

GAL RANC

Rapport de Conception d'un Robot Bipède
-Polytechnique Montréal-

Garagnon Bastian

18 août 2023



**POLYTECHNIQUE
MONTREAL**

**UNIVERSITÉ
D'INGÉNIERIE**

Résumé

Le rapport présente le projet Gal Ranc, axé sur la conception, la caractérisation, et les essais d'une jambe constituée d'un mécanisme à cinq barres, intégrée dans un robot bipède. Les objectifs du projet étaient d'étudier la stabilité, l'efficacité de cette conception mécanique, et d'évaluer sa viabilité pour des applications en robotique bipède. Le chapitre sur l'état de l'art explore les solutions techniques dans la robotique bipède, mettant en évidence l'importance de la conception mécanique, des matériaux composites, de la locomotion, de l'équilibre, de la perception de l'environnement et des capteurs. La simulation a été cruciale pour comprendre les principes de la locomotion bipède, tester les algorithmes de contrôle et caractériser un mécanisme à cinq barres. L'introduction d'un ressort d'assistance a également été étudiée pour réduire la charge sur les moteurs. Le chapitre sur l'électronique embarquée décrit l'architecture électronique et la création de cartes imprimées utilisées pour gérer les moteurs, les capteurs, et la communication entre les composants. La conception mécanique et la fabrication ont été abordées, en se concentrant sur la structure du corps, les membrures et les pieds du robot, tout en optimisant la masse et la flexibilité pour permettre des ajustements géométriques. Enfin, les expérimentations ont été menées pour valider les fonctions de base, la stabilité passive et active du robot. Les résultats ont montré que la stabilité passive était améliorée avec un soutien de ressort, tandis que la stabilisation active soutenue nécessitait des ajustements supplémentaires de l'algorithme de contrôle. Dans l'ensemble, le projet Gal Ranc a permis d'explorer la complexité de la locomotion bipède, mettant en lumière les défis mécaniques, électroniques et de contrôle à surmonter pour développer des robots bipèdes stables et efficaces.

The report presents the Gal Ranc project, focused on the design, characterization, and testing of a leg consisting of a five-bar mechanism integrated into a bipedal robot. The project's objectives were to study the stability, efficiency of this mechanical design, and evaluate its viability for bipedal robotics applications. The chapter on the state of the art explores technical solutions in bipedal robotics, highlighting the importance of mechanical design, composite materials, locomotion, balance, environmental perception, and sensors. Simulation was crucial for understanding the principles of bipedal locomotion, testing control algorithms, and characterizing a five-bar mechanism. The introduction of an assistance spring was also studied to reduce the load on the motors. The chapter on embedded electronics describes the electronic architecture and the creation of printed circuit boards used to manage motors, sensors, and communication between components. Mechanical design and fabrication were addressed, focusing on the body structure, limbs, and robot feet while optimizing mass and flexibility to allow for geometric adjustments. Finally, experiments were conducted to validate the basic functions, passive and active stability of the robot. The results showed that passive stability was improved with spring support, while sustained active stabilization required additional adjustments to the control algorithm. Overall, the Gal Ranc project has allowed for an exploration of the complexity of bipedal locomotion, highlighting the mechanical, electronic, and control challenges to be overcome in the development of stable and efficient bipedal robots.

Table des matières

1	Introduction	3
1.1	Contexte et Motivation	3
1.2	Objectifs de la Conception	3
2	État de l'Art	4
2.1	Conception Mécanique et Matériaux	4
2.2	Locomotion et Équilibre	5
2.3	Perception et Capteurs	5
3	Simulation	7
3.1	Caractérisation d'un mécanisme à cinq barres	7
3.2	Simulation de stabilisation	10
3.3	Caractérisation d'un jambe soutenue	12
4	Électronique Embarquée	14
4.1	Architecture Électronique	14
4.2	Création des Cartes Imprimées	16
5	Conception Mécanique et Fabrication	18
5.1	Conception du Corps	19
5.2	Conception des Membres	21
5.3	Fabrication	22
6	Expérimentation	24
6.1	Fonctions de base	24
6.2	Stabilité Passive	25
6.3	Stabilité Active	26
7	Conclusion et Perspectives	27
7.1	Bilan des Performances de Gal Ranc	27
7.2	Améliorations Potentielles de la Conception	27
8	Références	28
A	Origine	29

Table des figures

2.1	ATRIAS	5
2.2	Cassie lors de son record du 100m	6
3.1	Simulation des efforts pendant un pas	7
3.2	Couples moteurs (Nm) en fonction du temps	8
3.3	Zone des possibles	9
3.4	Validation de la zone d'utilisation	9
3.5	Pendule inversé stabilisé par volant d'inertie	10
3.6	Simulation de stabilisation - angle critique	10
3.7	Simulation du ressort	12
3.8	Couples moteurs sans le ressort	12
3.9	Couples induits par le ressort	13
3.10	Couples moteurs assisté par le ressort	13
4.1	Architecture d'une jambe	15
4.2	Montage de test de l'architecture	15
4.3	PCB - Jambe	16
4.4	Carte imprimée - Jambe	16
4.5	PCB - Chef	17
4.6	Carte imprimée - Chef	17
5.1	Hanche	19
5.2	Corps	20
5.3	Cheville	21
5.4	Genou	21
5.5	Angle maximal $L1 = 30mm$	21
5.6	Angle maximal $L1 = 40mm$	21
5.7	Cas critique - pied	22
5.8	Types de cuisse	22
5.9	Gal Ranc sans batterie	23
5.10	Gal Ranc avec batterie	23
6.1	Test de stabilité passive	24
6.2	Zone de stabilité	25

Chapitre 1

Introduction

1.1 Contexte et Motivation

Le sujet de ce projet était de concevoir, caractériser et tester une jambe équipée d'un mécanisme à cinq barres. Puis en l'intégrant dans un robot bipède, l'objectif était d'explorer cette conception mécanique particulière et de comprendre ses avantages potentiels pour la locomotion bipède robotique. La démarche repose sur une approche pratique visant à évaluer les performances, la stabilité et l'efficacité de ce type de mécanisme dans un contexte réel.

1.2 Objectifs de la Conception

Les objectifs de la conception étaient premièrement de développer une jambe à cinq barres en optimisant sa structure pour favoriser la stabilité et l'efficacité de la locomotion bipède, deuxièmement d'intégrer deux de ces jambes dans un robot bipède en assurant de la bonne coordination du tout, troisièmement de maintenir une position verticale stable, d'effectuer une marche cohérente et de s'équilibrer de manière autonome. L'objectif final était d'atteindre ces fonctionnalités afin d'évaluer la viabilité de cette conception mécanique pour des applications potentielles dans le domaine de la robotique bipède.

Chapitre 2

État de l'Art

Ce chapitre se penche sur les solutions techniques utilisées par des projets déjà existants, en examinant notamment la conception mécanique, les matériaux, les stratégies de locomotion, l'équilibre, la perception de l'environnement et les capteurs associés.

2.1 Conception Mécanique et Matériaux

La conception mécanique des robots bipèdes est au cœur de leur performance. Les ingénieurs recherchent constamment des moyens d'optimiser la stabilité, la mobilité et l'efficacité des mécanismes de marche. Le projet ATRIAS, développé à l'Université d'État de l'Oregon, a fait d'énormes progrès dans ce domaine. ATRIAS se distingue par sa conception mécanique innovante, notamment des jambes à ressorts inspirées du mécanisme à cinq barres. Cette conception permet à ATRIAS de marcher de manière robuste et d'avoir tous les actionneurs dans son corps [1]. Le projet Cassie également fait par l'Université d'État de l'Oregon, quant à lui, utilise une architecture de jambe proche de celle des jambes humaines offrant plus de degrés de liberté [2]. Le poids reposant directement sur les actionneurs est un facteur important de dimensionnement de ces derniers et de la consommation énergétique. La puissance doit être suffisamment élevée par rapport à la masse du robot pour que la locomotion bipède et l'équilibre soient possibles. Les robots bipèdes comme ATRIAS ou Cassie ont chacun leurs spécificités dans les solutions techniques utilisées. ATRIAS intègre un balancier actif dans son corps, Cassie dispose de plus d'actionneurs au niveau des chevilles et des hanches. Mais le point de convergence de tous ces projets est qu'une écrasante majorité des solutions techniques viennent du biomimétisme, notamment de l'étude de la locomotion humaine.

