établir un modèle du robot. Pour ce faire, des croquis du concept ont été dessinés à la main pour déterminer les formes principales du système et pour mettre sur papier les idées préliminaires. Ensuite, est venue l'étape de la fabrication d'un premier prototype rapide servant de brouillon. Il a en effet été un outil formidable pour matérialiser et conceptualiser les idées élaborées sur les croquis. Ce modèle concret et visuel a permis de vérifier la viabilité de la solution retenue et de comprendre les interactions entre les différentes composantes. Une fois cette étape complétée, un modèle 3D a été créé à l'aide d'un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO).

3.1 Contraintes

La complexité à concevoir un système est proportionnelle au nombre de contraintes devant être respectées. Ces dernières lient les dimensions physiques entre elles pour former un ensemble cohérent. L'élégance d'une solution émane de la simplicité et de la robustesse avec lesquelles le besoin est comblé ou le problème est résolu. Pour s'assurer du succès, il est d'abord nécessaire de dresser la liste de ces contraintes. Elles sont ensuite traduites en équations pour connaître les relations mathématiques qui existent entre les différents paramètres. À ce moment, il est parfois requis de formuler des hypothèses ou de choisir arbitrairement une valeur de départ pour pouvoir entamer le processus. Les éléments inconnus sont ensuite exprimés en fonction des variables qui représentent les dimensions connues. Une première itération est effectuée en remplaçant les variables par des valeurs potentielles et en résolvant les équations. Il est alors nécessaire de vérifier que les contraintes sont bien respectées. Plusieurs itérations sont quelquefois requises pour trouver une solution. Souvent, plusieurs solutions existent. Dans de telles situations, des méthodes d'optimisation sont utilisées pour trouver la ou les meilleures options. Viennent se greffer à ce processus de design des contraintes de fabrication, de méthodes, de coûts, d'échéanciers, de fournisseurs, de disponibilité des ressources, de normes, de réglementations, de lois, etc. Cet amalgame de défis rend la conception d'un système aussi passionnante que complexe. Les sections qui suivent présentent les différentes étapes impliquées dans le design de PROMPT V2.

3.1.1 Polygone de contact

Au moment de concevoir PROMPT V1, plusieurs paramètres ont été choisis de façon arbitraire. Le but initial était de fabriquer un prototype simple afin de prouver la viabilité du concept proposé. Grâce à ce premier banc d'essai, plusieurs hypothèses ont pu être mises à l'épreuve. Entre autres, la configuration des pattes a évolué au cours du projet. Elles ont d'abord été placées de façon à ce que le polygone de contact soit sous la forme d'un sablier (voir figure 3.1a). Cette configuration a vite démontré sa faiblesse, car le robot avait tendance à basculer sur le côté et à rester coincé. Les pattes ont alors été placées pour former un hexagone (voir figure 3.1b). Les dimensions de cet hexagone ont été choisies sans fondement mathématique particulier.

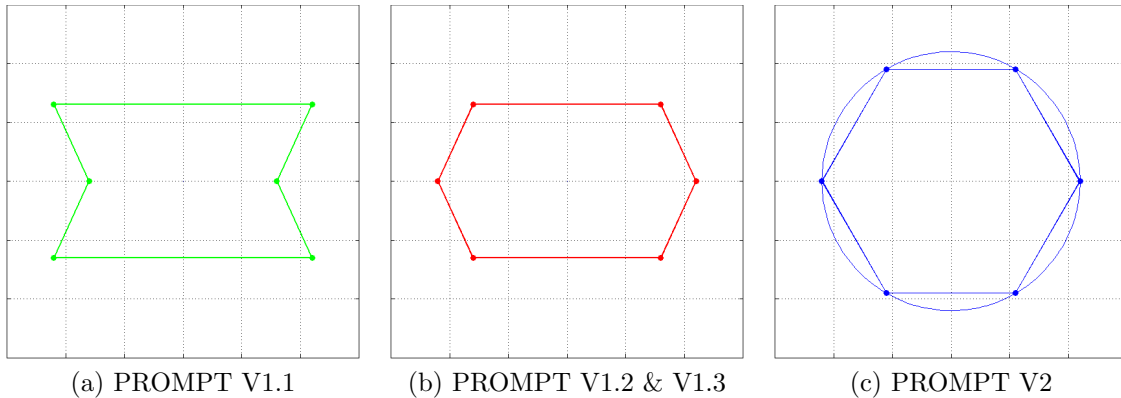


Figure 3.1 : Comparaison des polygones de contact.

C'est précisément la forme du polygone de contact qui a été le point de départ de la conception de PROMPT V2. En effet, l'hypothèse initiale est que la forme optimale du polygone de contact est un hexagone régulier (voir figure 3.1c). Les dimensions de la plateforme sont toutes basées sur cette hypothèse. Le principal avantage d'utiliser cette forme spécifique est la résistance à la perte d'équilibre.

3.1.1.1 Résistance à la perte d'équilibre

En supposant que les six pattes du robot touchent au sol en même temps, c'est-à-dire que six branches sont orthogonales avec le sol, et que le polygone formé par les points de contact est un hexagone régulier, il devient possible d'évaluer la résistance à la perte d'équilibre de la plateforme. Comme tout polygone régulier est inscrit dans un cercle, cette configuration correspond à un cas optimal puisqu'elle confère au robot une excellente stabilité dans toutes les directions.

Le cas du tangage est moins inquiétant dû au fait qu'il est dans l'axe de déroulement des pieds du robot. En culbutant, celui-ci retombe sur ses pattes, car il est symétrique et réversible. Le cas du roulis est plus inquiétant, car le robot peut rester coincé sur le côté étant donné que la patte forme une croix à quatre branches. Le robot se met à tourner autour de l'axe central sans jamais pouvoir se redresser par lui-même. Une intervention extérieure est alors requise et cette situation entraîne l'échec de la mission. Ce problème est connu depuis longtemps. Lorsque la configuration des pattes était sous la forme d'un sablier, le problème était plus grave, car le robot était encore plus stable lorsque placé sur le côté. Depuis que la configuration des pattes est en hexagone, le

problème se manifeste moins fréquemment, mais il existe toujours.

Trois solutions sont connues. La première est mécanique. Elle consiste à ajouter une forme demi-hémisphérique sur le côté des pattes extérieures. Cette solution présente le désavantage d'ajouter de la masse et de l'inertie au robot. Un autre désavantage est que la largeur du robot augmente. Son avantage est d'être un système passif. La deuxième solution est électronique. Elle consiste à intégrer des inclinomètres au système et à immobiliser le robot avant qu'il ne bascule. Cette solution possède l'avantage de ne pas ajouter de masse de façon significative. Son désavantage est d'augmenter la complexité de la programmation, car c'est un système actif. La troisième solution est beaucoup plus complexe, mais tire avantage d'un ajout fort intéressant qui pourrait être fait à la plateforme éventuellement. Elle consiste à utiliser un bras manipulateur pour déplacer le centre de masse du robot à l'extérieur du polygone de contact.

3.1.2 Design initial

Maintenant que la forme du polygone de contact est déterminée, il devient possible de traduire cette contrainte en équations mathématiques et d'effectuer les premiers choix de design. Le point de départ du design est le calcul de l'apothème du polygone de contact. L'apothème est défini comme le segment joignant le centre d'un polygone régulier à l'intersection d'une ligne perpendiculaire abaissée du centre sur un côté. Pour un hexagone régulier, il est donné par :

$$a = \frac{\sqrt{3}}{2} r_c \quad (3.1)$$

où a est l'apothème et r_c est le rayon du cercle circonscrit.

Pour PROMPT, calculer l'apothème du polygone de contact idéal correspond à déterminer l'entraxe des arbres de transmission. À partir de cette première hypothèse, la longueur requise pour les chaînes peut être trouvée. Celles-ci doivent être achetées chez un fournisseur. Mis à part quelques spécimens fabriqués sur mesure, la plupart des chaînes qu'il est possible de trouver sur le marché respectent des standards établis par l'industrie pour uniformiser les produits et favoriser l'interchangeabilité des pièces. L'American National Standards Institute (ANSI) régit le pas (*pitch*) des chaînes et des pignons qui possèdent des caractéristiques intéressantes pour le projet du petit robot

marcheur.

Le pas de la chaîne et celui des pignons doivent correspondre pour être en mesure d'entraîner les arbres de transmission. Puisque l'apothème, ou l'entraxe des arbres, est connu grâce à l'équation (3.1) et que le diamètre primitif (*pitch diameter*) des pignons est fourni par les normes ANSI, la longueur de la chaîne, tel qu'illustré à la figure 3.2, est donnée par :

$$l = 2a + \pi d_p \quad (3.2)$$

où l est la longueur de la chaîne et d_p est le diamètre primitif des pignons.

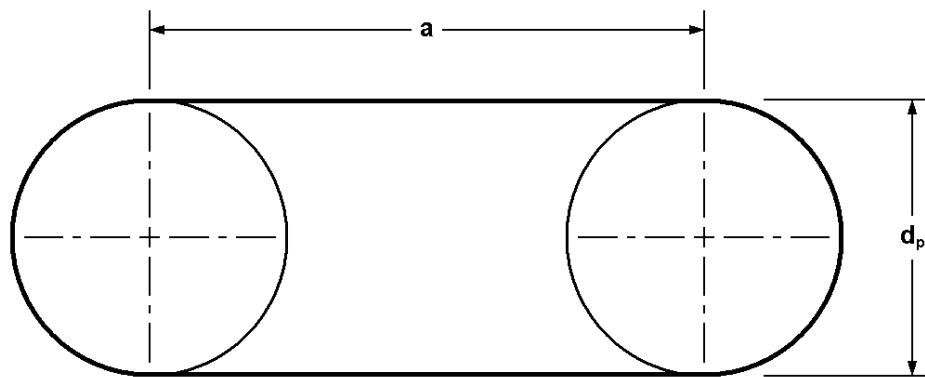


Figure 3.2 : Longueur de la chaîne.

Le nombre de maillons qui composent la chaîne est ensuite calculé en divisant la longueur de cette dernière par son pas, tel que :

$$n_{\text{maillons}} = l/p \quad (3.3)$$

où n_{maillons} est le nombre de maillons et p est le pas de la chaîne.

Puisque la longueur de la chaîne est donnée par un nombre fini de maillons, si le résultat obtenu avec l'équation (3.3) n'est pas un entier, alors il est nécessaire d'arrondir au nombre pair le plus près. En effet, afin de simplifier l'usinage et l'assemblage de plusieurs composants de la plateforme, certains paramètres doivent être choisis judicieusement. Par exemple, le nombre de maillons des chaînes doit être pair et le nombre de dents des pignons doit être un multiple de huit pour que les plats sur les arbres et les trous filetés des pignons et des engrenages soient alignés et perpendiculaires. Cette règle provient du fait que les éléments de transmission doivent maintenir le déphasage

entre les pattes placées du même côté afin de permettre au robot de marcher en tripode. Pour assurer le bon fonctionnement de PROMPT, les pattes doivent conserver un angle de 45 degrés entre elles.

La longueur de la chaîne est recalculée en utilisant l'inverse de l'équation (3.3), soit :

$$l = pn_{\text{maillons}} . \quad (3.4)$$

Le résultat obtenu est ensuite utilisé pour calculer le nouvel apothème grâce à l'inverse de l'équation (3.2), soit :

$$a = \frac{l - \pi d_p}{2} . \quad (3.5)$$

De là, le nouveau rayon du cercle circonscrit est obtenu en inversant l'équation (3.1), ce qui donne :

$$r_c = \frac{2\sqrt{3}}{3}a . \quad (3.6)$$

Pour le design de PROMPT, cette dernière mesure correspond à la distance entre le centre des pattes extérieures et le centre géométrique du robot. Elle correspond également à la distance entre les deux pattes avant qui se trouve à être la même que celle entre les deux pattes arrière. Les formules trouvées ont servi à calculer les dimensions de la plateforme. Le détail de cette démarche est présenté à l'annexe E.6.

3.1.3 Orientation et position des moteurs

Lors de la conception de PROMPT V1, les moteurs ont été placés perpendiculairement au sens de la longueur du robot. Ainsi, l'arbre de sortie se trouve aligné avec l'axe de rotation des arbres et de l'ensemble des éléments de transmission. Un accouplement est utilisé pour transmettre le mouvement et le couple. Cet agencement a dicté la largeur de la plateforme. En effet, ce paramètre est déterminé en fonction de la longueur du moteur, de la largeur des paliers lisses, des poulies crantées, du support à moteur, de l'accouplement et des jeux entre les différents composants.

Les dimensions de l'assemblage formé du réducteur, du moteur et de l'encodeur varient notamment en fonction des besoins en puissance du robot. En général, il est possible d'affirmer que les dimensions et la puissance du moteur sont des paramètres qui varient proportionnellement. En poursuivant la réflexion, il est possible de constater que plus la largeur de la plateforme augmente, plus la masse du robot augmente et donc plus les dimensions des moteurs augmentent étant donnée la configuration utilisée pour PROMPT V1. Le raisonnement inverse est aussi vrai. Une spirale de conception qui n'est pas souhaitable est ainsi amorcée. C'est pourquoi, pour le nouveau prototype, il a été décidé de placer les moteurs parallèlement à l'axe longitudinal du robot et d'utiliser une paire d'engrenages coniques droits. De cette façon, la largeur de la plateforme n'est plus directement liée à la longueur des moteurs.

La position des moteurs par rapport aux éléments de transmission a aussi été modifiée. Lors du design de PROMPT V1, les moteurs ont été placés aux extrémités de la plateforme. Sous cette configuration, l'arbre de sortie entraîne le premier arbre qui, lui, entraîne le deuxième via une courroie crantée, qui à son tour entraîne le troisième arbre. Le premier arbre tourne par entraînement direct grâce à l'accouplement, mais une courroie sépare le premier du deuxième arbre et deux courroies séparent le premier du troisième. L'élasticité des courroies s'additionne d'un élément à l'autre. Cela a pour effet qu'il existe une compliance non désirée et non négligeable dans la deuxième et la troisième patte. Cette situation peut altérer la qualité de la démarche tripode.

Aussi, du point de vue de la fiabilité, dans l'éventualité malheureuse où la première courroie se rompt ou que la poulie se met à glisser, la première patte sera toujours entraînée, mais les deux autres ne le seront plus.

Un autre problème lié à cet agencement est celui de l'ajustement de la tension dans les courroies. En effet, pour PROMPT V1, pour modifier la tension, il est nécessaire de déplacer l'assemblage du moteur et celui du support à palier lisse. Avec l'usure de ces paliers lisses, il a même été observé que l'arbre de sortie du moteur doit maintenant supporter une charge radiale proportionnelle à la tension dans la courroie.

Afin de résoudre ces trois problèmes, l'arbre de sortie du moteur est maintenant lié à l'arbre du centre. Ainsi, la compliance est également distribué entre les deux autres arbres. De plus, si une des courroies se rompt, deux pattes sur trois restent fonctionnelles. Enfin, en plaçant le moteur au centre, il n'est plus nécessaire de le

déplacer pour ajuster la tension des courroies, car les éléments qui doivent être déplacés se trouvent aux extrémités de la plateforme.

3.2 Modélisation

L'étape suivante consiste à modéliser le robot à l'aide d'un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO). Chaque pièce est d'abord créée pour être ensuite assemblée afin de réaliser le modèle du système. Le logiciel CAO utilisé pour concevoir PROMPT V2 est SolidWorks.

3.3 Revue de design

La revue de design ou *Critical Design Review* (CDR) est une réunion formelle où la configuration du système est capturée et figée dans le temps. Elle servira de référence jusqu'à la fin du projet. Elle permet de sauvegarder l'ensemble des paramètres issus de la conception avant d'entamer la fabrication et les itérations de design. Les changements apportés au système après cette étape critique devront tous être documentés de façon précise pour pouvoir retracer l'historique des corrections effectuées au fur et à mesure que le projet évolue. Le but est de déterminer et de s'assurer que le nouveau système est assez mature pour passer à la prochaine phase de développement. Le processus est décrit en détail dans [17].

Un CDR a été tenu lorsque le design de PROMPT V2 a été considéré comme assez avancé. L'objectif était de juger si le projet proposé était prêt à aller de l'avant, s'il était nécessaire de retourner en phase de design pour corriger certaines faiblesses ou si encore la fabrication pouvait être commencée sous des conditions particulières visant à répondre aux doutes émis lors de la réunion. Le comité responsable de cette tâche était formé du directeur de maîtrise, des professionnels de recherche, du technicien en usinage attribué au projet et d'étudiants venus assister à la réunion. Le concepteur était chargé de présenter le design et de répondre aux questions.

Voici brièvement le contenu de ce CDR :

- Leçons apprises
- Requis du système
 - Matrice de conformité (voir annexe E.1)
- Architecture du système
 - Arbre de produit (voir annexe E.2)
 - Nomenclature (voir annexe E.3)
- Présentation du design
- Gestion du risque
 - Registre de risques (voir annexe E.4)
- Gestion de projet
 - Échéancier (voir annexe E.5)
- Conclusions

3.3.1 Présentation du design

Après que les leçons apprises aient été rappelées et que les objectifs de design aient été exposés, le design retenu a été présenté par le concepteur au comité évaluateur. Pour ce faire, l'arbre du produit est utilisé. Il synthétise la configuration sous la forme d'un organigramme qui détaille l'architecture du système. Les liens et les relations hiérarchiques qui existent entre les différents composants s'y retrouvent illustrés globalement. Il doit être mis à jour régulièrement, car il reflète l'état du système dans son ensemble et sa complexité. L'information présentée doit être claire et précise. Elle servira à bâtir un autre outil incontournable : la nomenclature du système ou *Bill of Material* (BOM).

Le robot est un système qui comprend plusieurs composants. La plateforme constitue l'élément central sur lequel l'ensemble des pièces sont attachées directement ou indirectement. Les deux moteurs, eux, transforment l'énergie électrique des piles en énergie mécanique, ce qui permet au robot de se déplacer. La puissance des moteurs est transmise aux pattes grâce à des pignons et des chaînes montés sur des arbres

tournants. Le microcontrôleur, un ordinateur miniature, est responsable d'interpréter les commandes reçues par l'émetteur/récepteur radio et de les traduire pour ensuite les transmettre aux moteurs. La caméra, elle, capte les images vues par le robot et les transmet au pilote qui contrôle le véhicule à distance. Enfin, le couvercle sert à protéger l'intérieur du robot et les panneaux solaires s'y trouvent fixés pour capter l'énergie du soleil. La section suivante présente le design du système de façon détaillée tel qu'il a été présenté lors du CDR.

3.4 PROMPT V2

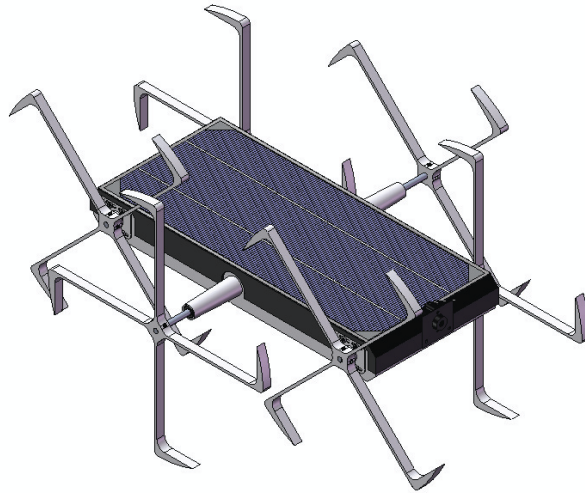


Figure 3.3 : Modèle CAO de PROMPT V2.1.

PROMPT V2 (voir figure 3.3) est l'assemblage de tête ou *Top Assembly*. Il se divise en deux assemblages distincts : la plateforme et le couvercle. La plateforme est l'élément qui contient la plupart des éléments mécaniques tandis que le couvercle contient surtout les composants électroniques. Les dimensions du couvercle dépendent de celles de la plateforme. Les avantages à séparer ces deux entités en assemblages distincts sont que les travaux de fabrication et les tests peuvent être effectués en parallèle.

3.5 Plateforme (assemblage)

L'assemblage de la plateforme (voir figures 3.4, 3.5 et 3.6) est le composant principal de PROMPT. Il réunit presque toutes les pièces mécaniques du robot. En effet, il contient les deux actionneurs, les supports, les éléments de transmission de puissance, les pattes, la batterie ainsi que des câbles et des connexions.

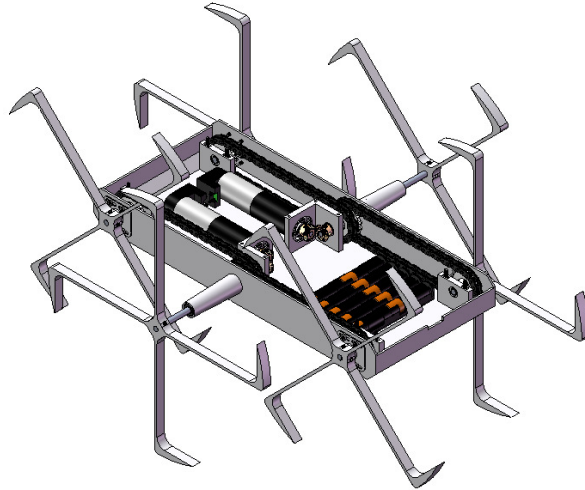


Figure 3.4 : Modèle de la plateforme (vue isométrique).

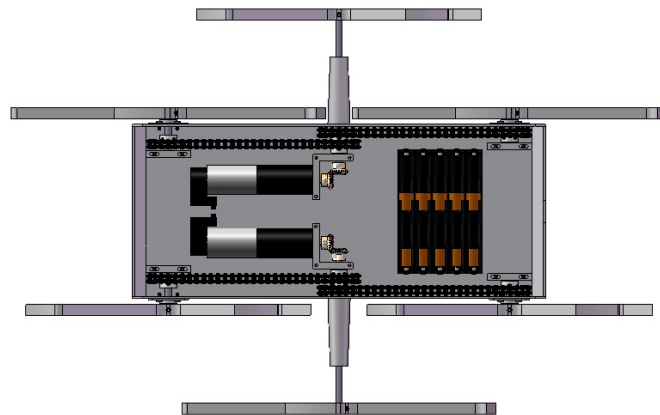


Figure 3.5 : Modèle de la plateforme (vue de dessus).

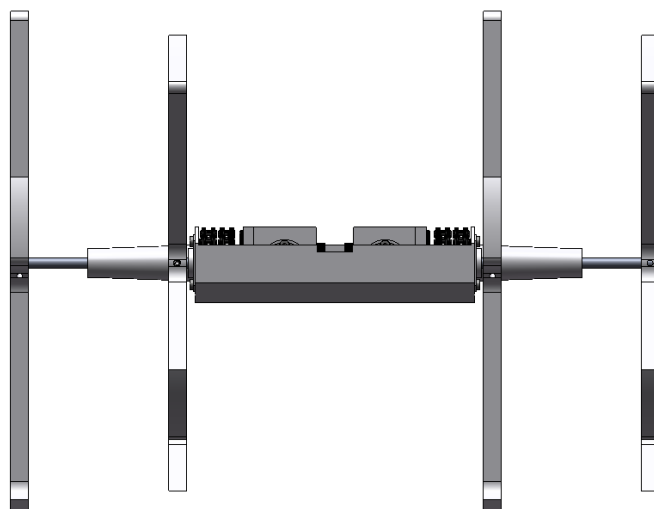


Figure 3.6 : Modèle de la plateforme (vue de face).

3.5.1 Plateforme (pièce)

La plateforme en tant que telle (voir figure 3.7) est l'élément structural qui fournit la rigidité à tout le système. Elle est fabriquée à partir d'un bloc d'aluminium 6061-T6. C'est la plus lourde pièce du montage. Le couvercle et les supports y sont tous fixés. Sa forme aux extrémités chanfreinées confère au robot une meilleure manoeuvrabilité en augmentant ses chances de franchir un obstacle dans l'éventualité où la plateforme devait le rencontrer avant les pattes.

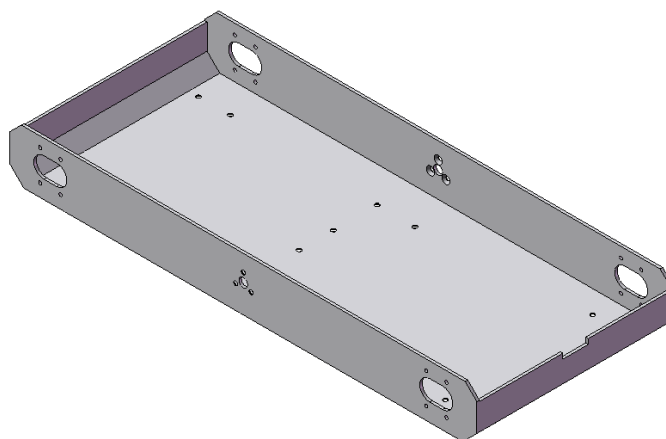


Figure 3.7 : Modèle de la plateforme (pièce).

3.5.2 Actionneur

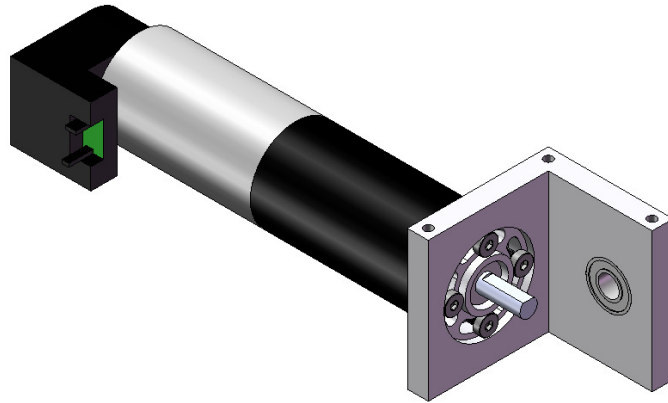


Figure 3.8 : Modèle de l'actionneur.

L'assemblage de l'actionneur (voir figure 3.8) est constitué d'un moteur et d'un support central.

3.5.2.1 Moteur

Le choix des moteurs (voir figure 3.9) s'est porté sur des A-max 26 d'un diamètre de 26 mm, commutation graphite, 11 W (*High Power*) équipés de réducteurs planétaires GP 26 B, 0,5 - 2,0 Nm possédant un ratio de 231 pour 1 et d'encodeurs Enc 22, 100 impulsions, 2 canaux. Les spécifications des moteurs sont présentées à l'annexe C.2 et les calculs associés, à l'annexe E.7.

3.5.2.2 Support central

Le support central (voir figure 3.10) permet d'assurer le positionnement et la perpendicularité de la paire d'engrenages coniques droits. Le moteur y est fixé grâce à quatre vis. Des rainures sont pratiquées dans la pièce afin de pouvoir ajuster l'angle moteur. En effet, afin de réduire la hauteur de la plateforme, les encodeurs sont alignés avec la base du robot. Un roulement 686-ZZ est inséré dans le support central pour accueillir le bout intérieur de l'arbre central. La pièce est fabriquée à partir d'une cornière en aluminium 6061-T6.

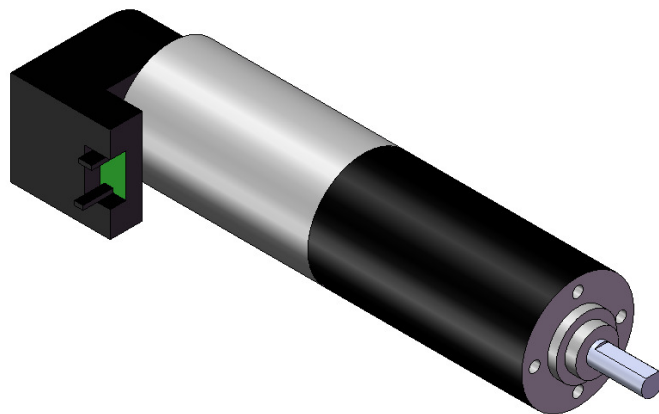


Figure 3.9 : Modèle du moteur.

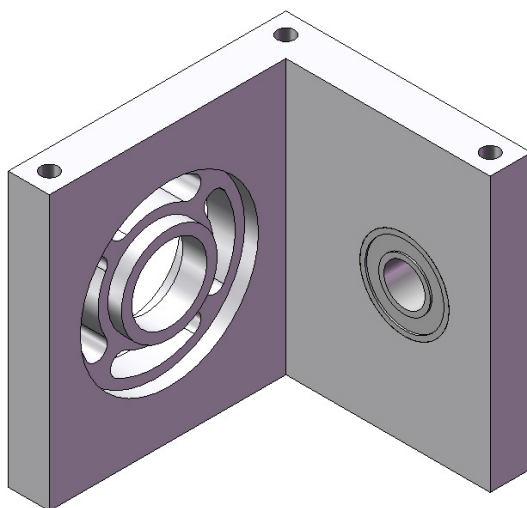


Figure 3.10 : Modèle du support central.

3.5.3 Supports

L'assemblage virtuel des supports regroupe deux supports latéraux, quatre supports à arbre et quatre supports à roulement.

3.5.3.1 Support latéral

Le support latéral (voir figure 3.11) est un assemblage qui a été ajouté au nouveau design afin de fournir un meilleur appui à l'arbre central. Pour respecter les dimensions de l'hexagone régulier, les pattes centrales de PROMPT V2 sont plus éloignées du corps que le sont celles de PROMPT V1. L'arbre central doit donc être allongé en conséquence et, pour éviter qu'il ne fléchisse sous le poids du robot, le nouveau composant doit offrir un maintien adéquat. Le support latéral est constitué d'un support à arbre fait d'aluminium 6061-T6 dans lequel un roulement 686-2RS est inséré. Ce dernier est scellé puisqu'il est en contact avec l'environnement extérieur.



Figure 3.11 : Modèle du support latéral.

3.5.3.2 Support à arbre

Le support à arbre (voir figure 3.12) est une pièce fabriquée en aluminium 6061-T6 dans laquelle un roulement 686-ZZ est inséré. Cet assemblage, en tandem avec le support à roulement, permet d'ajuster la position de l'arbre qu'il supporte ainsi que la tension de la chaîne.

3.5.3.3 Support à roulement

Le support à roulement (voir figure 3.13) est une pièce fabriquée en aluminium 6061-T6 dans laquelle un roulement 686-2RS est inséré. Cet assemblage, en tandem

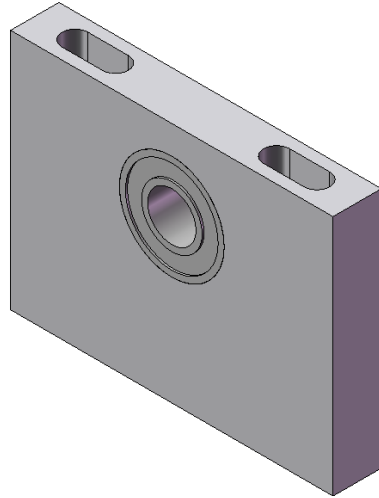


Figure 3.12 : Modèle du support à arbre.

avec le support à arbre, permet d'ajuster la position de l'arbre qu'il supporte ainsi que la tension de la chaîne.

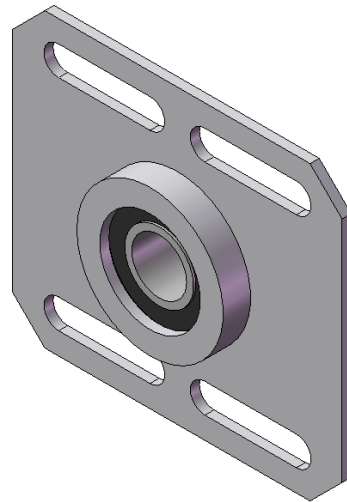


Figure 3.13 : Modèle du support à roulement.

3.5.4 Éléments de transmission de puissance

Le rôle des éléments de transmission de puissance est clairement illustré par leur nom : ils transmettent le mouvement et le couple du moteur aux pattes du robot. Cet assem-

blage virtuel regroupe six arbres, quatre engrenages, huit pignons et quatre chaînes.

3.5.4.1 Arbres

Les arbres (voir figure 3.14) se divisent en trois types : avant, central et arrière. Ces pièces sont fabriquées par paire avec de la *Drill Rod* ANSI 01 d'un diamètre de 6 mm. Aux endroits requis, deux plats perpendiculaires sont usinés pour que les vis de pression viennent s'y appuyer. Deux rainures sont pratiquées pour accueillir les anneaux élastiques qui servent à empêcher l'arbre de se déplacer axialement.

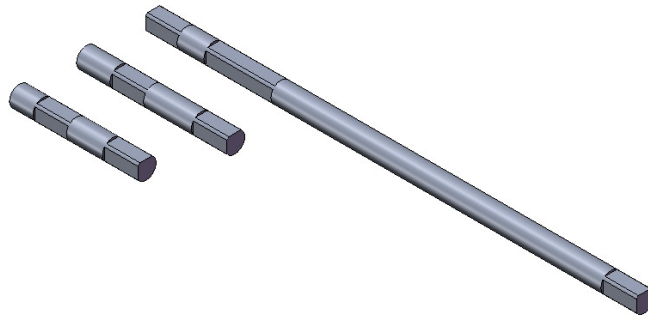


Figure 3.14 : Modèle des arbres.