En ce qui concerne les matériaux, les composites à base de fibres de carbone sont largement utilisés pour leurs caractéristiques de légèreté et de résistance. Cassie et ATRIAS en sont deux exemples notables car ils utilisent une structure majoritairement faite en composite de carbone. Les matériaux composites ont également de bonnes propriétés de restitution d'énergie, ce qui est intéressant pour la locomotion bipède.

La multiplication des actionneurs et l'utilisation de matériaux avancés sont indispensables pour permettre aux robots bipèdes d'être mobiles tout en restant stables, fluides et économes en énergie.



FIGURE 2.1 – ATRIAS

2.2 Locomotion et Équilibre

La locomotion reste l'élément clé de la robotique bipède, concentrant une grande partie des difficultés. Les robots bipèdes doivent être capables de se mouvoir efficacement dans des environnements complexes en maintenant un équilibre instable. Un exemple concret de progrès dans ce domaine est le robot bipède humanoïde Atlas développé par Boston Dynamics. Atlas repose sur une combinaison de nombreux actionneurs, de capteurs de haute précision et d'algorithmes de contrôle qui lui permettent d'ajuster ses mouvements à la situation et d'anticiper un grand nombre de paramètres. Grâce à cela, il peut marcher, sauter, courir et effectuer des acrobaties, ce qui illustre les avancées dans les stratégies de locomotion [3]. Le contrôle du mouvement et une connaissance précise du comportement du robot et de son environnement sont essentiels pour maintenir l'équilibre pendant la locomotion bipède. Les actions du robot sont interdépendantes, ce qui rend la recherche de l'équilibre complexe et oblige à multiplier les actionneurs, comme chez Atlas.

Dans l'ensemble, ces éléments mettent en évidence la complexité de la locomotion bipède et l'importance d'un algorithme de contrôle robuste pour permettre aux robots bipèdes de maintenir leur stabilité et d'exécuter des mouvements de manière fiable.

2.3 Perception et Capteurs

Cassie, Atlas et ATRIAS ont été initialement développés pour évoluer sans capteurs d'environnement dans des environnements plats, dans le but de perfectionner la locomotion et l'équilibre dans ces conditions. Cassie détient même le record du 100 mètres, réalisé à l'aveugle, en s'appuyant uniquement sur une connaissance fine de l'état du robot. Tou-

tefois, il est essentiel que les robots puissent percevoir leur environnement pour s'adapter aux défis posés par des environnements complexes. Les capteurs jouent un rôle central dans cette capacité.

Atlas, par exemple, fait usage d'une variété de capteurs de différents types. Certains de ces capteurs fournissent des informations sur l'état du robot, tels que les centrales inertielles ou les capteurs d'effort. D'autres sont déployés pour percevoir l'environnement et anticiper les perturbations extérieures, parmi lesquels on trouve des caméras et des Lidars.



FIGURE 2.2 – Cassie lors de son record du 100m

Chapitre 3

Simulation

La simulation python fût un élément important pour comprendre les principes et appréhender en amont les difficultés de la locomotion bipède. Elle permet aussi de tester les algorithmes de contrôle et d'attester de l'utilité d'un ressort d'assistance pour la jambe.

3.1 Caractérisation d'un mécanisme à cinq barres

La première étape fût de simuler un mécanisme à cinq barres pour mieux comprendre son fonctionnement et son domaine d'utilisation. Son comportement est dépendant de la taille des membrures. Lors d'un pas l'entièreté du poids du robot reposera sur une seule jambe. Seulement lorsque la jambe est décalée de la position centrale, la majeure partie du poids repose sur une seule cuisse donc un seul moteur. On obtient donc un premier critère :

$$C_{mot} \gg L1 * P \quad (3.1)$$

Où $L1$ est la longueur de la cuisse, P le poids total du robot et C_{mot} le couple nominal d'un moteur.

Il faut trouver un compromis entre des dimensions pour les membrures donnant une zone des possibles suffisamment grande pour effectuer un pas mais qui minimisent aussi les couples moteurs.

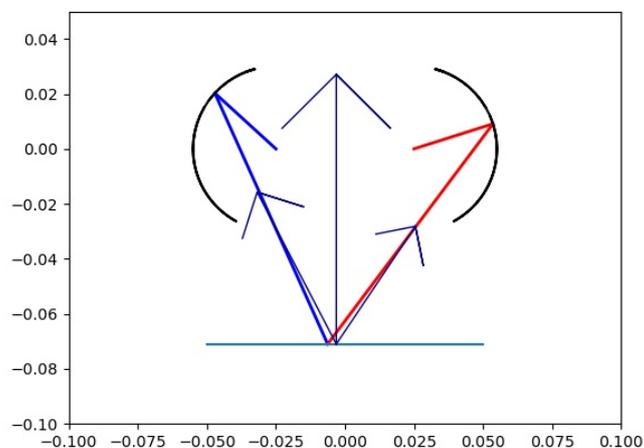


FIGURE 3.1 – Simulation des efforts pendant un pas

La figure 3.1 montre la simulations des efforts dans une hypothèse de mouvement quasi-statique donc en négligeant les inerties. Dans ce cas, le pied suit la trajectoires $T(t)$ pour connaître les couples moteurs de la figure 3.2 nécessaires pour supporter le poids du robot lors d'un pas.

$$\left\{ \begin{array}{l} m = 1kg \\ L1 = 0.03m \\ L2 = 0.1m \\ L3 = 0.05m \\ T(t) = \begin{cases} x = 0.05 * \sin(2\pi t/10) \\ y = -0.071 \end{cases} \end{array} \right. \quad (3.2)$$

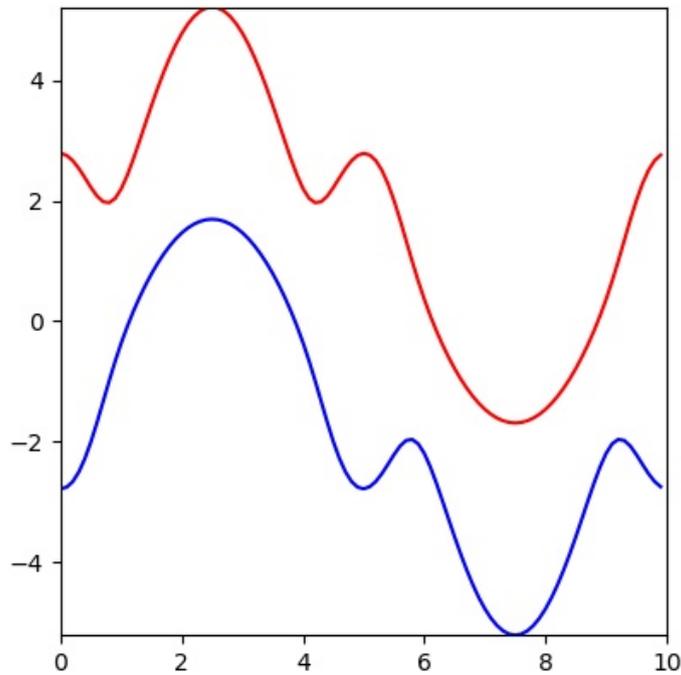


FIGURE 3.2 – Couples moteurs (Nm) en fonction du temps

Les figures 3.3 est le résultat de la simulation de la zone des possibles, qui est la surface faites par l'ensemble des position possible du pied. La zone des possibles (*en rouge*) varie en fonction des proportions des membrures, elle est l'intersection des anneaux autour des centres moteurs $C1$ et $C2$ de rayons $L2-L1$ et $L2+L1$:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_1 = \{(x, y) \mid L2 - L1 \leq \sqrt{(x - C1_x)^2 + (y - C1_y)^2} \leq L2 + L1\} \\ A_2 = \{(x, y) \mid L2 - L1 \leq \sqrt{(x - C2_x)^2 + (y - C2_y)^2} \leq L2 + L1\} \\ Z_p = A_1 \cap A_2 \end{array} \right. \quad (3.3)$$