3.5.4.2 Engrenages

Les engrenages coniques droits (voir figure 3.15) sont fabriqués en laiton. Ils comptent chacun 20 dents. L'alésage interne des pièces de départ sont usinées pour en créer deux types, soient ceux de 5 mm et ceux de 6 mm. Les premiers sont montés sur les arbres de sortie des moteurs et les deuxièmes, sur le bout des arbres centraux. Deux trous filetés perpendiculaires accueillent chacun une vis de pression.

3.5.4.3 Pignons

Les pignons (voir figure 3.16) sont fabriqués en acétal (Delrin) et sont montés sur un moyeu en aluminium. Ils comptent chacun 16 dents. Ce sont des pignons ANSI #25,

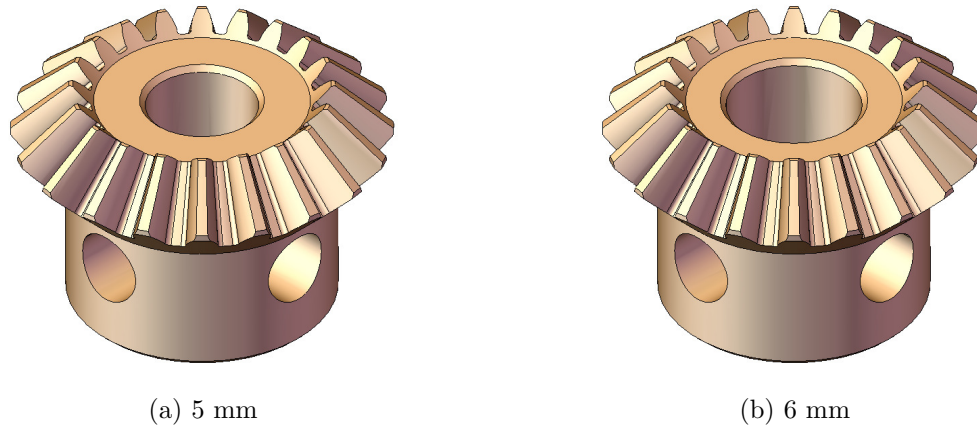


Figure 3.15 : Modèle des engrenages coniques droits.

donc ils possèdent un pas (*pitch*) d'un quart de pouce (1/4 in ou 6,35 mm). Deux trous filetés perpendiculaires accueillent chacun une vis de pression.

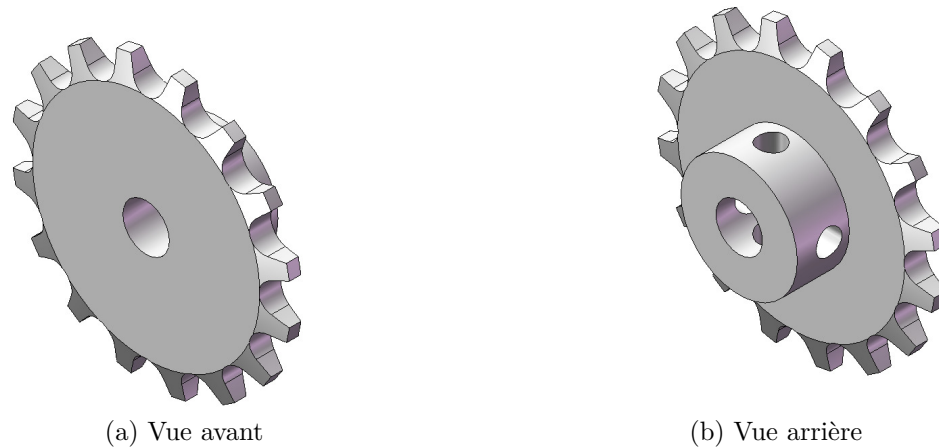


Figure 3.16 : Modèle des pignons.

3.5.4.4 Chaînes

Les chaînes (voir figure 3.17) sont elles aussi fabriquées en acétal (Delrin). Elles comptent chacune 64 maillons. Ce sont des chaînes ANSI #25, donc elles possèdent un pas (*pitch*) d'un quart de pouce (1/4 in ou 6,35 mm).

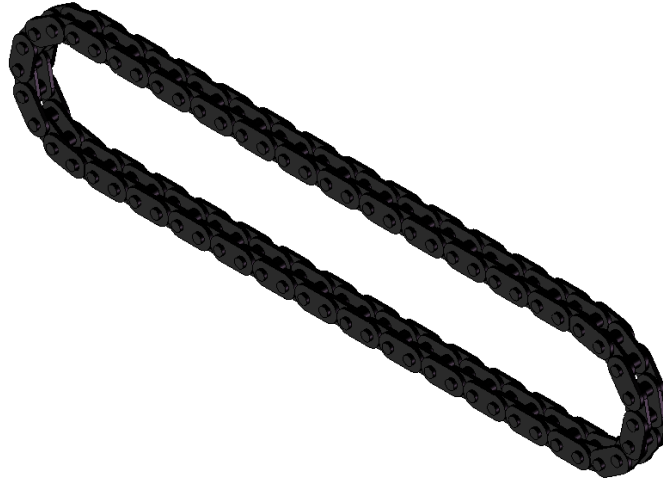


Figure 3.17 : Modèle de la chaîne.

3.5.5 Pattes

Les pattes (voir figure 3.18) sont fabriquées sur le même modèle que celles de PROMPT V1. Elles sont usinées en une seule pièce à partir d'une plaque d'aluminium 6061-T6. Deux trous filetés perpendiculaires accueillent chacun une vis de pression.

3.5.6 Batterie

L'assemblage de la batterie (voir figure 3.19) est formé de cinq supports qui contiennent chacun deux piles. Ces dernières sont des piles rechargeables NiMH 1,2 V et 2500 mAh branchées en série. L'ensemble fournit donc au système une tension de 12 V en courant continu.

3.5.7 Câbles et connexions de la plateforme

Enfin, l'assemblage de la plateforme comprend quelques câbles et connexions utilisés, entre autres, pour brancher les moteurs, les encodeurs et la batterie avec les composants électroniques du couvercle.

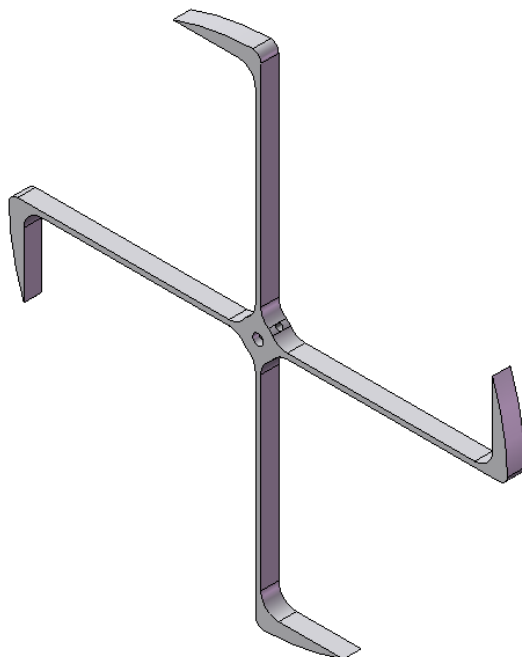


Figure 3.18 : Modèle de la patte.

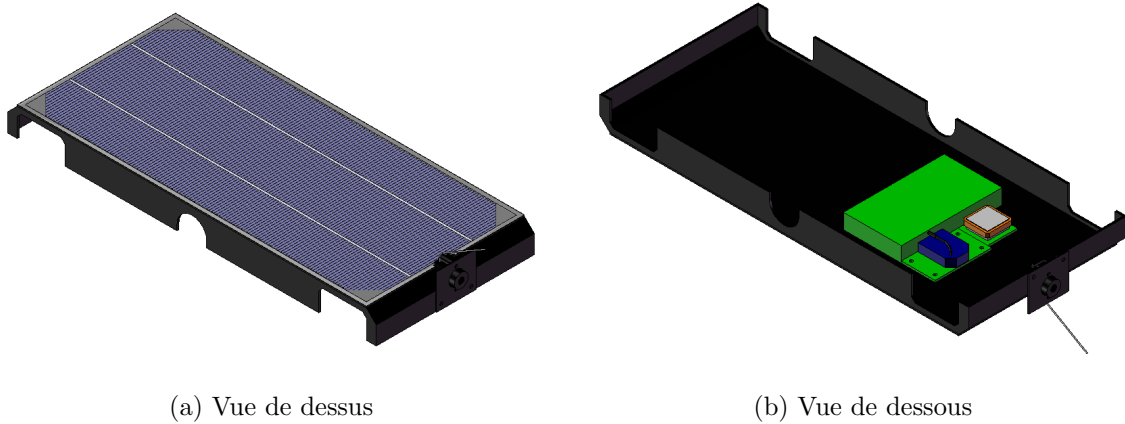


Figure 3.19 : Modèle de la batterie.

3.6 Couvercle (assemblage)

L'assemblage du couvercle (voir figure 3.20) contient presque toutes les composants électroniques. Il réunit la caméra, le panneau solaire, les circuits électroniques ainsi que

des câbles et des connexions. Pour pouvoir rester fiable, il doit être étanche afin de protéger le robot contre la contamination particulaire.



(a) Vue de dessus

(b) Vue de dessous

Figure 3.20 : Modèle du couvercle.

3.6.1 Couvercle (pièce)

Le couvercle en tant que tel est une pièce qui doit être robuste, légère, étanche, facile à assembler et ayant une apparence soignée.

3.6.2 Caméra (assemblage)

L'assemblage de la caméra (voir figure 3.21) contient un support et une mini caméra sans fil.

3.6.2.1 Support à caméra

Le support à caméra est fabriqué à partir d'une tôle d'aluminium 6061-T6. Il sert d'interface entre la caméra et le couvercle.

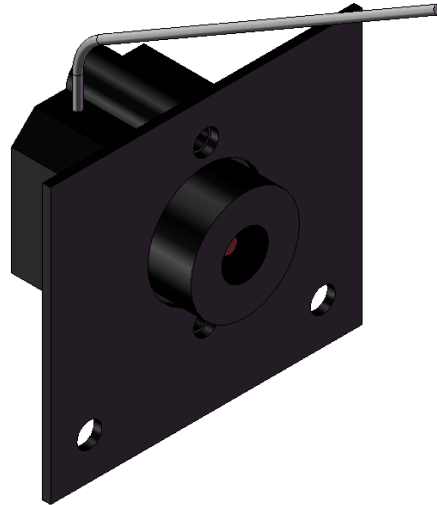


Figure 3.21 : Modèle de la caméra (assemblage).

3.6.2.2 Caméra (pièce)

La caméra est un modèle miniature et sans fil. Elle doit être légère, posséder une bonne portée et livrer une image de bonne qualité. Le choix du type d'appareil n'était pas encore arrêté au moment de tenir le CDR.

3.6.3 Panneau solaire (assemblage)

L'assemblage du panneau solaire (voir figure 3.22) contient deux cellules photovoltaïques de 150×340 mm, un joint d'étanchéité et un protecteur. Au moment du CDR, le choix de la technologie du panneau solaire n'était pas encore fixé entre des cellules photovoltaïques en silicium monocristallin ou un module photovoltaïque flexible.

3.6.4 Circuits électroniques

L'assemblage des circuits électroniques contient un ZigBee Interface RS-232, un ServoPod-USB, un GPS et un circuit d'interface.

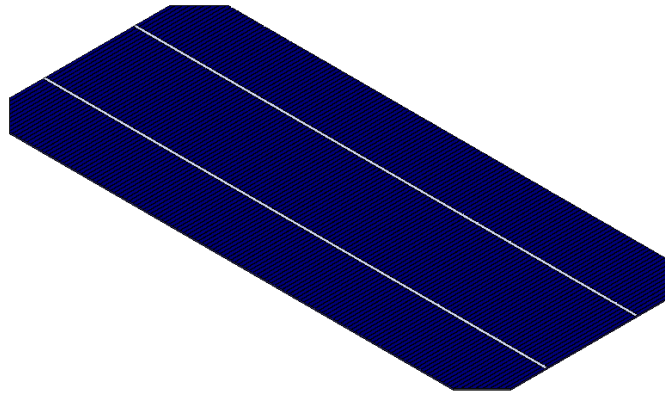


Figure 3.22 : Modèle du panneau solaire.

3.6.4.1 ZigBee Interface RS-232

Le ZigBee Interface RS-232 (voir figure 3.23) est un émetteur-récepteur alimenté avec une tension de 5 V en courant continu. Il communique sans fil avec la base en utilisant le protocole ZigBee. La transmission des commandes vers le microcontrôleur, elle, est faite en utilisant le protocole RS-232. Il possède, entre autres, des ports analogiques (ADC) et digitaux (GPIO).

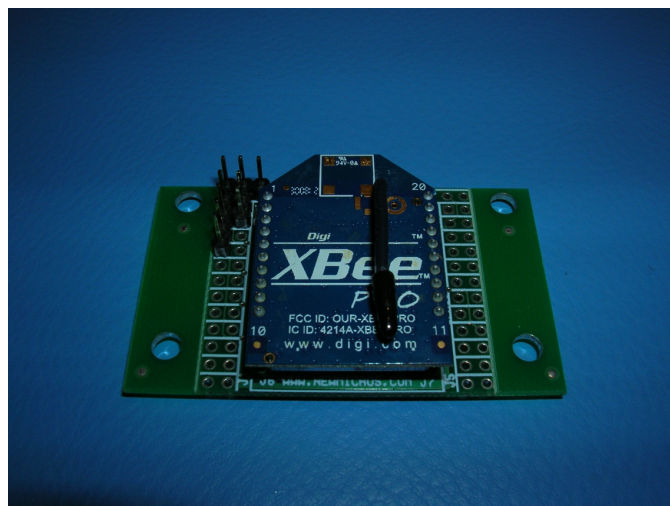


Figure 3.23 : Émetteur-Récepteur ZigBee Interface RS-232.

3.6.4.2 ServoPod-USB

Le ServoPod-USB (voir figure 3.24) est un circuit électronique qui intègre un microcontrôleur DSP56F807. Ce dernier possède notamment des ports analogiques (ADC), digitaux (GPIO), de communication série (SCI) et de modulation de largeur d’impulsions ou *Pulse Width Modulation* (PWM). Le processeur fonctionne avec des mots de seize bits et la programmation s’effectue en langage C.

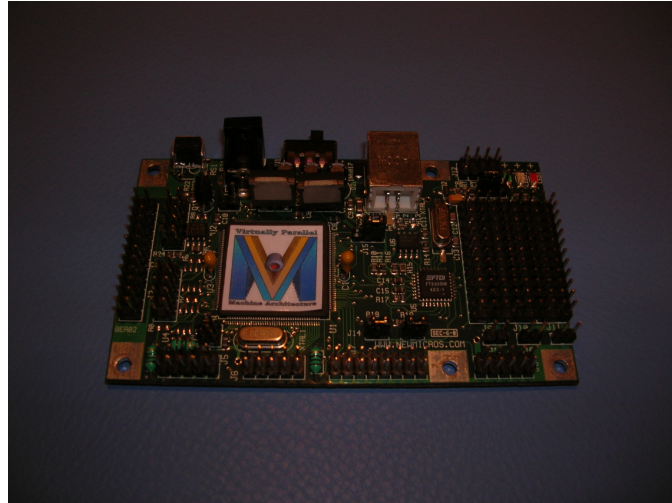


Figure 3.24 : ServoPod-USB.

3.6.4.3 GPS

Le GPS (voir figure 3.25) choisi est un modèle EM-406 SiRF Star III. Ce sera la première fois qu’un tel système sera utilisé pour guider PROMPT. Son fonctionnement est encore inconnu du concepteur à ce stade-ci du projet.

3.6.4.4 Circuit d’interface

Le circuit d’interface permet de connecter les différents composants électroniques entre eux. Il contient des régulateurs de tension, des condensateurs, des résistances, un interrupteur et un pont en H ou *H-bridge* (voir figure 3.26).

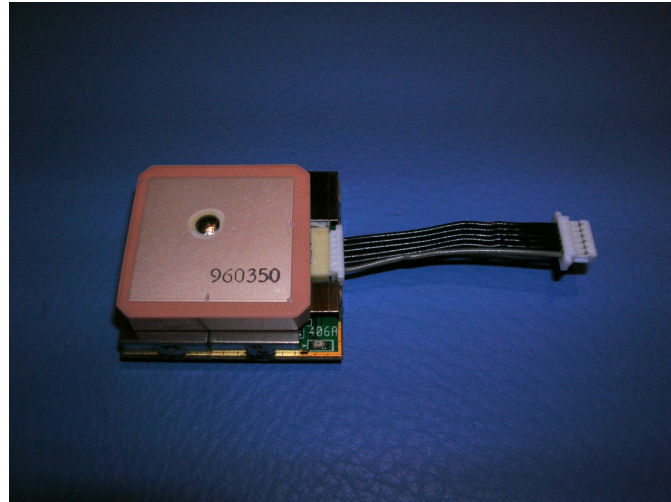


Figure 3.25 : GPS.

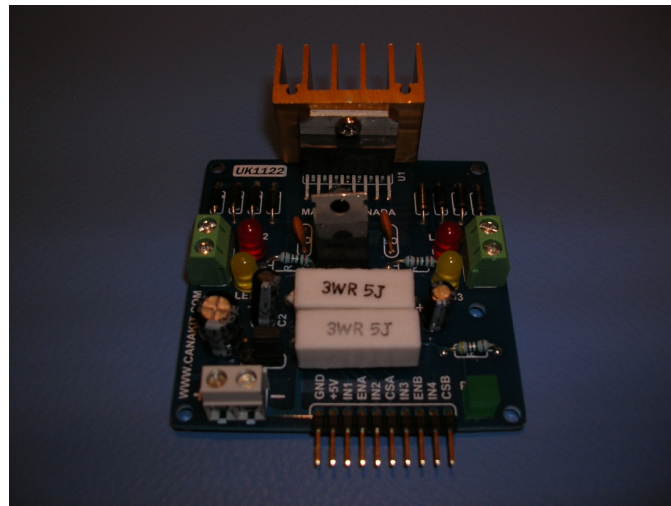


Figure 3.26 : H-Bridge.

3.6.5 Câbles et connexions du couvercle

Quelques câbles et connexions complètent l'assemblage du couvercle. Ils sont utilisés, entre autres, pour brancher la caméra et le panneau solaire.

3.7 Équipement

L'équipement de support au sol ou *Ground Support Equipment* (GSE) est constitué des instruments qui ne font pas partie intégrante du système comme tel, mais qui sont par contre nécessaires à son fonctionnement. Le GSE contient un ZigBee Interface USB, un récepteur caméra, un ordinateur, des câbles et des connexions.

3.7.1 ZigBee Interface USB

Le ZigBee Interface USB (voir figure 3.27) est un émetteur-récepteur semblable à celui placé à bord du robot. Il communique sans fil avec ce dernier en utilisant le protocole ZigBee. Il est branché à l'ordinateur via une interface USB. Sa portée est de 100 m à l'intérieur et de 1,5 km à l'extérieur. La fréquence utilisée est de 2,4 GHz et le baud, de 250 000 bps.



Figure 3.27 : Émetteur-Récepteur ZigBee Interface USB.

3.7.2 Récepteur caméra

Le récepteur caméra capte les images transmises par la caméra placée à bord du robot. Il requiert une alimentation secteur.

3.7.3 Ordinateur

Le choix d'un ordinateur dépend de plusieurs facteurs, mais l'utilisation d'un portable favorise le caractère tout-terrain de l'ensemble. Il doit être fiable et robuste. Même s'il est équipé d'une batterie, il requiert une alimentation secteur après un moment lorsqu'il devient nécessaire de le recharger.

3.7.4 Câbles et connexions du GSE

Enfin, divers câbles et connexions sont requis pour interfacier les différents composants entre eux. Cet assemblage virtuel contient notamment un câble JTAG utilisé pour envoyer le programme du robot de l'ordinateur vers le microcontrôleur. Le connecteur du câble JTAG possède 10 pins.

3.8 Résultats du CDR

Suite à la présentation du design de PROMPT V2, le comité a donné ses commentaires et ses suggestions au concepteur. Certaines demandes de corrections ont aussi été soumises. Voici, en bref, les conclusions de la réunion :

- Transformer la pièce de la plateforme en un assemblage de plusieurs pièces
- Transformer la pièce de la patte en un assemblage de plusieurs pièces

Il a été suggéré d'utiliser des engrenages coniques droits en acier plutôt qu'en laiton. De plus, fondés sur des expériences passées, des doutes ont été émis par rapport à la résistance des vis de pression utilisées pour maintenir en place les pignons et les engrenages. Le fait que la *Drill Rod* soit sensible à la corrosion a aussi été mentionné. Enfin, le verdict du comité a été que le processus de fabrication pouvait être désormais entrepris, à condition de revoir la conception de la plateforme et des pattes.

3.9 Conclusion

Les contraintes à respecter lors de la conception de PROMPT V2 ont été énumérées afin d'expliquer la philosophie et les buts du projet. Un modèle CAO détaillé a été créé pour visualiser le système et établir l'arborescence des composants. Une fois la première itération de conception terminée, le petit robot marcheur a été présenté devant un comité évaluateur lors d'une revue de design qui a permis de vérifier si le concept était assez mature pour entreprendre la fabrication.

Chapitre 4

Fabrication

Une fois la conception terminée et validée, la fabrication de PROMPT V2 a pu commencer. Les composants tels que les moteurs, les éléments de transmission et d'assemblage, les arbres, les roulements, le microcontrôleur, le panneau solaire, les composants électroniques, la caméra et les émetteurs-récepteurs ont alors été achetés.

Puisque les dimensions de ces composants sont imposées par le fabricant, les grandeurs des pièces fabriquées sur mesure ont été ajustées en conséquence. Les dessins de fabrication de ces dernières ont alors été réalisés pour ensuite être transmis à ceux qui les ont mis en forme grâce à différentes techniques telles que l'usinage, le formage de tôles, le moulage et le thermoformage. Lorsque les pièces ont été terminées, leur qualité a été contrôlée pour vérifier que les dimensions exigées ont bien été respectées. Enfin, les composants achetés et les pièces fabriquées ont été assemblés pour former le produit final.

4.1 Architecture du système

La nomenclature a continué d'évoluer au cours du processus de préparation des dessins de fabrication. Cette liste prend la forme d'une feuille Excel qui témoigne de la configuration du système. L'arborescence qui y est présentée est la même que celle qui existe dans le dessin d'assemblage créé avec le logiciel de modélisation SolidWorks. Elle est disponible à l'annexe E.3. Une attention particulière a été portée à l'élaboration de l'architecture du système pour qu'elle reflète, le plus fidèlement possible, les étapes de montage prévues. Les dessins d'assemblage et de fabrication sont présentés respectivement aux annexes B.1 et B.2.

4.2 Plateforme

Au départ, la plateforme a été conçue comme une pièce unique usinée à partir d'un seul bloc d'aluminium 6061-T6 comme pour celle de PROMPT V1. Cependant, suite au CDR et à quelques discussions, il a été décidé de la transformer en un assemblage de plusieurs pièces afin de diminuer la complexité d'usinage et de réduire le gaspillage de matériel. En effet, si la plateforme est usinée en une seule pièce à partir d'un bloc, plus de 90% de la matière doit être enlevée. Par contre, cela possède l'avantage de ne pas avoir recours à des éléments d'assemblage. De plus, la fabrication de chacune des pièces doit être très précise, car les tolérances d'alignement doivent être conservées à tout prix pour que la plateforme soit assemblée avec succès et qu'elle reste étanche à la contamination.

L'itération de conception a été effectuée selon les recommandations du CDR. Pour lever la confusion qui existait jusqu'ici entre l'assemblage de la plateforme et la pièce en tant que telle, le nouveau composant créé en divisant la pièce de la plateforme en plusieurs éléments se nomme dorénavant *base*. Cette dernière est maintenant formée d'une plaque de base, de deux plaques de côté, de deux plaques de bout, de quatre tiges de côté, de quatre tiges de bout et de soixante-quatre vis (voir figure 4.1).

Les pièces et les assemblages suivants ont tous été fabriqués et intégrés tel que prévu au moment de la conception : les supports latéraux, les actionneurs, les éléments de

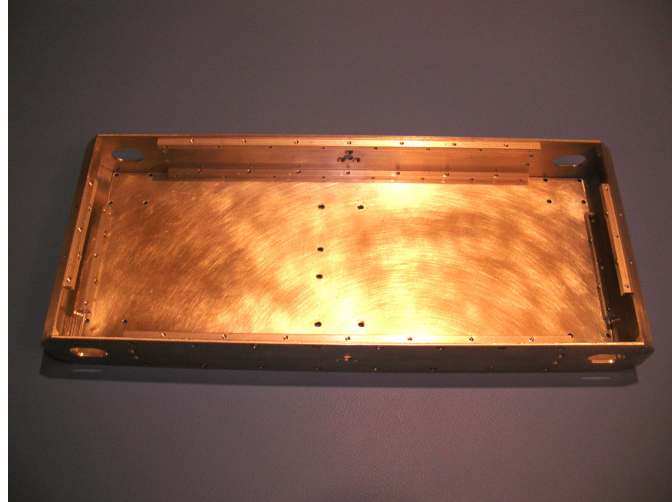


Figure 4.1 : Base.

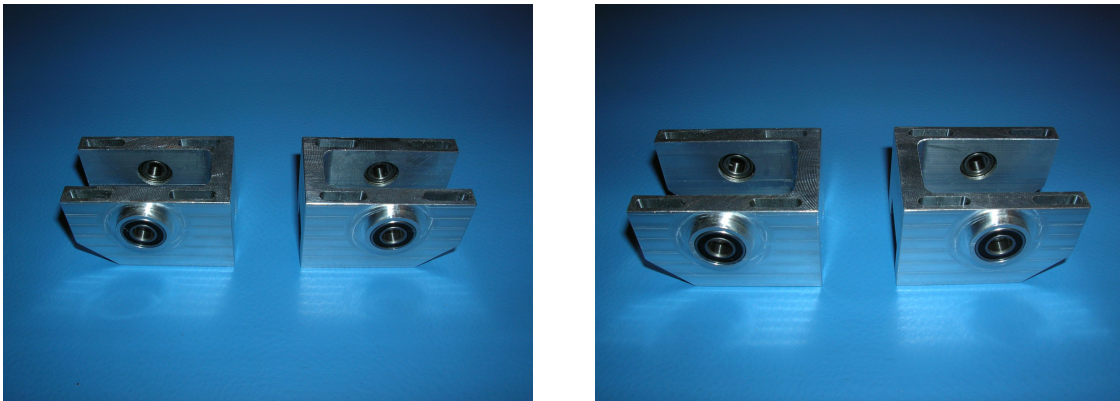
transmission et la batterie. Les prochaines sous-sections se concentrent donc sur les composants de la plateforme qui diffèrent du design présenté lors du CDR.

4.2.1 Supports

Les supports à arbre et à roulement conçus initialement étaient placés en tandem aux quatre coins de la plateforme. Il permettaient d'ajuster la position de l'arbre qu'ils supportent ainsi que la tension de la chaîne. Cette façon de faire est semblable à celle de PROMPT V1. Le désavantage de cette configuration et de cette méthode est qu'il est difficile d'aligner parfaitement l'axe des deux roulements. L'assemblage de la paire de supports sur la plateforme est fastidieux et donne des résultats mitigés. De plus, l'ajustement de la tension de la chaîne est un processus qui relève de l'acrobatie. Pour toutes ces raisons, il a été décidé de créer un nouvel assemblage qui réunit les deux supports en un seul composant.

En fait, ce dernier est constitué plus précisément de quatre nouveaux assemblages. Quoiqu'ils soient tous semblables, chacun des supports doit posséder des caractéristiques uniques selon le coin de la plateforme qu'il occupe. Leurs noms indiquent l'endroit où ils doivent être placés, soit le support avant gauche, le support avant droit, le support arrière gauche et le support arrière droit (voir figure 4.2). Ils portent chacun

un roulement 686-ZZ du côté intérieur et un roulement 686-2RS du côté extérieur de la plateforme.



(a) Avant gauche et avant droit

(b) Arrière droit et arrière gauche

Figure 4.2 : Supports avant et arrière, gauche et droit.

Le fait que chaque support soit unique rend évidemment l'usinage des pièces plus long et plus laborieux que s'ils étaient tous identiques. Ce choix de conception a été effectué avec l'idée de gagner de la fonctionnalité et de minimiser la perte d'espace. Une nouvelle itération de design pourrait cependant être réalisée ultérieurement.

4.2.2 Tensionneurs

Les tensionneurs avant et arrière (voir figure 4.3) sont aussi de nouvelles pièces issues de la combinaison des supports à arbre et à roulement. Ils servent à ajuster la tension de la chaîne grâce à une vis de pression sans tête à six pans creux. La distance entre l'axe du trou fileté et la base du tensionneur est équivalente à celle entre le milieu de la chaîne et la face intérieure de la plaque de côté. Cela explique la nécessité de créer deux types de tensionneur étant donné la configuration des éléments de transmission de puissance qui est propre au design des robots PROMPT.

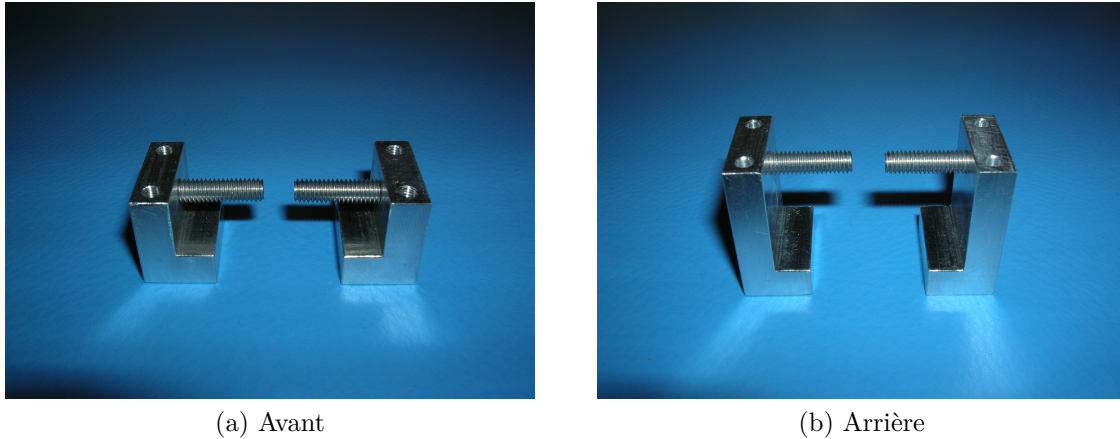


Figure 4.3 : Tensionneurs avant et arrière.

4.2.3 Espaceurs

Des espaceurs ont dû être ajoutés pour éviter de devoir réusinier de nouvelles pièces déjà complétées, car le design de la plateforme a été modifié au cours du processus de fabrication. L'espace choisi entre le diamètre extérieur des pignons et la base lors de la conception a été jugé insuffisant. Le risque que les pignons et les chaînes frottent sur la base était trop élevé. C'est ainsi que l'épaisseur de la plateforme a été augmentée de 5 mm répartis également de chaque côté du plan milieu horizontal. Les supports centraux, avant gauche et droit, et arrière gauche et droit étaient déjà fabriqués à ce moment. Deux types d'espaceurs ont donc été créés pour surélever les supports centraux et un troisième, pour les autres supports.

4.2.4 Roulements

Comme les tolérances sur les alésages pratiqués dans les supports et destinés à accueillir les roulements sont serrées, une méthode particulière a été empruntée lors de l'assemblage. Pendant quelques minutes, les supports ont été placés au four et les roulements, au congélateur. Cette différence de température entre les composants a facilité l'étape d'insertion et n'a pas impliqué de force importante. De plus, lorsque les deux éléments sont revenus à la température de la pièce, le serrage était assuré adéquatement.

4.2.5 Pattes

Tel que demandé au CDR, la pièce de la patte a été transformée en un assemblage de plusieurs pièces. Suivant la même philosophie que pour la plateforme, cette opération permet de diminuer la complexité d'usinage et de réduire le gaspillage de matériel. Cela a aussi été l'occasion d'améliorer la versatilité du concept. En effet, selon l'ancien design, pour tester différents types de pieds ou de semelles, les pattes doivent être réusinées à chaque fois. L'itération de conception donne la possibilité de corriger ce problème. C'est pourquoi, le nouvel assemblage de la patte est maintenant divisé en un moyeu, deux branches, quatre bottes et un chapeau (voir figure 4.4).