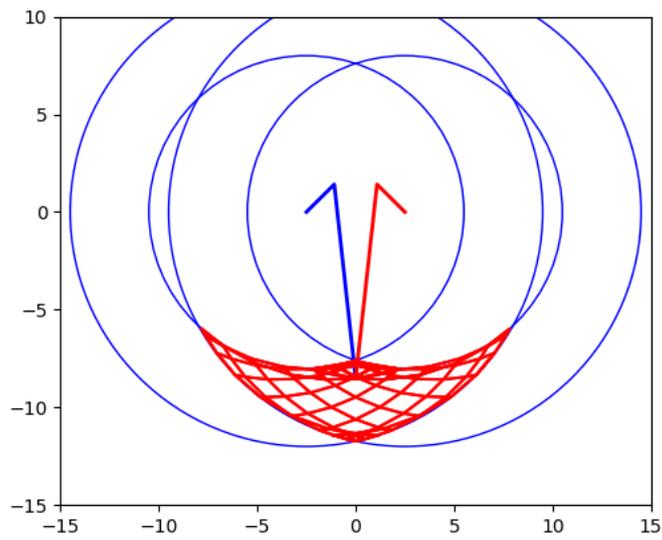


FIGURE 3.3 – Zone des possibles

La figure 3.4 montre une comparaison entre une zone des possibles (*en rouge*) et la zone d'utilisation arbitraire (*en bleu*).

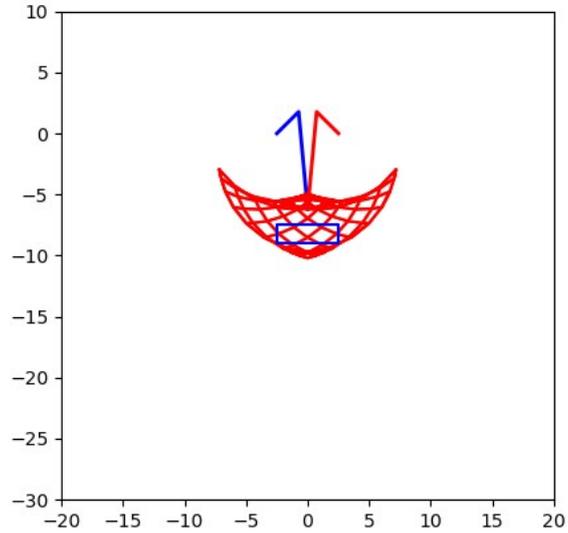


FIGURE 3.4 – Validation de la zone d'utilisation

3.2 Simulation de stabilisation

Le robot devant se stabiliser la simulation de l'équilibre fût primordiale pour dimensionner Gal Ranc. A l'instar d'un pendule inversé stabilisé par volant d'inertie (Figure 3.5), le robot utilisé son corps comme un volant pour se maintenir debout. Mais contrairement à un pivot tenant un volant d'inertie le mécanisme à cinq barres ne donne pas une liberté angulaire de α_2 complète au corps, voir sur la figure 3.6 où le robot atteint un angle critique. Ainsi pour α_2 entre -90° et $+90^\circ$ le robot doit avec son inertie angulaire pouvoir contrer son déséquilibre. Nous obtenons donc que le rapport γ entre moment d'inertie I et la masse m du robot doit être le plus grand possible. En outre si le déséquilibre sur \vec{x} dépassent quelques centimètres, 3cm dans le cas de la figure 3.6, le robot ne sera pas capable de se rééquilibrer car le corps s'orienterait alors de plus de 90° en réaction.

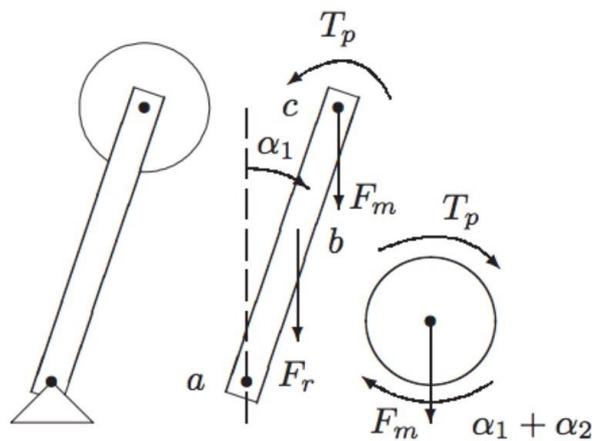


FIGURE 3.5 – Pendule inversé stabilisé par volant d'inertie

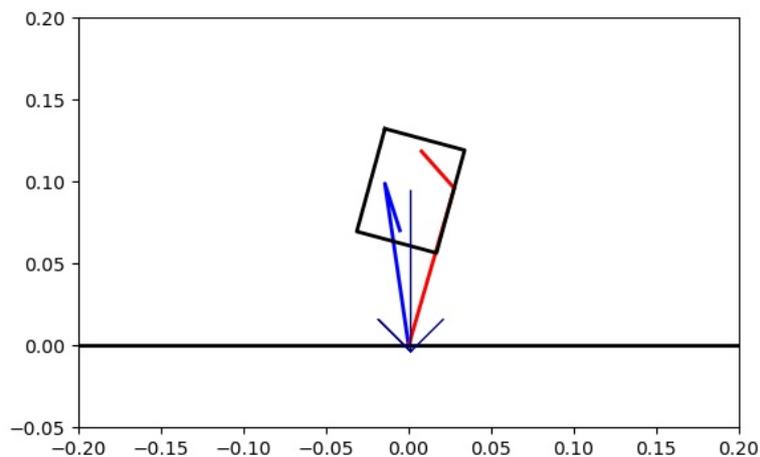


FIGURE 3.6 – Simulation de stabilisation - angle critique

L'algorithme de contrôle permet de faire tendre exponentiellement le centre de gravité G vers une trajectoire $w(t)$ au en calculant les consignes moteurs en couple $C = \begin{bmatrix} C1 \\ C2 \end{bmatrix}$

L'état :

$$\begin{cases} y(t) = \begin{bmatrix} Gx \\ Gy \end{bmatrix} \\ \dot{y}(t) = \begin{bmatrix} \dot{Gx} \\ \dot{Gy} \end{bmatrix} \end{cases}$$

La consigne :

$$\begin{cases} w(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.09 + 0.01 \sin(t) \end{bmatrix} \\ \dot{w}(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.01 \cos(t) \end{bmatrix} \\ \ddot{w}(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.01 \sin(t) \end{bmatrix} \end{cases}$$

Ecart à la consigne avec T le temps caractéristique de la réponse :

$$V = \frac{1}{T^2}(w - y) + \frac{1}{T}(\dot{w} - \dot{y}) + \ddot{w}$$

Comportement du système :

$$A = \frac{1}{m} \begin{bmatrix} \frac{\cos(\theta_3)}{\cos(\theta_1 + \theta + \frac{\pi}{2} - \theta_3)} & \frac{\cos(\theta_4)}{\cos(\theta_2 + \theta + \frac{\pi}{2} - \theta_4)} \\ \frac{\sin(\theta_3)}{\cos(\theta_1 + \theta + \frac{\pi}{2} - \theta_3)} & \frac{\sin(\theta_4)}{\cos(\theta_2 + \theta + \frac{\pi}{2} - \theta_4)} \end{bmatrix}$$

Consigne moteur en couple :

$$C = -A^{-1} \cdot (V + \begin{bmatrix} 0 \\ g \end{bmatrix})$$

Avec θ est l'angle du corps par rapport au sol, θ_1 est l'angle de la cuisse 1 par rapport au corps, θ_2 est l'angle de la cuisse 2 par rapport au corps, θ_3 est l'angle du tibia 1 par rapport au sol, θ_4 est l'angle du tibia 2 par rapport au sol, g est l'accélération due à la gravité et vaut 9.81m/s^2 .

3.3 Caractérisation d'un jambe soutenue

Les moteurs qui mettaient fournis ayant un rapport γ trop faible, il fût nécessaire de soulager les moteurs. Une fois l'idée d'ajouter un ressort (*en vert*) entre les cuisses de la jambe trouvée, la simulation (figure 3.7) a permit de la caractériser et de la valider.