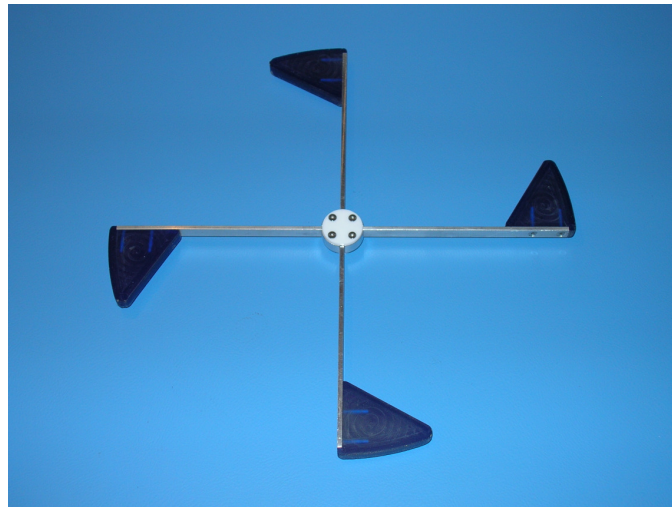


Figure 4.4 : Patte.

Le moyeu de la patte est fixé à l'arbre grâce à deux vis de pression et à une clavette. Les deux branches forment une croix qui est ensuite insérée dans le moyeu. Les bottes sont fixées au bout des branches à l'aide de deux vis. Un chapeau complète l'assemblage de la patte. Il maintient les branches appuyées contre le moyeu grâce à quatre vis. Le moyeu et les branches sont faits d'aluminium 6061-T6. Le chapeau, lui, est fabriqué à partir d'une tige cylindrique de Teflon® PTFE d'un diamètre d'un pouce et un huitième (1-1/8 in). Les spécifications du matériel se trouvent à l'annexe C.1.

4.2.6 Bottes

Le fait que PROMPT V2 possède un total de vingt-quatre bottes a motivé le choix de les fabriquer par moulage de plastique. La méthode de *Shape Deposition Manufacturing* (SDM) [18] a été privilégiée par rapport à d'autres moyens de fabrication afin d'expérimenter cette technique dans le cadre du projet. En effet, celle-ci possède plusieurs avantages très intéressants pour PROMPT. En plus de permettre de tester facilement différentes formes de bottes, le SDM donne au concepteur la chance d'intégrer au design de ses pièces des composants mécaniques, électroniques, optiques et autres. Les éléments d'assemblage ne sont plus requis puisque la fonctionnalité désirée est imbriquée dans la pièce.



Figure 4.5 : Bloc de cire à usiner.

Pour fabriquer les bottes du robot, la forme négative est d'abord creusée dans un bloc de cire à usiner. Les spécifications du matériel se trouvent à l'annexe C.1. Pour accélérer le processus, les dimensions du bloc de cire ont été choisies pour que douze cavités à la fois puissent y être aménagées (voir figure 4.5).

Le plastique, une résine uréthane haute performance de la série TASK® 9 fabriquée par la compagnie Smooth-On, est obtenu en mélangeant deux volumes égaux de produit A et de produit B. Les spécifications du matériel se trouvent à l'annexe C.1. Le liquide ainsi formé est ensuite versé dans chacune des cavités (voir figure 4.6). Après la période de séchage, le bloc de cire retourne à l'étape d'usinage afin d'en égaliser la face supérieure et d'enlever le ménisque de plastique formé sur la surface interne de la

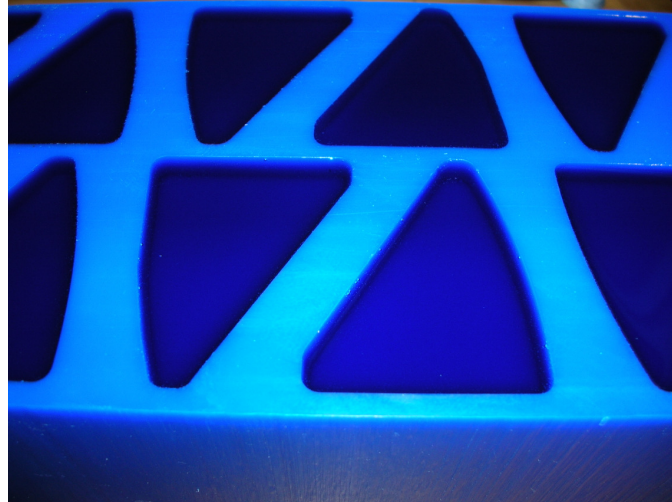


Figure 4.6 : Bottes au moment du moulage.

cavité. Une fois cette étape terminée, les parois de cire sont brisées pour permettre le démoulage des douze bottes. La cire ainsi perdue est récupérée dans le but de la faire fondre à la fin du processus pour créer un nouveau bloc de cire. La figure 4.7 montre l'apparence des bottes au terme de ces étapes.

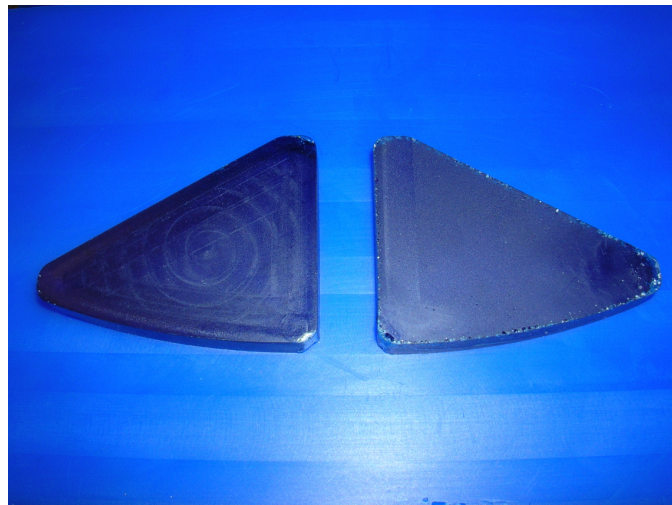


Figure 4.7 : Bottes après le démoulage.

Une pile de bottes est réunie et prise en serre pour être placée dans l'étau de la machine-outil (voir figure 4.8). Les pièces doivent être soigneusement alignées pour réussir à atteindre le niveau de qualité recherché. La face du côté du talon est usinée et les trous destinés à être filetés sont percés.



Figure 4.8 : Bottes lors de l'usinage.

La figure 4.9 montre les bottes une fois prêtes à être installées sur les branches. Pour PROMPT, le but ultime est de remplacer les étapes de perçage et de taraudage par l'intégration de deux inserts filetés lors du moulage. De plus, un petit aimant pourrait éventuellement être placé dans le talon des bottes. Avec l'ajout d'un capteur à effet Hall sur le côté de la plateforme, le passage de l'aimant pourrait être détecté et cette information pourrait servir à remettre les pattes du robot en position tripode dans l'éventualité où elles seraient déphasées pour une raison ou pour une autre.

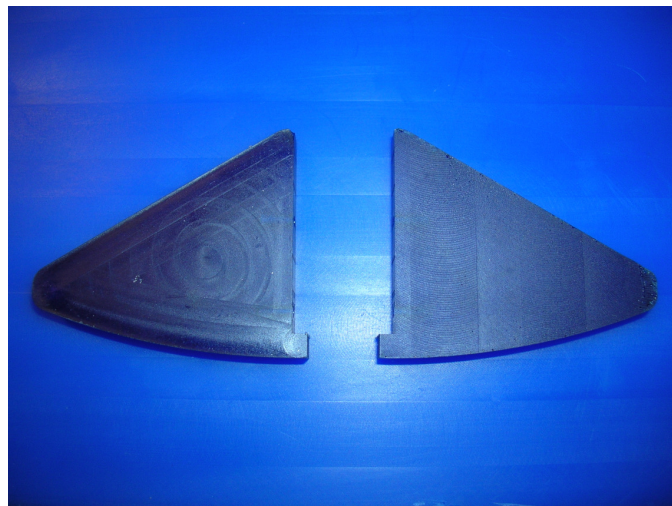


Figure 4.9 : Bottes prêtes à l'assemblage.

4.3 Couvercle (assemblage)

L'assemblage du couvercle (voir figure 4.10) a été réalisé une fois que la plateforme a été complétée. Pour les tests initiaux, il était nécessaire de protéger l'intérieur du robot, mais les composants électroniques destinés à être montés sous le couvercle n'étaient pas encore disponibles. Par conséquent, il a été décidé d'installer le module sans fil utilisé pour PROMPT V1.2 à bord du robot afin d'effectuer les premiers essais. Cet assemblage électronique contient un récepteur radio et deux contrôleurs de vitesse électroniques. Le robot est téléguidé par l'utilisateur à l'aide d'une radiocommande. Un panneau solaire temporaire a été installé sur le couvercle pour donner une allure réaliste au montage, mais il n'a pas été branché avec la batterie.

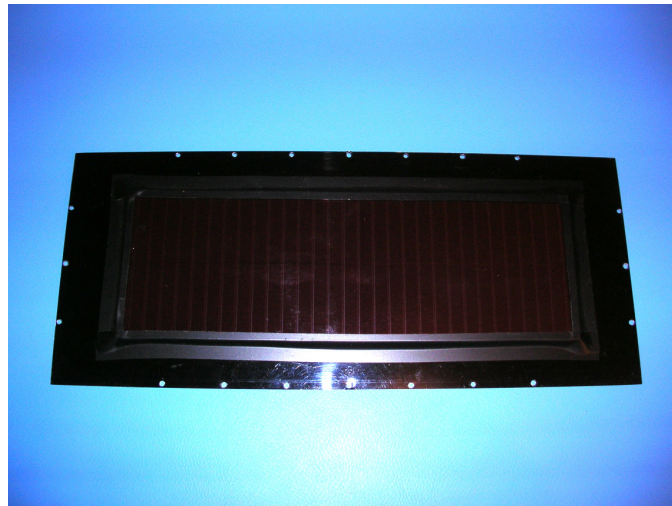


Figure 4.10 : Couvercle (assemblage).

4.3.1 Couvercle (pièce)

Un des requis énoncés dans la matrice de conformité consiste à utiliser des matériaux recyclables. Malheureusement, dû au fait que certains matériaux exotiques entrent dans la composition du système, comme ceux contenus dans les composants électroniques par exemple, ce requis n'a pas pu être respecté. Cependant, un effort a tout de même été fait pour poser quelques gestes écologiques au cours du projet. Notamment, la pièce du couvercle a été fabriquée à partir d'une tôle mince récupérée sur un lave-vaisselle destiné à être mis au rebut. La forme rectangulaire a été découpée avec un couteau à

lame rétractable et une équerre. Les trous de passage ont été faits à l'aide d'une perceuse à colonne. Quelques ajustements par sablage ont été nécessaires pour que le couvercle s'assemble parfaitement avec la plateforme, mais le résultat final est très fonctionnel et esthétique (voir figure 4.11).

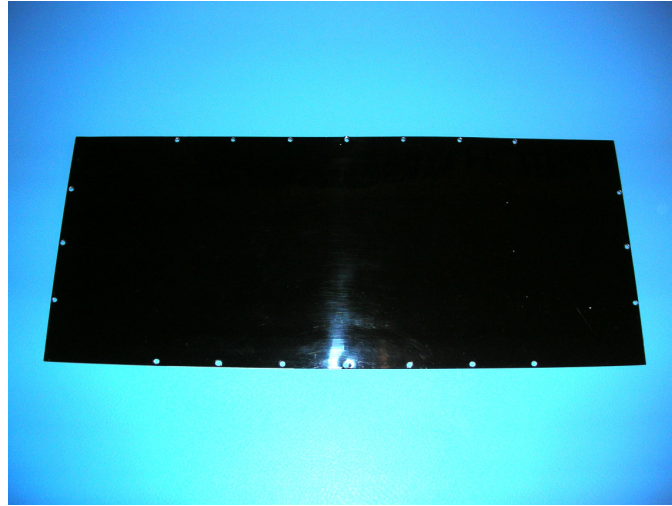


Figure 4.11 : Couvercle (pièce).

4.3.2 Panneau solaire

Le choix de la technologie du panneau solaire s'est finalement arrêté sur un module photovoltaïque flexible fabriqué par la compagnie PowerFilm® et appartenant à la série WeatherPro (voir figure 4.12). Son numéro de modèle est le P15-150. Il possède un voltage opérationnel de 15,4 V et un courant opérationnel de 100 mA. Les modules de la série WeatherPro sont légers, très minces et durables. De plus, ils possèdent une surface UV-stabilisée, un joint supplémentaire sur le bord pour survivre aux conditions climatiques et des connexions en cuivre enduites d'étain qui s'étendent du module. Les spécifications du matériel se trouvent à l'annexe C.2.

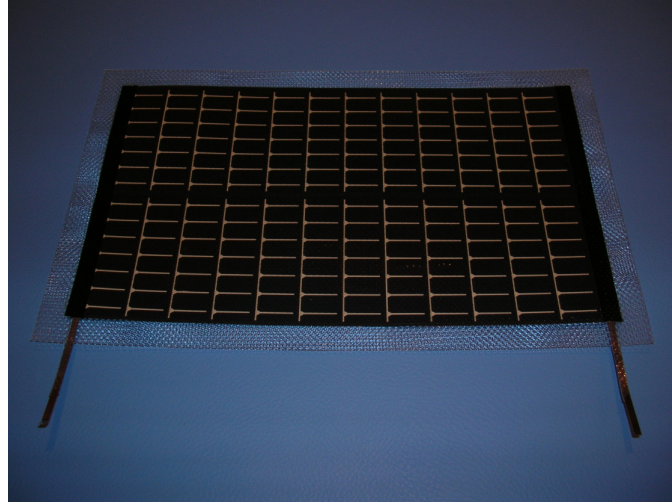


Figure 4.12 : Panneau solaire.

4.4 Caméras

Le choix des caméras est loin d'être trivial, car, comme cela arrive fréquemment lors du design d'un système, il existe de nombreuses solutions possibles. Lors des tests effectués avec PROMPT V1, la caméra a été mise hors d'usage suite à un choc important alors que la plateforme s'est retournée sur le dos et qu'elle est retombée sur une surface dure. En brisant, elle a créé un court-circuit qui a paralysé tout le système. Heureusement, aucun autre composant n'a été endommagé, mais cela a donné un sérieux avertissement quant à la sensibilité de certaines pièces électroniques aux vibrations et de l'impact de leur bris éventuel sur l'ensemble du robot. Ainsi, il a été décidé d'utiliser des caméras économiques et de les alimenter indépendamment du reste du système, du moins pour effectuer les premiers tests.

Une des options était de choisir entre des caméras couleur et des caméras pour la vision de nuit. Suite à une correspondance avec un expert travaillant comme professionnel de recherche pour le Laboratoire de vision et systèmes numériques (LVSN) de l'Université Laval [19], les caméras couleur ont été sélectionnées. En effet, celles-ci sont préférées dans un contexte d'exploration spatiale, car la couleur est une information précieuse pour les physiciens et les géologues. Un ensemble composé de quatre caméras et d'un récepteur (voir figure 4.13) a été sélectionné.



Figure 4.13 : Caméras et récepteur.

Une façon simple et efficace d'arriver à capter simultanément les images de plusieurs caméras et de les afficher sur un seul écran d'ordinateur est d'utiliser les ports USB de ce dernier. Pour ce faire, des adaptateurs de capture audio-vidéo USB (voir figure 4.14) convertissent les signaux provenant des caméras afin que l'ordinateur puisse les lire via ses ports USB.



Figure 4.14 : Adaptateur de capture audio-vidéo USB.

À ce stade-ci du projet, deux configurations existent pour l'installation des quatre caméras. La première consiste à installer une caméra à l'avant et à l'arrière de PROMPT V1 et de PROMPT V2. Ainsi, il devient possible de suivre l'évolution des deux robots en parallèle. La deuxième option est d'installer deux caméras à l'avant et à l'arrière du robot PROMPT V2. De cette façon, la plateforme est équipée d'une vision stéréo dans les deux directions. Pour l'instant, les avantages d'équiper les deux robots de caméra ont motivé le choix d'orienter les travaux vers la première configuration.

4.5 Environnement graphique

Un prototype d'environnement graphique ou *Graphical User Interface* (GUI) est en développement. Celui-ci est conçu grâce à l'outil *GUI Design Environment* (GUIDE) du logiciel MATLAB. La figure 4.15 présente l'apparence actuelle de l'environnement graphique de PROMPT V2. Les fonctions principales de ce dernier sont d'interchanger la priorité entre les deux images et de les renverser de 180 degrés. Ainsi, la caméra qui est pointée dans la direction où le robot se dirige occupe une plus grande place sur l'écran que celle qui regarde la scène s'éloigner. Lorsque le robot change de direction, les deux images sont interverties. Enfin, pour faciliter la tâche de l'utilisateur, les images peuvent être retournées lorsque le robot se retrouve la tête en bas.

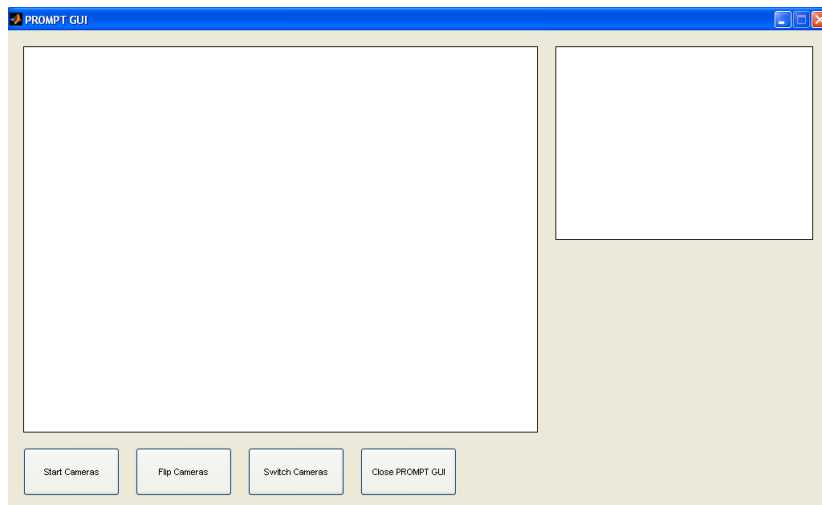


Figure 4.15 : Environnement graphique de PROMPT V2.

4.6 Conclusion

L'architecture du système s'est définie et s'est raffinée au cours de l'étape de fabrication. Les composants principaux de PROMPT V2 et les éléments qui ont subis des changements depuis la revue de design ont été présentés en détail afin d'expliquer comment s'est déroulé le passage du concept vers le prototype.

Chapitre 5

Expérimentation

À cette étape du projet, le système était maintenant prêt à subir les tests dans un contexte d'utilisation réelle. Il a alors fallu vérifier par des méthodes expérimentales que le robot était fonctionnel et qu'il respectait les exigences. PROMPT V2 a ainsi été mis à l'épreuve. Il a d'abord été testé au Laboratoire de robotique de l'Université Laval. Ensuite, le robot s'est exécuté sur le TEM de l'ASC. Il y a démontré son habileté à surmonter les obstacles et à se déplacer en terrain accidenté sans se retrouver dans une position le rendant inutilisable.

Depuis, une présentation publique a été réalisée et a permis de faire avancer le projet. PROMPT V2 a été présenté en action lors de la Foire Sciences & Technologies tenue au centre commercial Laurier Québec en novembre 2009. Sa robustesse et son endurance ont ainsi pu être éprouvés dans ce marathon de trois jours. Le petit robot marcheur a su impressionner le public par son originalité, sa maniabilité et sa simplicité.

5.1 Laboratoire de robotique

Les premiers essais avec PROMPT V2 ont été réalisés au Laboratoire de robotique. Après quelques validations techniques effectuées à l'intérieur, le robot s'est attaqué aux sentiers forestiers présents sur le campus de l'Université Laval (voir figure 5.1). Des obstacles comme des branches mortes, des plantes et des buttes ont été franchis sans encombre. Des constructions telles que des marches d'escalier ont aussi pu être montées et descendues aisément. Une séquence vidéo filmée lors de l'expérience est présentée à l'extension 6.



Figure 5.1 : Expérience au Laboratoire de robotique avec PROMPT V2.1.

5.2 Agence spatiale canadienne

PROMPT V2 a ensuite été testé au TEM de l'ASC (voir figure 5.2). Sa capacité à se déplacer en terrain accidenté a été démontrée de nouveau. Le prototype a relevé les défis que représentent le sable, les roches et les dénivellations qui composent le terrain martien. Cependant, la plus forte pente du TEM n'a pas pu être gravie complètement. Le robot manquait de puissance et une de ses chaînes s'est rompue. Une séquence vidéo filmée lors de l'expérience est présentée à l'extension 7.



Figure 5.2 : Expérience au TEM de l'ASC avec PROMPT V2.1.

5.3 Résultats initiaux

Suite à ces deux expériences, une première réflexion s'est imposée. Ainsi, quelques résultats initiaux ont pu être observés. Il a été constaté que les chapeaux, les vis de pression, les chaînes et les bottes constituaient des éléments faibles du design.

5.3.1 Chapeaux

En effet, au fil des tests, les chapeaux de Teflon® PTFE ont commencé à se déformer, tel qu'illustré à la figure 5.3. Comme les branches n'étaient plus appuyées fermement contre le moyeu des pattes, la démarche du robot était de moins en moins assurée. Initialement, le choix de fabriquer les chapeaux en plastique était motivé par le désir de réduire le poids des pattes.

Il est possible que des chapeaux fabriqués à partir de plastiques plus rigides, tels que le polycarbonate ou le PEEK par exemple, auraient résisté plus longtemps, mais pour être certain de corriger la situation de façon durable, le choix d'utiliser de l'aluminium 6061-T6 a été préconisé. Ce changement a entraîné une nouvelle révision du dessin de fabrication (voir annexe B.2) et six nouveaux chapeaux ont été usinés et intégrés.

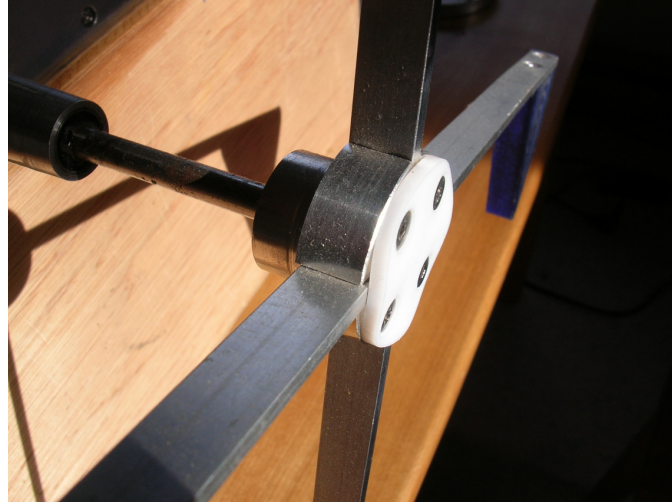


Figure 5.3 : Problème de déformation des chapeaux.

5.3.2 Vis de pression

Dès les premiers essais avec le robot, les vis de pression des pignons et des engrenages coniques droits ont commencé à se desserrer. Après un moment, les éléments de transmission se sont mis à glisser autour des arbres. La plateforme a alors été ouverte afin de resserrer les vis fautives. Comme ces dernières possèdent six pans creux et qu'elles sont de faibles dimensions, la forme hexagonale est fragile et un couple excessif appliqué avec le tournevis brise la prise de la vis, rendant de plus en plus difficile la réparation.

En outre, cette faiblesse crée des problèmes de façon exponentielle, car lorsque les composantes glissent autour de leur arbre, le déphasage entre les pattes, nécessaire à l'efficacité de la démarche tripode, n'est plus maintenu. Le pas du robot devient plus saccadé et chaotique, entraînant davantage de dommages. Ces tests initiaux ont révélé la fragilité du design. Afin de palier à ce problème, les arbres, les pignons et les engrenages coniques droits devront être réusinés pour pouvoir y ajouter des clavettes.

Cependant, l'arbre de sortie des moteurs ne possède qu'un seul plat et n'a pas de chemin de clé. Ce lien d'assemblage critique fait donc partie des éléments à prendre en compte pour améliorer la fiabilité de la plateforme. Pour éviter cette situation, il est possible, au moment de l'achat, de signifier ce besoin auprès du fournisseur qui, lui, est en mesure de demander au fabricant d'usiner ces spécifications en usine. Cette opération additionnelle entraîne évidemment des coûts supplémentaires. Pour l'instant,

en étant optimiste, cette faiblesse constitue une sorte de protection contre les demandes excessives de couple. Malgré tout, ce lien est tout de même plus solide que d'autres.

5.3.3 Chaînes

En effet, lors de l'expérience effectuée au TEM de l'ASC, une des chaînes s'est rompue alors que le robot tentait de gravir une forte pente. Cependant, le robot a pu continuer à avancer, mais avec plus de difficultés, car en plus de devoir entraîner une patte inerte, cette dernière a tendance à bloquer étant donné qu'elle est en position singulière. En ouvrant la plateforme, il a été constaté qu'un maillon plus faible s'était sectionné.

Bien qu'il n'est définitivement pas souhaitable qu'une chaîne se brise lors de l'utilisation du robot, cela présente tout de même un avantage : le couple maximal est ainsi limité par le maillon le plus faible de la chaîne. Les moteurs et les éléments de transmission sont ainsi protégés contre un couple excessif qui pourrait entraîner leur bris ou leur destruction.

C'est ainsi que l'idée de contrôler le couple grâce à la lecture en continu de la consommation de courant a germé. Aussi, un limiteur de couple pourrait être ajouté pour s'assurer que le couple maximal admissible n'est dépassé en aucun cas.

5.3.4 Bottes

Enfin, la traction du profil de départ n'est pas optimale. En effet, comme la semelle de la botte est lisse, la prise avec le sol n'est pas élevée. Différentes options sont possibles : rainures, formes en V ou inspirées par la nature (chameau, cheval, etc.). De plus, en augmentant la largeur de la botte, cette dernière aurait moins tendance à s'enfoncer dans le sable et donc, l'énergie requise pour déplacer le robot s'en trouverait diminuée.

5.4 Foire Sciences & Technologies

Les terrains les plus exigeants pour un véhicule ne sont pas toujours ceux qui viennent à l'esprit en premier. La dernière épreuve de PROMPT V2.1 fut de s'exécuter sur le parquet du mail de Laurier Québec lors de la Foire Sciences & Technologies tenue à Québec en novembre 2009 (voir figure 5.4). La tuile, dure et glissante, du plancher a eu raison du petit robot marcheur. Les vis de pression n'ont cessé de se desserrer tout au long des tests, obligeant ainsi l'opérateur à devoir effectuer une maintenance fastidieuse après seulement quelques minutes d'utilisation.

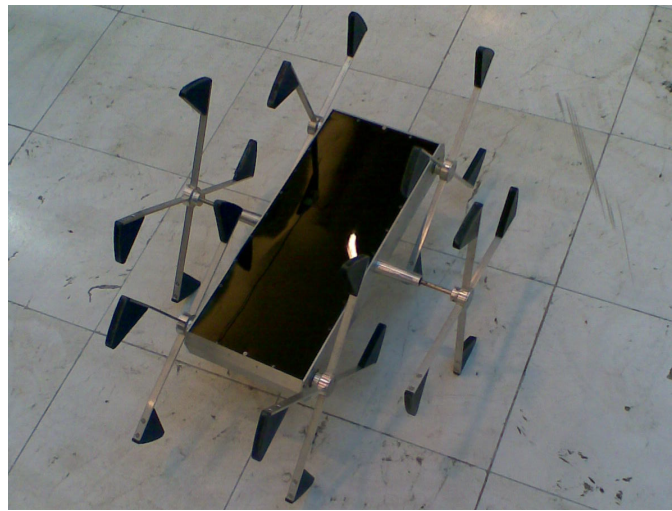


Figure 5.4 : Expérience à la Foire Sciences & Technologies avec PROMPT V2.1.

Éprouvé par ce traitement, le robot a perdu peu à peu de sa fiabilité et les problèmes, d'abord bénins et sporadiques, sont devenus récurrents. Un désassemblage fut alors nécessaire. La figure 5.5 montre PROMPT V2.1 avant qu'il ne soit démonté. La présente section décrit ce qui a été découvert.

5.4.1 Engrenages

Les engrenages coniques droits ne semblent pas s'user normalement. De la limaille métallique a été retrouvée près des deux supports centraux en dessous des engrenages, tel que montré à la figure 5.6. Ce problème est potentiellement dû à un mauvais alignement ou à un couple excessif. De plus, ils auraient dû être graissés pour prévenir l'usure

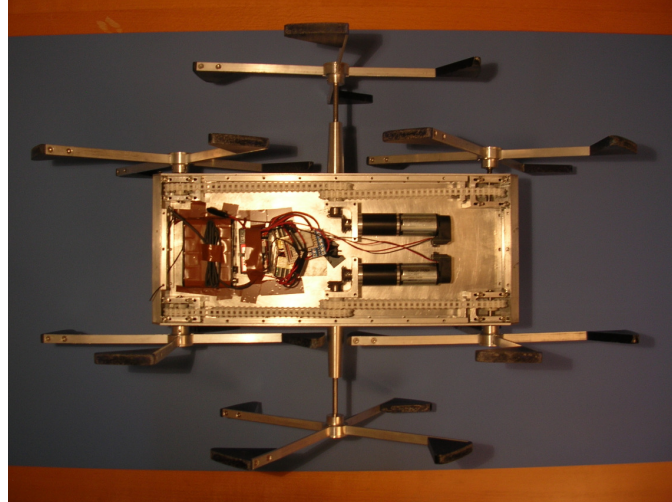


Figure 5.5 : Configuration intérieure de PROMPT V2.1.

prématurée. Sur la même figure, il est aussi possible d'observer que les engrenages commencent à rouiller. Cela est assurément dû au choix du matériau (acier).

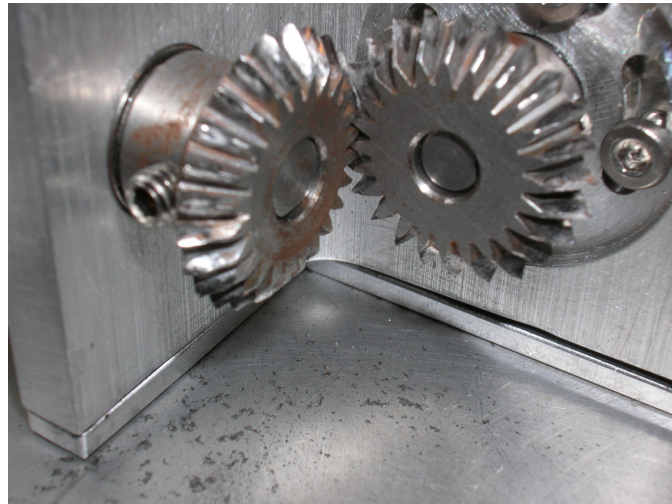


Figure 5.6 : Problème d'usure anormale des engrenages coniques droits.

5.4.2 Anneaux élastiques

Un des anneaux élastiques est sorti de sa rainure et s'est détaché de son arbre. Cela a eu pour effet que ce dernier s'est mis à bouger axialement, entraînant le désalignement

de la chaîne et de la patte. La figure 5.7 montre la position conforme et non conforme de l'arbre. L'anneau élastique manquant n'apparaît pas sur la figure.

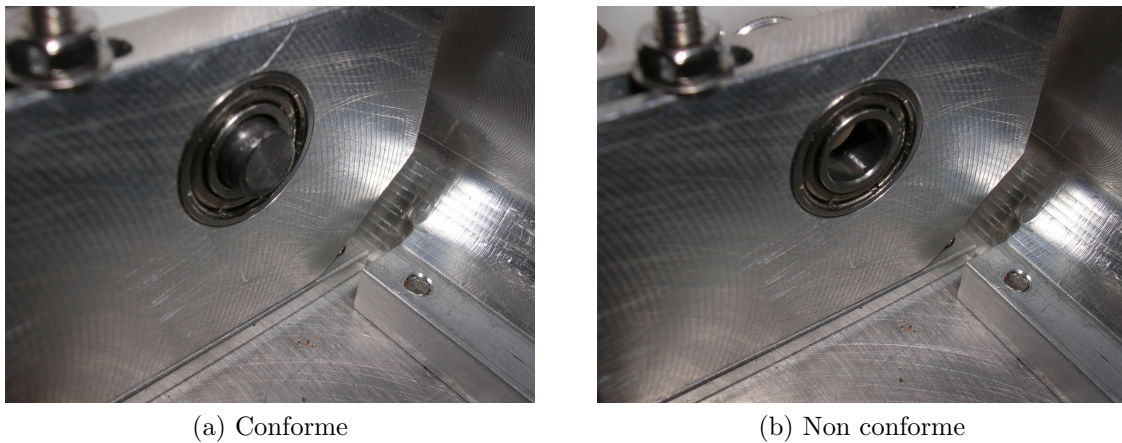


Figure 5.7 : Problème du désassemblage des anneaux élastiques.