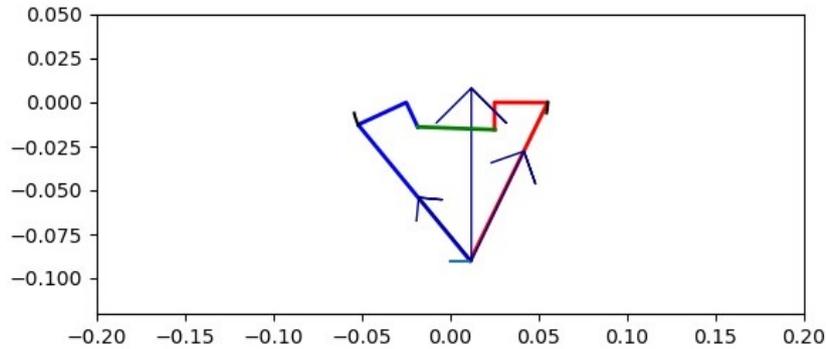


FIGURE 3.7 – Simulation du ressort

La figure 3.8 représente les couples moteurs (*en Nm*) sans l'action du ressort en réalisant la trajectoire $T(t)$. La figure 3.9 représente l'action du ressort sur chacun des moteurs. Enfin la figure 3.10 représente les couples moteurs en réalisant la même trajectoire mais en étant aidé par le ressort.

$$\left\{ \begin{array}{l} m = 1kg \\ K = 420N/m \\ l_0 = 0.01m \\ L1 = 0.03m \\ L2 = 0.1m \\ L3 = 0.05m \\ T(t) = \begin{cases} x = 0.05 * \sin(2\pi t/50) \\ y = -0.09 \end{cases} \end{array} \right. \quad (3.7)$$

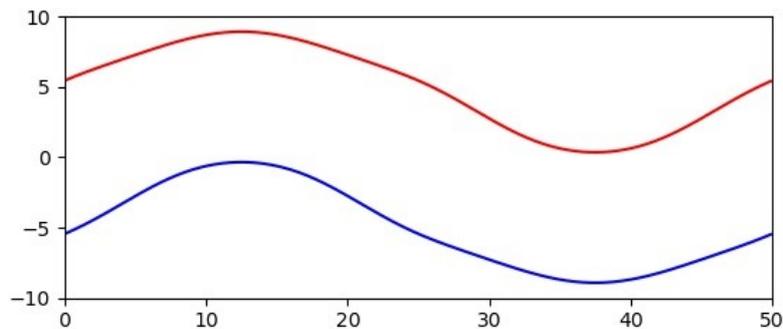


FIGURE 3.8 – Couples moteurs sans le ressort

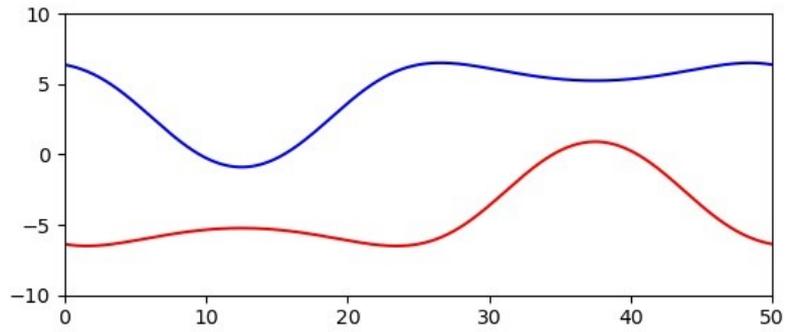


FIGURE 3.9 – Couples induits par le ressort

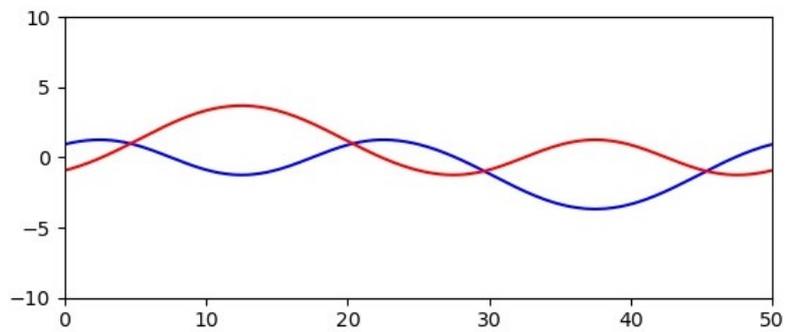


FIGURE 3.10 – Couples moteurs assisté par le ressort

L'action du ressort dépend des angles des deux cuisses. Ainsi pour optimiser les caractéristiques du ressort (l_0, K) , il faut les choisir en fonction de la zone d'utilisation que l'on souhaite. Dans le cas exposé l'action du ressort permet de réduire par un facteur 2 le couple maximum que les moteurs doivent fournir.

Chapitre 4

Électronique Embarquée

La première étape du prototypage fût de prendre en main le matériel électronique, notamment les moteurs et leurs *shields* SimpleFOC qui mettaient fournis. Ensuite il fallut choisir les cartes électroniques embarquées puis concevoir les cartes imprimées pour assembler le tout.

4.1 Architecture Électronique

Les cartes électroniques ont été choisies pour minimiser la masse et l'encombrement. Il fallait également avoir une centrale inertielle à disposition et pouvoir coordonner l'action des quatre moteurs.

L'asservissement en position ou en couple de chaque moteur est géré par une Xiao SAMD21 qui lui est propre. La Xiao SAMD21 communique avec l'encodeur magnétique du moteur via une liaison SPI et avec le shield SimpleFOC via des PWM. La Xiao SAMD21 reçoit ses consignes de la Xiao NRF52840 Sense via un réseau I2C, elle est ensuite autonome pour faire respecter la consigne à son moteur. Cela permet d'avoir une boucle d'asservissement moteur plus rapide pour garantir un suivi optimal sans être ralenti par la boucle de commande.

La boucle de commande est gérée par le "chef", la Xiao NRF52840 Sense, car il est doté d'une centrale inertielle. Cela lui permet de mesurer les orientations du corps. Le



chef envoie les consignes à chaque Xiao SAMD21 et récupère leur mesure d'angle respectif. En combinant les données des encodeurs aux données de la centrale il est capable de connaître l'état complet du robot. Il calcule notamment la position de son centre de gravité dans le repère du sol ce qui sera nécessaire pour s'équilibrer. La figure 4.1 schématise l'architecture d'une seule jambe de Gal Ranc. La figure 4.2 est la photographie d'un des premiers tests avec cette architecture.