5.4.3 Arbres

Les arbres ne résistent pas à la corrosion et la *Drill Rod* de 6 mm doit être sablée pour pouvoir être insérée dans les roulements à billes. Le problème de rouille peut être résolu en sélectionnant un matériau tel que l'acier inoxydable 304 ou 316. Celui de l'ajustement, lui, est solutionné en choisissant des tiges d'un diamètre légèrement inférieur à 6 mm, tel que 235 millièmes de pouce (15/64 in) par exemple.

5.4.4 Tensionneurs

Dû aux nombreuses vibrations subies par la plateforme, les vis qui servent à ajuster la tension dans les chaînes se desserrent après un moment et finissent par tomber (voir figure 5.9). Il est impossible de prévoir où elles iront se loger une fois libres, mais l'ordre des choses veut souvent que ce soit aux pires endroits existants. La figure 5.10 montre les marques laissées sur la plateforme lorsqu'une de ces vis s'est coincée entre la base et le pignon d'une des chaînes.



Figure 5.8 : Problème de corrosion des arbres.

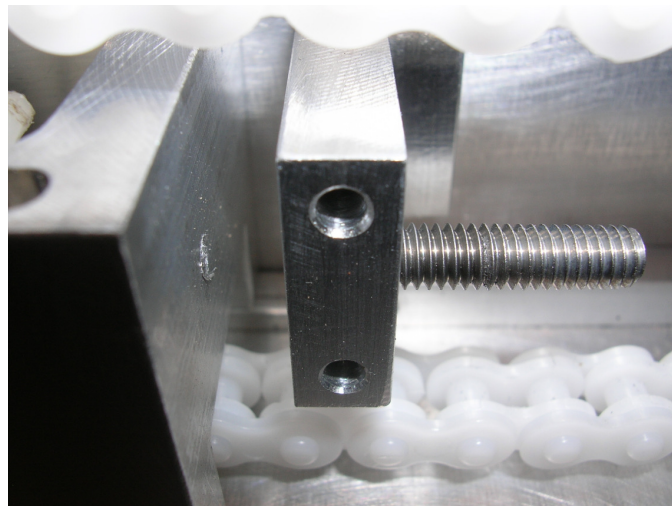


Figure 5.9 : Problème du désassemblage des vis de pression des tensionneurs.

5.5 Désassemblage

L'opération d'assemblage s'était effectuée avec une certaine facilité étant donné la méthode utilisée lors du design de la plateforme. Il en a été autrement du désassemblage, car il a été long et fastidieux. Des pièces ont été brisées au cours du processus et d'autres devront être remplacées ou redessinées avant de poursuivre le projet.



Figure 5.10 : Problème de coincement des vis de pression désassemblées.

5.5.1 Pignons

Un premier pignon de plastique a été éclaté en morceaux en tentant de libérer un des arbres centraux. Comme ce dernier restait coincé, un marteau a été utilisé pour tenter de le dégager. Un mauvais mouvement a porté le coup fatal. Un poinçon aurait dû être employé pour concentrer la force et éviter les dégâts potentiels. Un autre pignon a été endommagé en tentant de libérer un arbre central. En forçant, la partie en plastique s'est détachée du moyeu d'aluminium, tel qu'illustré à la figure 5.11.

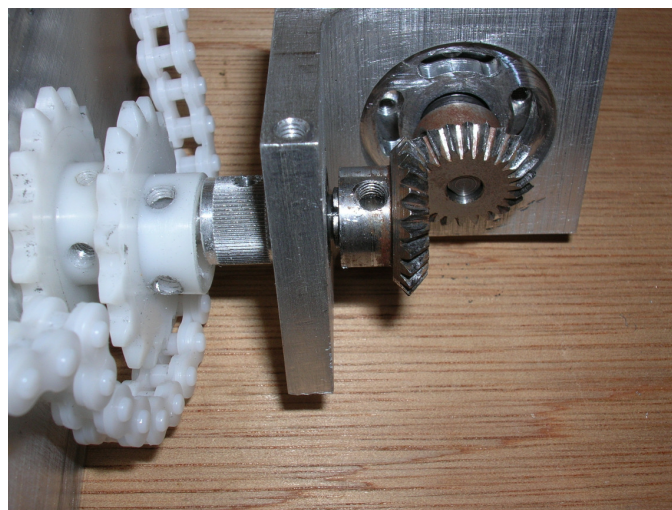


Figure 5.11 : Problème de désassemblage des pignons.

5.5.2 Arbres

Aussi, il a été constaté que l'anneau élastique intérieur des arbres centraux empêche le désassemblage efficace de ceux-ci. En dernier recours, un de ces arbres a dû être scié comme le montre la figure 5.12. En se servant plutôt de l'engrenage conique droit pour les bloquer axialement et de rondelles d'espacement pour les localiser précisément, les anneaux élastiques ne seraient plus nécessaires et le désassemblage s'exécute aisément.



Figure 5.12 : Problème de désassemblage des arbres centraux.

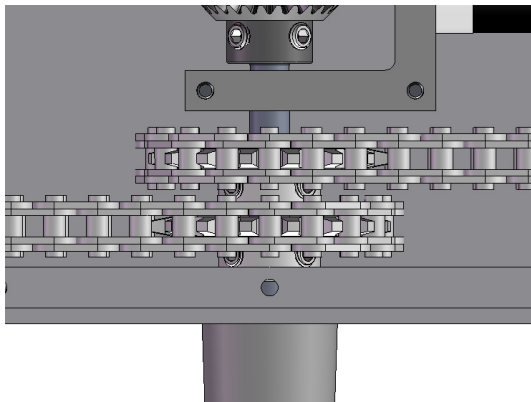
Lorsque les arbres centraux ont été complètement démontés, il a été constaté que les vis de pression étaient appuyées sur la partie cylindrique des arbres plutôt que sur les plats prévus à cet effet (voir figure 5.13). Cela a eu pour effet que les pignons n'étaient que très peu solidaires avec les arbres, qu'ils se sont mis à glisser de plus en plus souvent, tel que constaté lors des premiers essais, et que le bourrelet de métal formé avec le temps a causé les problèmes rencontrés lors du désassemblage.

La première hypothèse concernant la cause de ce problème était que les plats usinés sur les arbres centraux ne sont pas localisés au bon endroit et qu'une erreur s'est glissée au moment de concevoir ces derniers. Cependant, après investigation, il a été découvert qu'il y a bien une erreur, mais que celle-ci s'est produite lors de l'assemblage. En effet, les pignons montés sur les arbres centraux ont été placés à l'envers. Selon le dessin d'assemblage, les vis de pression sont supposées être vers l'extérieur de la plateforme, alors qu'elles se sont retrouvées vers l'intérieur. La figure 5.14 permet de comparer les

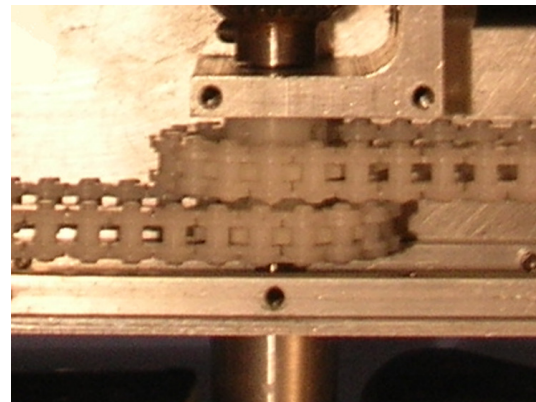


Figure 5.13 : Problème d'alignement des vis de pression des arbres centraux.

deux situations. Ce problème aurait pu être évité si une procédure d'assemblage avait été disponible ou si le monteur avait été plus vigilant.



(a) Conforme



(b) Non conforme

Figure 5.14 : Problème d'orientation des pignons centraux.

Dû au fait qu'un des deux arbres centraux a des dimensions marginales, des rondelles ont été ajoutées du côté extérieur de la plateforme lors du montage pour éviter que l'arbre ne puisse se déplacer axialement. Cette modification a eu pour effet de créer une ouverture. Des contaminants extérieurs peuvent désormais se glisser à l'intérieur de la plateforme. Une révision des dessins de fabrication des arbres est nécessaire avant de poursuivre.



Figure 5.15 : Problème de précision d'usinage des arbres centraux.

5.6 Résultats quantitatifs

Voici quelques résultats quantitatifs obtenus suite aux tests effectués lors de la Foire Sciences & Technologies.

5.6.1 Vitesse

Le robot se déplace à 0,381 m/s (1,37 km/h) avec des piles alcalines et à 0,457 m/s (1,65 km/h) avec des piles NiMH. Sous la forme normalisée, les résultats sont respectivement 0,556 et 0,667 longueur de corps par seconde. Les vitesses ont été mesurées sur un sol dur et glissant. Le robot était immobile au moment du départ. La longueur du corps est mesurée de l'extrémité d'une patte à l'autre et correspond à la longueur hors tout. Dans la littérature, certains préfèrent plutôt utiliser la longueur du châssis. Calculées ainsi, les vitesses de PROMPT V2 deviennent 0,918 et 1,10 longueur de corps par seconde.

5.6.2 Garde au sol

Le ratio normalisé de la garde au sol est défini comme la différence entre la longueur des branches et la distance entre le moyeu et le bas du corps divisé par la longueur de la branche. Ce critère de performance, noté η_3 , permet de mesurer la qualité de la plateforme face aux obstacles. Il s'exprime :

$$\eta_3 = [r - (h_{ch\grave{a}ssis}/2)]/r \quad (5.1)$$

où $h_{ch\grave{a}ssis}$ est la hauteur du châssis.

Voici la valeur de ce ratio pour différents robots marcheurs :

- RHex : $[17,5 - (15/2)] / 17,5 = 57\%$
- Whegs II : $[10 - (6/2)] / 10 = 70\%$
- Lunar Whegs : $[9,5 - (7/2)] / 9,5 = 63\%$
- Mini-Whegs IV : $[3,6 - (2/2)] / 3,6 = 72\%$
- PROMPT V1 : $[6,25 - (3/2)] / 6,25 = 76\%$
- PROMPT V2 : $[16,5 - (5/2)] / 16,5 = 85\%$

En comparant ces valeurs, il est possible de constater que les robots PROMPT V1 et PROMPT V2 surpassent leurs compétiteurs en ce qui a trait à la garde au sol. Cet avantage se traduit en une mobilité accrue et une habileté naturelle à franchir les obstacles.

5.6.3 Autonomie

Dans les conditions d'utilisation de la Foire Sciences & Technologies, l'autonomie de PROMPT V2 a été évaluée à environ 3 heures. Ce résultat a été obtenu avec une batterie de piles NiMH. Il devra être recalculé avec plus de précision lors de prochains tests. La durée des piles devra aussi être connue pour différents types de terrains.

5.7 Conclusion

Les expériences au Laboratoire de robotique, au TEM de l'ASC et à la Foire Sciences & Technologies ont été décrites pour connaître les conditions dans lesquelles les tests ont été réalisés. Les problèmes rencontrés ont été analysés minutieusement afin que les solutions puissent être trouvées. Les résultats expérimentaux ont ensuite été présentés pour permettre de comparer PROMPT V2 avec les autres robots marcheurs.

Conclusion

5.8 Principales réalisations

Le projet PROMPT a comme objectif principal de développer un petit robot marcheur pour l'exploration spatiale. Le système doit être simple et fiable afin de réduire les coûts et les risques de défauts. L'emphase est mise sur la conception mécanique pour que la plateforme devienne efficace et robuste au fil des corrections et des améliorations. C'est ainsi qu'ont été décrits, dans ce mémoire, le contexte entourant le projet, les analyses qui en fondent les bases, la conception du robot, la fabrication du prototype et les expériences qui l'ont mis à l'épreuve.

Afin de devenir un candidat sérieux pour éventuellement être utilisé lors d'une mission spatiale, il doit constituer une solution compétitive vis à vis les autres robots existants. Dans cette optique, les performances de PROMPT V2 ont été comparées avec celles de RHex et de Whegs. Ces derniers possèdent des qualités indéniables, mais le robot développé au Laboratoire de robotique se distingue par son efficacité énergétique, sa résistance à la perte d'équilibre, sa maniabilité en terrain accidenté et son habileté à franchir des obstacles variés. La plupart des requis énoncés dans la matrice de conformité sont maintenant vérifiés ou sur le point de l'être. Malgré les quelques problèmes rencontrés lors de l'expérimentation, les solutions sont déjà connues et certaines ont même commencé à être implémentées.

5.9 Travaux futurs

Les travaux de recherche et de développement devront donc se poursuivre, car l'objectif n'est pas encore atteint. La rédaction de ce mémoire se termine alors que des pièces sont en fabrication et que d'autres sont en commande. Ni l'électronique de contrôle, ni le système de vision ne sont intégrés. La plateforme pourra bientôt profiter de nouvelles possibilités : les piles seront rechargées grâce aux panneaux solaires, le robot se déplacera de façon autonome à l'aide d'un GPS et des senseurs seront ajoutés pour améliorer l'interaction entre le système et son environnement. L'ajout de ces nouveaux instruments permettra de perfectionner PROMPT V2 et d'en faire un outil de plus en plus complet.

Maintenant que l'aspect mécanique du robot est consolidé, la prochaine étape consiste à mettre sur pied une équipe pluridisciplinaire. En effet, en réunissant des spécialistes de différentes disciplines, il deviendra possible d'atteindre un niveau de qualité et d'intégration inégalé. La synergie ainsi créée permettra d'effectuer un nouveau pas dans le long chemin qui mènera peut-être PROMPT sur Mars... et plus loin encore!!

Bibliographie

- [1] Grayzeck, E., 2010 [online database]. “Luna 17/Lunokhod 1”. NSSDC Master Catalog Search, National Aeronautics and Space Administration. URL : <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1970-095A>.
- [2] Grayzeck, E., 2010 [online database]. “Luna 21/Lunokhod 2”. NSSDC Master Catalog Search, National Aeronautics and Space Administration. URL : <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1973-001A>.
- [3] Weisbin, C., Montemerlo, M., and Whittaker, W., 1992. “Evolving Directions in NASA’s Planetary Rover Requirements and Technology”.
- [4] Shirley, D., and Matijevic, J., 1997. “Mars rovers : past, present, and future”. In Proc. Princeton Space Studies Inst, Vol. 20.
- [5] Lindemann, R., Bickler, D., Harrington, B., Ortiz, G., and Voothees, C., 2006. “Mars exploration rover mobility development”. *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, **13**(2), pp. 19–26.
- [6] Angle, C., 1989. “Genghis, a six legged autonomous walking robot”.
- [7] Angle, C., and Brooks, R., 1990. “Small planetary rovers”. In Intelligent Robots and Systems’ 90.’Towards a New Frontier of Applications’, Proceedings. IROS’90. IEEE International Workshop on, pp. 383–388.

- [8] Brooks, R., and Flynn, A., 1989. “Fast, cheap, and out of control : a robot invasion of the solar system”. *Journal of the British Interplanetary Society*, **42**(10), pp. 478–485.
- [9] Bares, J., Hebert, M., Kanade, T., Krotkov, E., Mitchell, T., Simmons, R., and Whittaker, W., 1989. “Ambler : an autonomous rover for planetary exploration”. *Computer*, **22**(6), pp. 18–26.
- [10] Martin-Alvarez, A., de Peuter, W., Hillebrand, J., Putz, P., Matthyssen, A., and de Weerd, J., 1996. “Walking robots for planetary exploration missions”. In *Proceeding Second World Automation Congress (WAC’96)*, Montpellier, France, pp. 7–14.
- [11] Saranli, U., Buehler, M., and Koditschek, D., 2000. “Design, modeling and preliminary control of a compliant hexapod robot”. In *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA’00. IEEE International Conference on*, Vol. 3.
- [12] Quinn, R., Nelson, G., Bachmann, R., Kingsley, D., Offi, J., and Ritzmann, R., 2001. “Insect Designs for Improved Robot Mobility”. In *Proceedings of 4th International Conference on Climbing and Walking Robots*, pp. 69–76.
- [13] Goulet, M., and Gosselin, C., 2005. “Hexapode : a walking robot”. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, **29**(4), pp. 553–568.
- [14] Goulet, M., 2006. “Hexapode : développement mécatronique d’un robot marcheur”. M.Sc., Université Laval, Québec.
- [15] Bochud, P., Duchaine, V., and Rocheleau, S.G., 2005. “Design de la plateforme d’un petit robot marcheur”. *Rapport de conception*, Université Laval, Québec.
- [16] Rocheleau, S.G., Duchaine, V., Bochud, P., and Gosselin, C., 2009. “PROMPT : a Small Walking Robot for Planetary Exploration”. In *Proceedings of the ASME/IEEE International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications*, San Diego, USA.
- [17] Department of Defense Single Stock Point for Military Specifications, Standards and Related Publications (DODSSP), 2008. “Design Review Information Package (DRIP) (DI-SESS-81757)”. ASSIST (Database for Military Specifications and Military Standards). URL : <http://assist.daps.dla.mil/quicksearch/>.
- [18] Merz, R., Prinz, F., Ramaswami, K., Terk, M., and Weiss, L., 1994. “Shape deposition manufacturing”. In *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, Vol. 5, Citeseer, pp. 1–8.