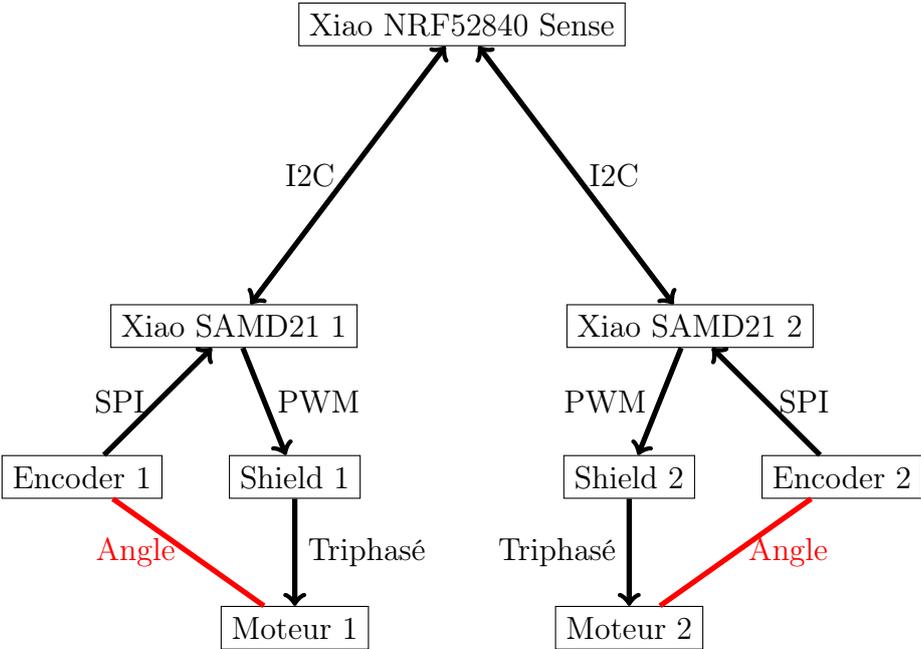


FIGURE 4.1 – Architecture d'une jambe

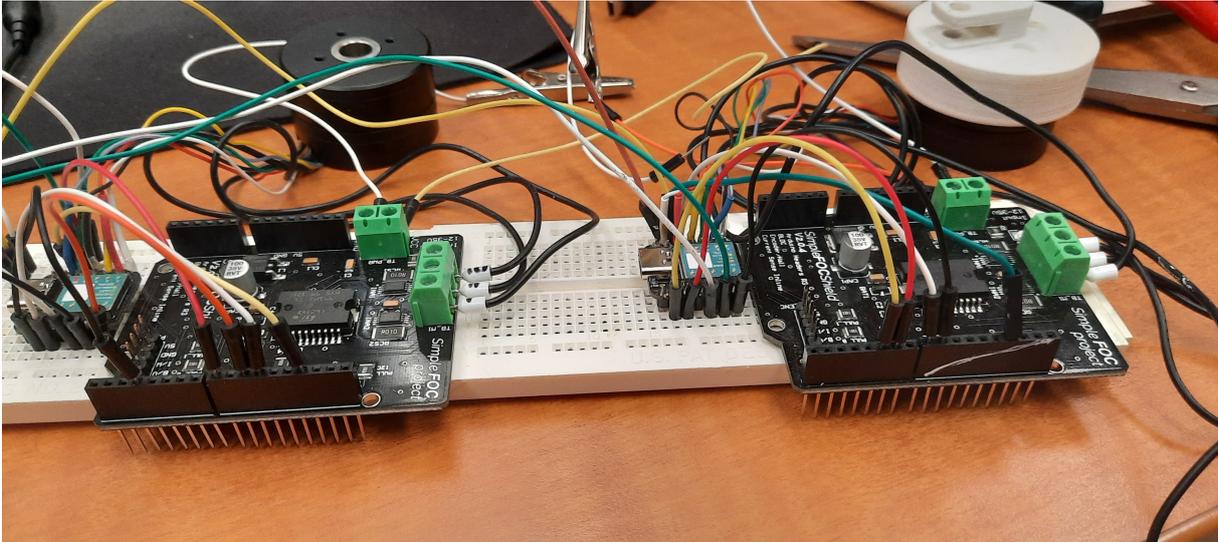


FIGURE 4.2 – Montage de test de l'architecture

4.2 Création des Cartes Imprimées

Une fois les tests fructueux et l'architecture arrêtée, il restait à intégrer le tout dans des cartes imprimées pour réduire l'encombrement. Les cartes ont été conçues en PCB sur KiCad. Il me fallait une carte permettant d'assembler les deux Xiao SAMD21 de la jambe avec les deux *shields* respectifs. Les *shields* SimpleFOC ayant une empreinte d'Arduino Uno, la carte jambe a la même empreinte pour faire passer les PWM par ces pins. Pour connecter les encodeurs en SPI, l'ajout de connecteur JST fût une bonne solution technique, ces connecteurs sont également utilisés pour connecter la carte au 3.3V et au réseau I2C. Finalement j'ai ajouté des pins de mesure pour pouvoir aisément contrôler les signaux en cas de besoin.

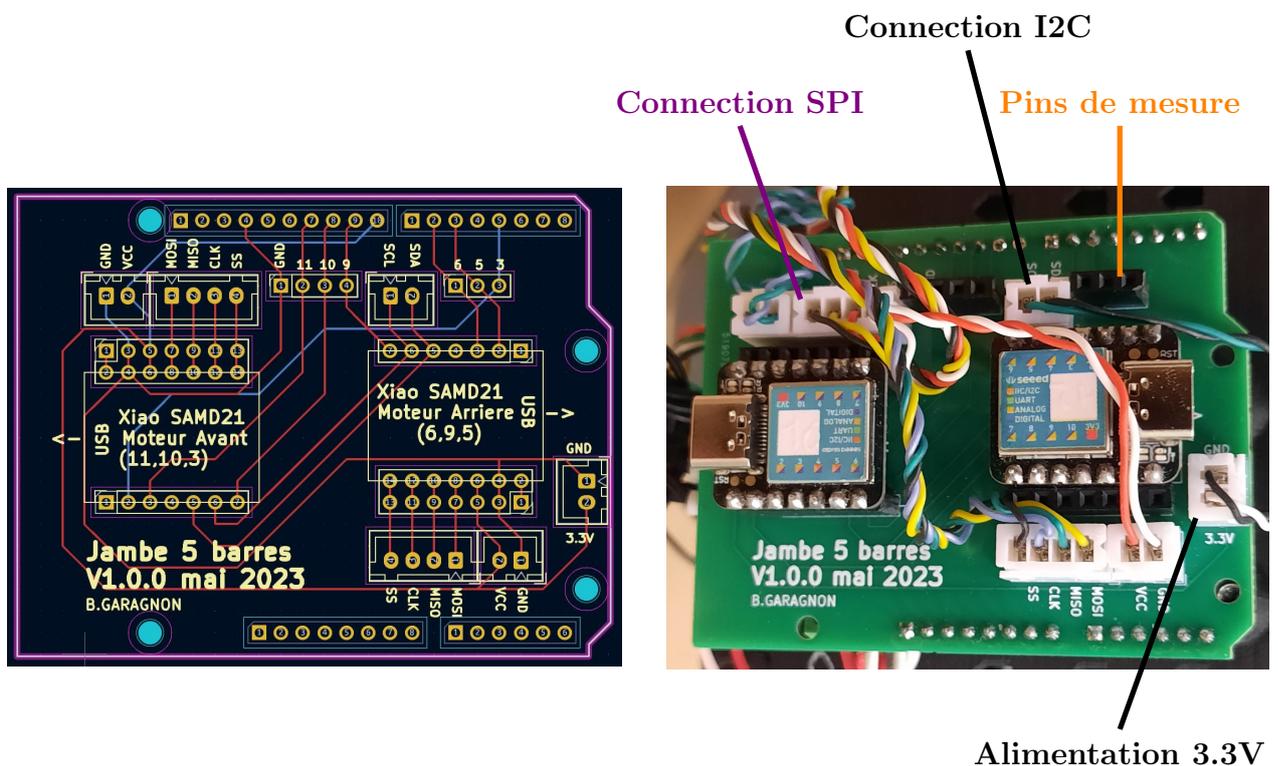
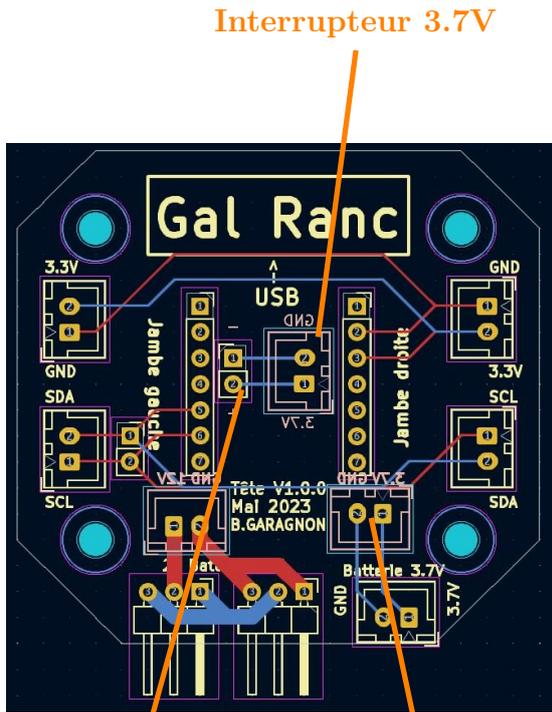


FIGURE 4.3 – PCB - Jambe

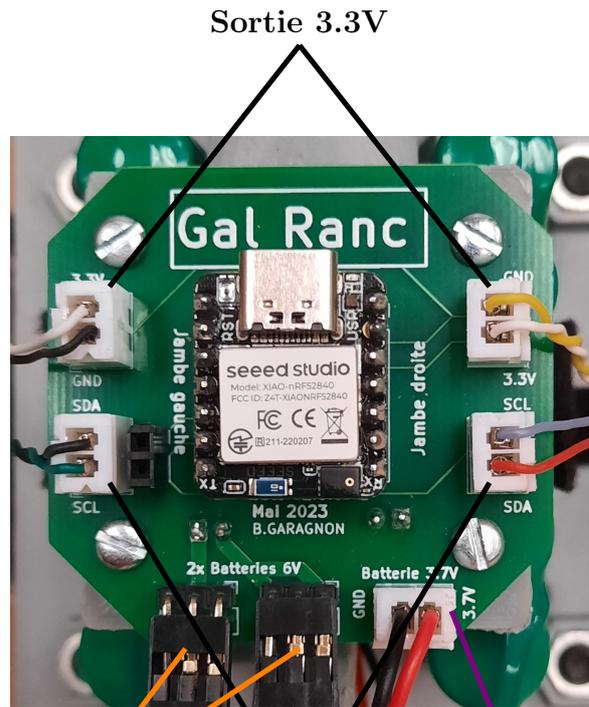
FIGURE 4.4 – Carte imprimée - Jambe

Une autre carte supportera le Xiao NRF52480 Sense, elle devra alimenter le chef en 3.7V et distribuer aux jambes le 3.3V et le réseau I2C. Elle sera également utilisé pour recevoir deux batteries 6V afin d'alimenter les *shields* en 12V. Deux broches pogos sous la Xiao NRF permettent de la connecter au 3.7V délivré par une batterie 1s, elle même branché sur une prise JST. La Xiao NRF génère du 3.3V pour alimenter les Xiao SAMD21 et les encodeurs des jambes. Le 3.3V et le réseau I2C est distribué aux jambes par des prises JST. Deux groupes de trois broches de branché les deux batteries 6V en série sans avoir besoin de détrompeur. Le 12V et le 3.7V passe chacun pas un interrupteur avant d'être utilisé.



Interrupteur 3.7V
 Broches pogos

FIGURE 4.5 – PCB - Chef



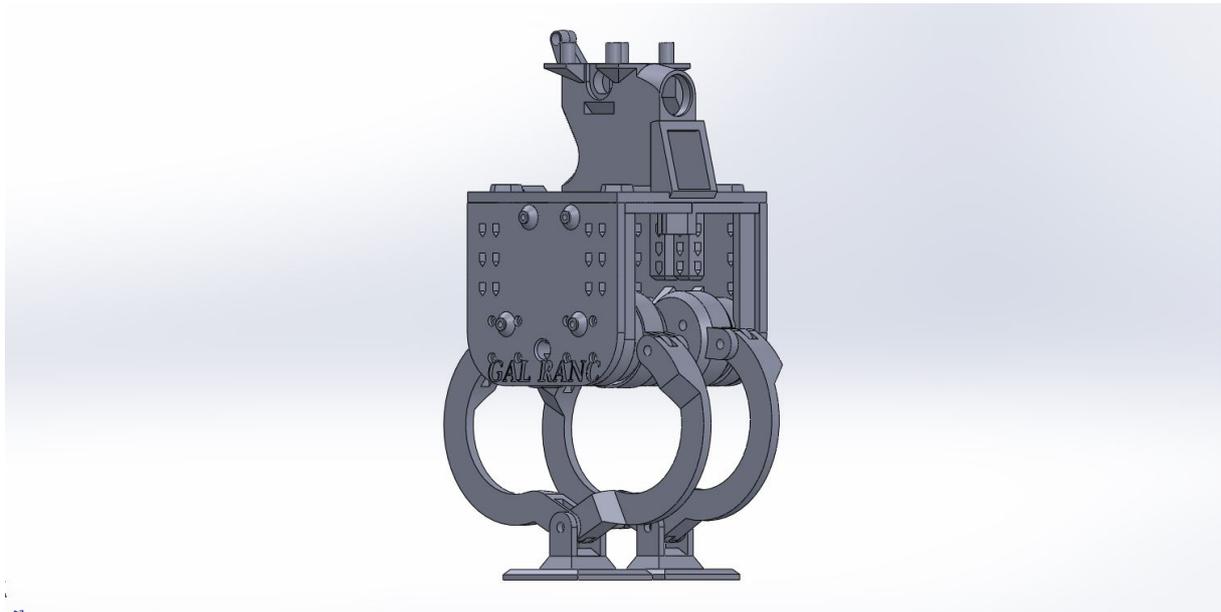
Sortie 3.3V
 Entrée 6V
 Connection I2C
 Entrée 3.7V

FIGURE 4.6 – Carte imprimée - Chef

Chapitre 5

Conception Mécanique et Fabrication

En connaissant désormais ce que l'on devra embarquer sur Gal Ranc, il reste à concevoir les pièces, elles seront imprimées en 3D afin de minimiser la masse. Pour le corps, il faudra une pièce pour constituer une jambe, donc les moteurs et les *shields*, indépendamment du reste. Ainsi qu'une autre pièce qui servira lorsque le robot complet sera monté pour porter le chef, les batteries et assembler les jambes ensemble. Pour les membrures, les cuisses, tibias et pieds seront aussi imprimés en 3D, il faudra garder la possibilité de modifier les dimensions des membrures si besoin, sans devoir modifier le corps. Les pièces ont été faites sur SolidWorks 2018.



5.1 Conception du Corps

Le corps sera donc en trois parties, deux d'entre-elles seront pour les jambe, appelées "hanches", et la dernière pour le chef, dit simplement "corps". La hanche définit la longueur $L3$, or pour maximiser la zone des possibles il faut le $L3$ petit. Les moteurs faisant 40mm de diamètre, le $L3$ minimum était par conséquent de 50mm. Grâce aux simulations, il est ressorti qu'avec un $L3$ de 50mm et une masse estimée à 1kg, si $L2$ dépassait 40mm le couple nominal des moteurs ne sera pas suffisant pour maintenir le robot debout. Avec les longueurs $L3$ et $L2$ définies et avec les dimensions des *shields* SimpleFOC, toutes les contraintes de conception de la hanche étaient connues. L'ajout de fixation pour serflex et de passage de câbles servira à la gestion des fils.