[19] Ouellet, D., 2009. Communication personnelle.

Annexe A

Index

Index : extensions multimédias.

A.1 Extensions multimédias

Les extensions multimédias se trouvent en ligne à l'adresse suivante :
<http://robot.gmc.ulaval.ca/fr/recherche/theme402.html>

Tableau A.1 : Extensions multimédias.

Extension	Type	Description
1	Vidéo	Solutions étudiées lors des investigations préliminaires.
2	Vidéo	Simulation du mécanisme de compliance avec Adams.
3	Vidéo	Animation de l'assemblage de PROMPT V1.
4	Vidéo	Tests effectués avec PROMPT V1 au TEM de l'ASC.
5	Vidéo	Extraits du court métrage réalisé pour l'Espace 400e.
6	Vidéo	Tests effectués sur le campus de l'Université Laval.
7	Vidéo	Tests effectués avec PROMPT V2 au TEM de l'ASC.

Annexe B

Dessins mécaniques

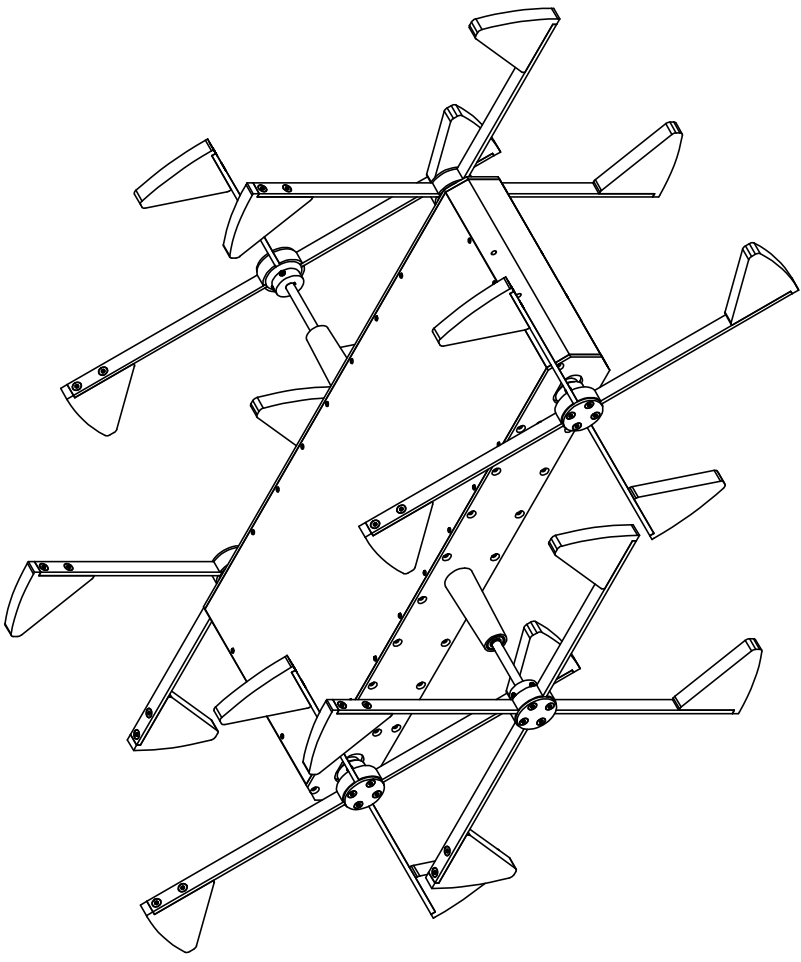
Dessins mécaniques : assemblage et fabrication.

B.1 Dessins d'assemblage

6 5 4 3 2 1

No. ARTICLE	NUMERO DE PIECE	DESCRIPTION	QTE
1	PLATEFORME_REV_A	Plateforme	1
2	COUVERCLE_REV_A	Couvercle	1

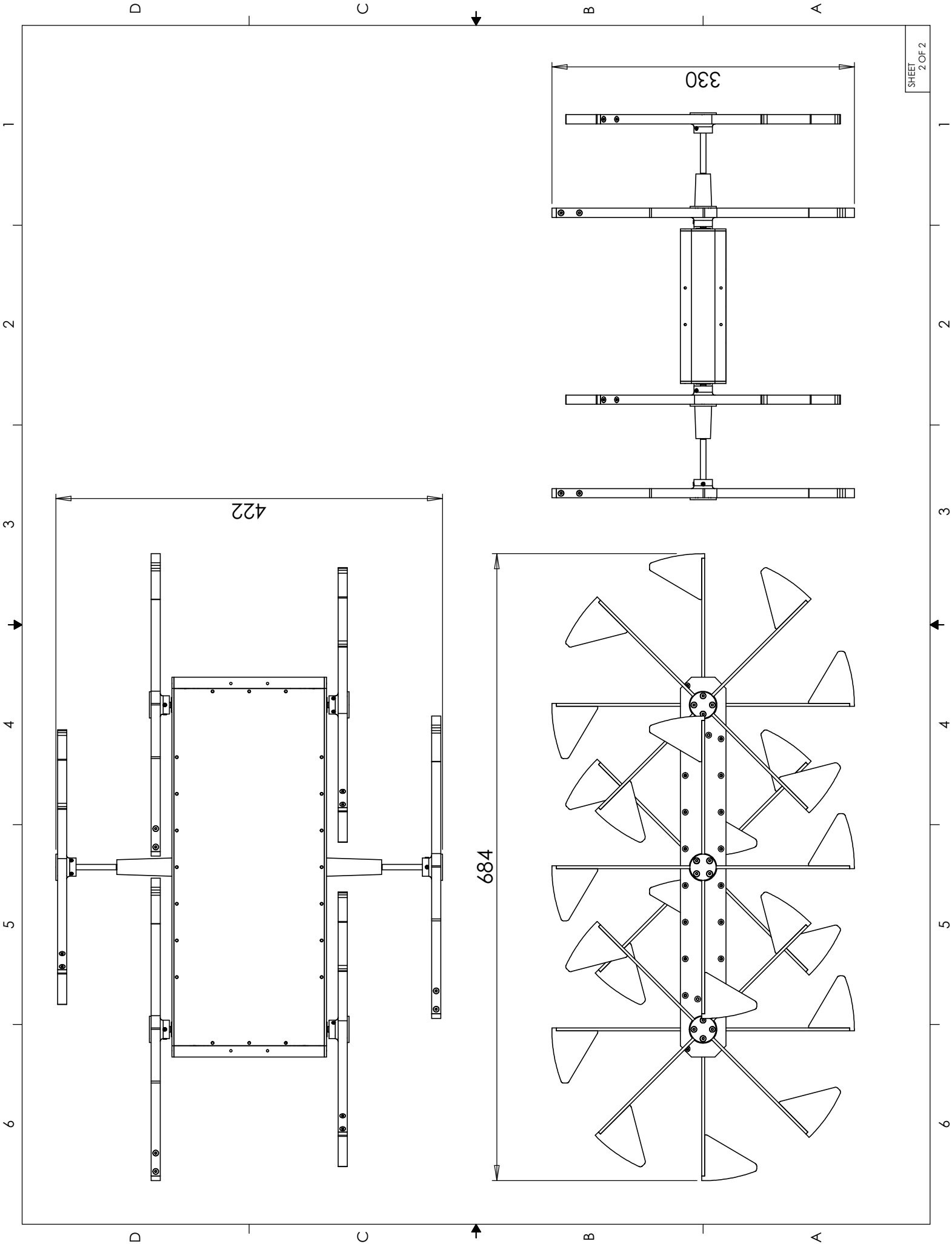
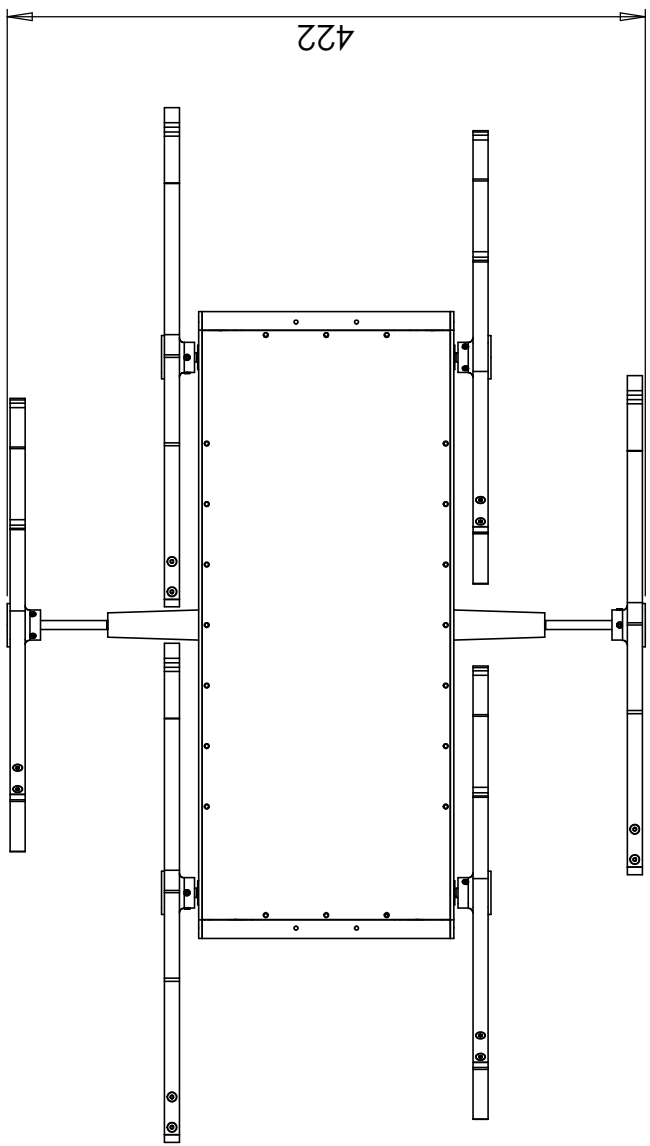
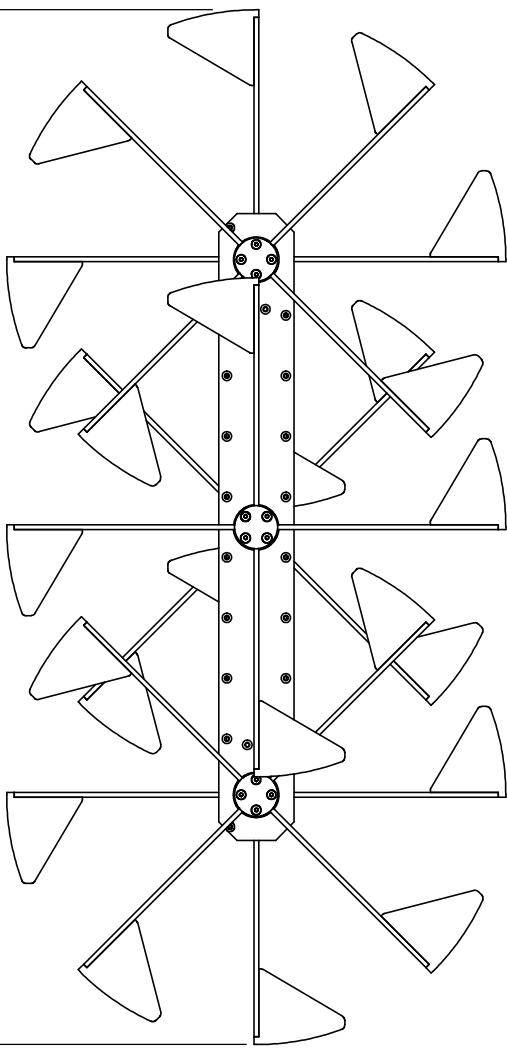
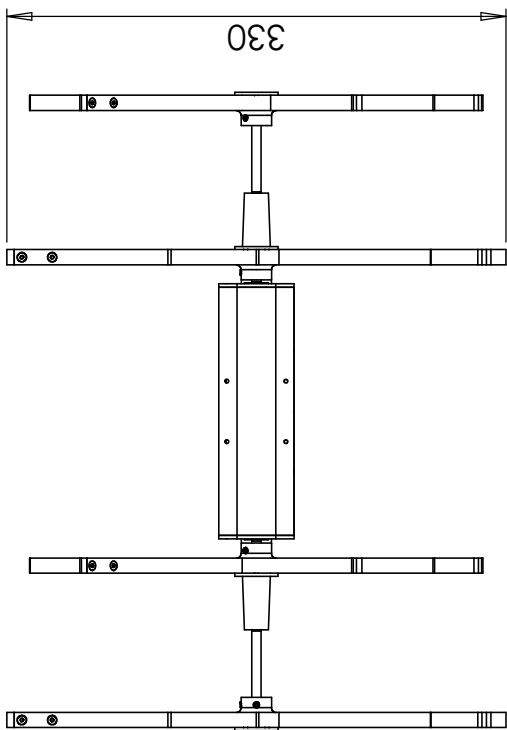
D C B A



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED		DRAWN	NAME	DATE	PROJECT
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		S. ROCHELEAU	2009/12/18	PROMPT V2 (LAB. ROBOTIQUE)	
TOLERANCES ARE		CHECKED		TITLE	
LENGTHS ARE		ENG APPR.		Petit Robot Marcheur :	
ANGLES		MFG APPR.		Plateforme Tout-terrain V2	
X ±0.5		Q.A.		SIZE	DWG. NO.
X.X ±0.25		COMMENTS		A	PROMPT V2
X.XX ±0.10				SCALE	1 : 5
X.XXX ±0.050				WEIGHT	
DIMENSIONING & TOLERANCING PER ANSI/ASME Y14.5				REV	A
MATERIAL					
FINISH					
DO NOT SCALE DRAWING					
NEXT ASSY					
APPLICATION					
PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF "OPTOMECAIRON". ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF "OPTOMECAIRON" IS PROHIBITED.					

6 5 4 3 2 1

D C B A



B.2 Dessins de fabrication

Les dessins de fabrication se trouvent sur le CD d'accompagnement.

Annexe C

Feuilles de spécifications

Feuilles de spécifications du matériel* : matériaux et pièces.

**Les feuilles de spécifications du matériel se trouvent sur le CD d'accompagnement.*

C.1 Matériaux

Feuilles de spécifications des matériaux.

C.2 Pièces

Feuilles de spécifications des pièces.

Annexe D

Programmes informatiques

Programmes informatiques* : microcontrôleur (DSP), MATLAB et XBee-PRO.

**Les programmes informatiques se trouvent sur le CD d'accompagnement.*

D.1 Microcontrôleur (DSP)

Codes compilés dans le microcontrôleur (DSP).

D.2 MATLAB

Scripts et fonctions MATLAB.

D.3 XBee-PRO

Paramètres des deux XBee-PRO : *Base* et *Remote*.

Annexe E

Autres documents

Autres documents* : matrice de conformité, arbre de produit, base de données, registre de risques, échancier, calcul des dimensions, choix des moteurs, choix des caméras, calcul de la résistance des branches.

**Les autres documents se trouvent sur le CD d'accompagnement.*

E.1 Matrice de conformité

La matrice de conformité contient le numéro du requis, la description, la méthode, la valeur et la conformité.

E.2 Arbre de produit

L'arbre de produit contient les liens et les relations hiérarchiques qui existent entre les différents composants.

E.3 Base de données

La base de données contient la définition des acronymes, la liste du matériel, les coordonnées des manufacturiers et des fournisseurs, ainsi que la nomenclature.

La nomenclature contient la quantité, le numéro du matériel, la révision, la description et la masse.

E.4 Registre de risques

Le registre de risques contient l'identification, l'analyse, la planification, le suivi et le contrôle.

E.5 Échéancier

L'échéancier contient l'action, le responsable, le début, la fin, la durée, le progrès et le statut.

E.6 Calcul des dimensions

Le calcul des dimensions donne les paramètres permettant de concevoir et de fabriquer les robots PROMPT.

E.7 Choix des moteurs

Le choix des moteurs donne les paramètres permettant de sélectionner les moteurs.

E.8 Choix des caméras

Le choix des caméras donne les paramètres permettant de sélectionner les caméras.

E.9 Calcul de la résistance des branches

Le calcul de la résistance des branches donne les paramètres permettant de concevoir et de fabriquer les branches.