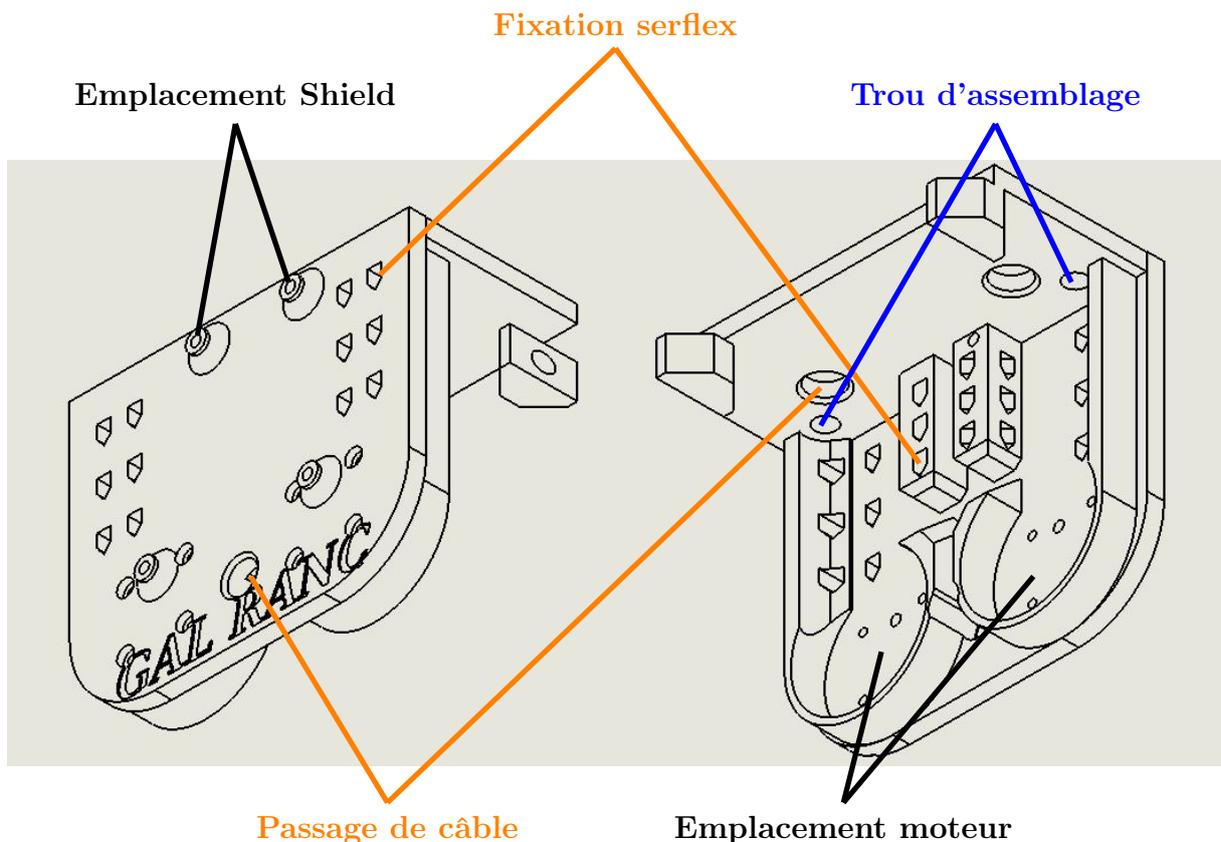


FIGURE 5.1 – Hanche

Le corps n'a qu'une seule contrainte géométrique, que la Xiao NRF52480 Sense soit sur l'axe central du robot, ainsi les mesures de la centrale inertielle seront plus simplement exploitables. Cependant, il devra tenir beaucoup de matériel, les trois batteries, les deux interrupteurs, les trous d'assemblage pour les hanches et un moyen d'alimenter en 12V Gal Ranc avec une alimentation secteur. L'emplacement pour le chef est situé sur le dessus pour simplifier l'accès à la carte et respecter la contrainte. Les batteries 6V sont placées verticalement pour maximiser le moment d'inertie I du robot, elles sont tenues par des bandeaux de scratch. La batterie 3.7V est clipsée au milieu du corps pour simplifier le montage. Les interrupteurs sont logés dans des emplacements respectifs à l'avant du robot. L'assemblage des hanches se fait par quatre vis, les logements des écrous sont intégrés au corps. Une prise d'alimentation en 12V est placée derrière la batterie 6V droite pour utiliser le robot sur secteur. Un puits traverse le corps de haut en bas derrière

les interrupteurs pour la gestion des câbles, il est relié à une gorge sous le corps qui permet de faire passer les fils d'alimentation 12V vers les jambes.

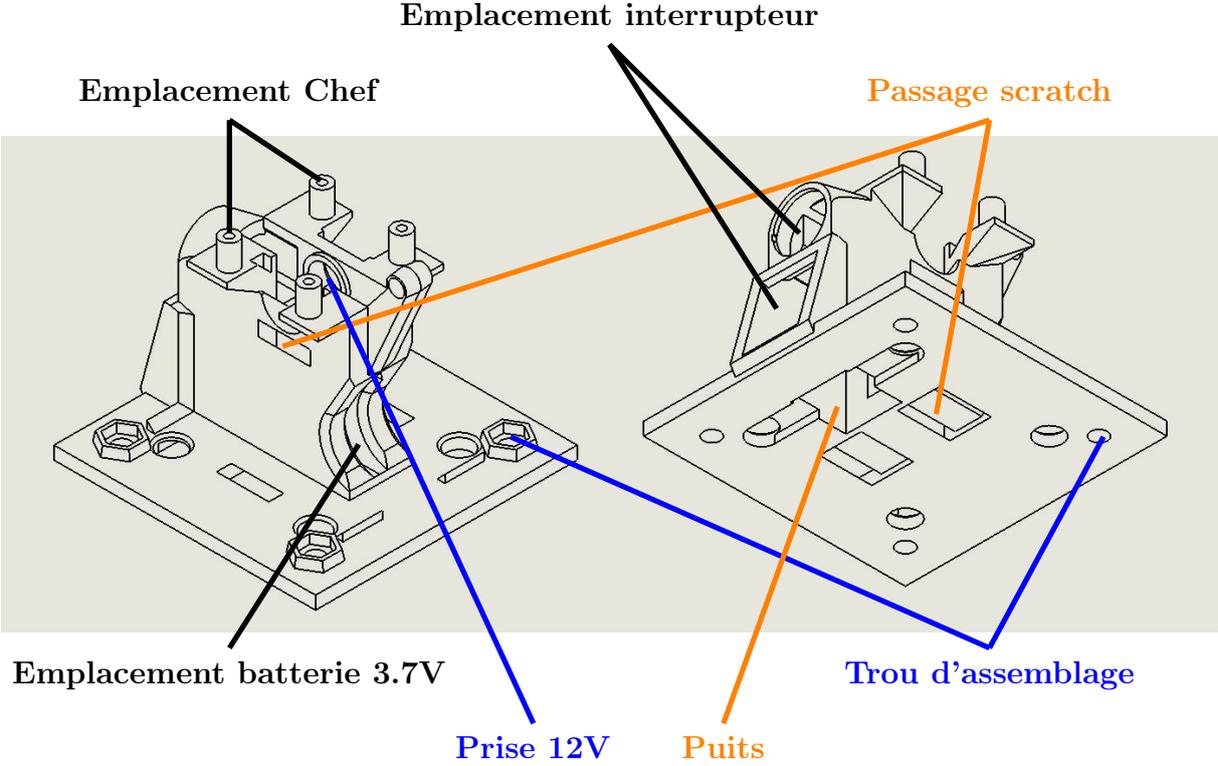


FIGURE 5.2 – Corps

5.2 Conception des Membrures

Les membrures doivent pouvoir être simple à imprimer en 3D et à changer pour permettre d'essayer plusieurs configurations. Le jeu dans les articulations doit être minimiser pour éviter que les jambes ne fléchissent. La forme des membrures doit permettre une liberté angulaire complète des cuisses afin ne pas limiter la zone des possible par un blocage mécanique. Lorsque les deux pieds sont sur le sol la stabilité latérale doit être mécanique. Les pieds doivent rester à l'horizontale et surélever les jambes pour empêcher les membrures de toucher le sol.

Pour minimiser le jeu dans les articulations sans avoir du frottement trop important, les liaisons pivots sont faite par un axe lisse métallique qui traverse les deux doubles broches des membrures (voir figures 5.4 et 5.3).

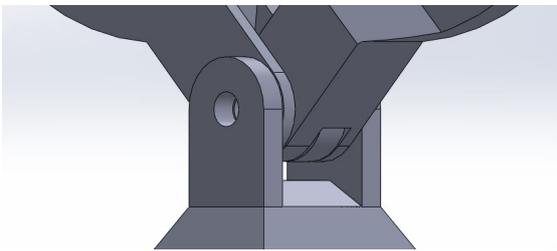


FIGURE 5.3 – Cheville

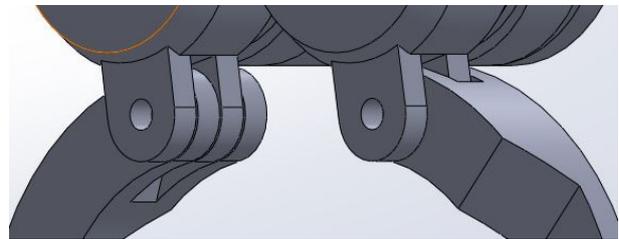


FIGURE 5.4 – Genou

Les tibias devaient permettre un débattement complet aux cuisses, et ce pour toutes les longueurs de cuisse. C'est la raison de leur forme particulière, cela permet d'utiliser l'entièreté de la zone de possible sans blocage mécanique (voir figures 5.5 et 5.6).

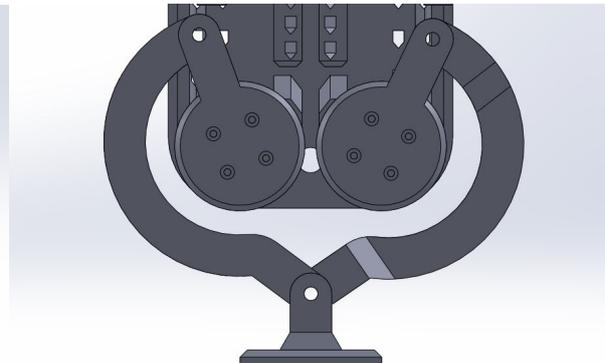
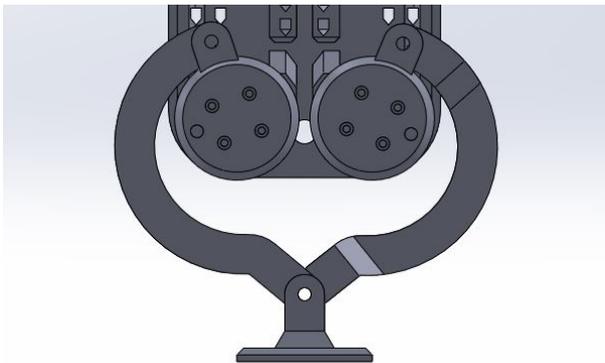


FIGURE 5.5 – Angle maximal $L1 = 30\text{mm}$ FIGURE 5.6 – Angle maximal $L1 = 40\text{mm}$

En raison de l'importante courbure du tibia le pied devait surélever la jambe pour éviter que pour certaines positions de la zone d'utilisation la jambe ne touche le sol (*voir figure 5.7*). La hauteur du pied n'a pas d'influence directe sur la stabilité du robot et peut être aussi haut que nécessaire.

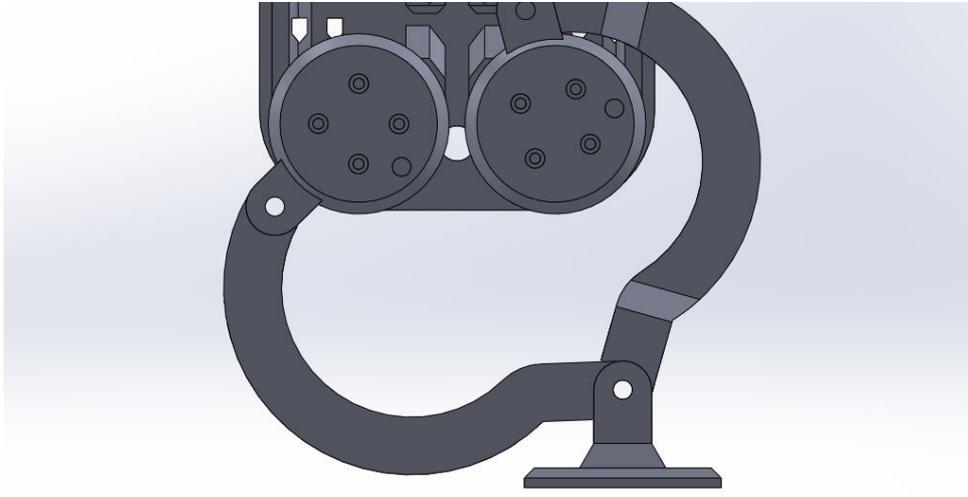


FIGURE 5.7 – Cas critique - pied

5.3 Fabrication

Les pièces ont été faites avec une imprimante 3D FDM dans l'optique d'avoir de bonnes performances mécaniques, tout en minimisant la masse, et de faciliter la fabrication des pièces avec des formes complexes.

La fabrication s'est passée sans accrocs. Toutes les pièces s'assemblent bien. Les articulations présentent de bonnes performances, peu de jeu et peu de frottement. Les trois batteries sont bien maintenues. Cependant les vis de la liaison entre les hanches et les moteurs doivent être resserrées régulièrement, probablement à cause des vibrations du moteur. La masse totale sans batterie est d'environ 0.95kg, ce qui est proche des estimations. Avec les batteries Gal Ranc pèse 1.25kg. La masse totale des moteurs et des *shields* est de 0.85kg, c'est lourd. L'ensemble des pièces imprimées pèsent environs 0.1kg ce qui est une masse acceptable.



FIGURE 5.8 – Types de cuisse

La figure 5.8 montre les trois types différents de cuisse qui ont été utilisés, de gauche à droite, une cuisse avec $L1=40\text{mm}$ non soutenue, une cuisse avec $L1=30\text{mm}$ non soutenue et une cuisse avec $L1=30\text{mm}$ soutenue.

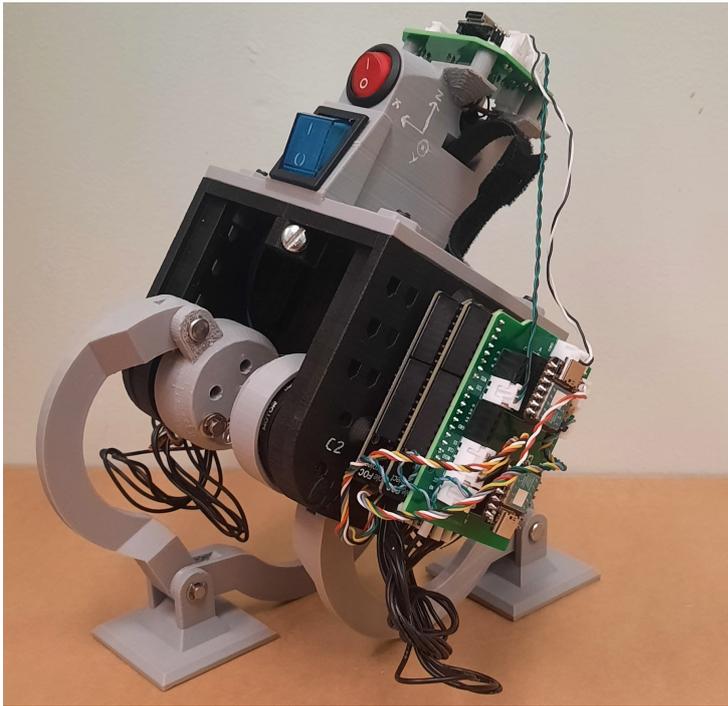


FIGURE 5.9 – Gal Ranc sans batterie



FIGURE 5.10 – Gal Ranc avec batterie

Chapitre 6

Expérimentation

Les premières expérimentations menées avaient pour objectif de valider les fonctions de base de Gal Ranc, comme le suivi en position des deux pieds, la bonne coordination des quatre moteurs et l'estimation de son état grâce à la centrale inertielle et aux encodeurs. Une deuxième phase d'expérimentation visait à étudier la stabilité passive puis active de Gal Ranc.



FIGURE 6.1 – Test de stabilité passive

6.1 Fonctions de base

La première phase d'expérimentation a commencé par valider le suivi de position des jambes à vide. D'abord chaque jambe séparément dans leur repère respectif ensuite en normalisant un repère global pour Gal Ranc (*voir figure 5.9*). Les résultats furent rapidement concluants. L'étape suivante fût de valider la bonne coordination entre les moteurs par l'envoi d'une même consigne échelon, l'observation du comportement et de l'analyse

des signaux ont montré que les moteurs réagissent à la consigne en coordination avec un délai de l'ordre de 2ms dans le pires des cas.

La dernière fonction de base à validé était l'estimation d'état, la lecture de la centrale inertielle et la récupération des données des encodeurs ne cause pas de ralentissement conséquent de la boucle Arduino du Chef. Ainsi cette boucle tourne avec une fréquence de l'ordre de 100Hz. Cette fréquence promet une stabilisation performante d'un point de vue logiciel. Des essais annexes sur le suivi de consignes en couple pour les moteurs ont été commencés mais pas achevés.

6.2 Stabilité Passive

Une fois les fonctions de base validées les premiers essais à mener furent les tests de stabilité passive. Le principe de ces tests est de positionner les pieds dans une position qui rend Gal Ranc stable passivement, donc sans asservissement avec la centrale inertielle. La figure 6.2 montre la zone théorique de stabilité par rapport aux positions des pieds. Le projeté vertical du centre de gravité de Gal Ranc doit être dans cette zone pour qu'il soit stable. On peut constater que si l'écart entre les pieds se réduit cette zone devient plus fine ce qui rend Gal Ranc moins robuste au face aux perturbations et aux déséquilibres.

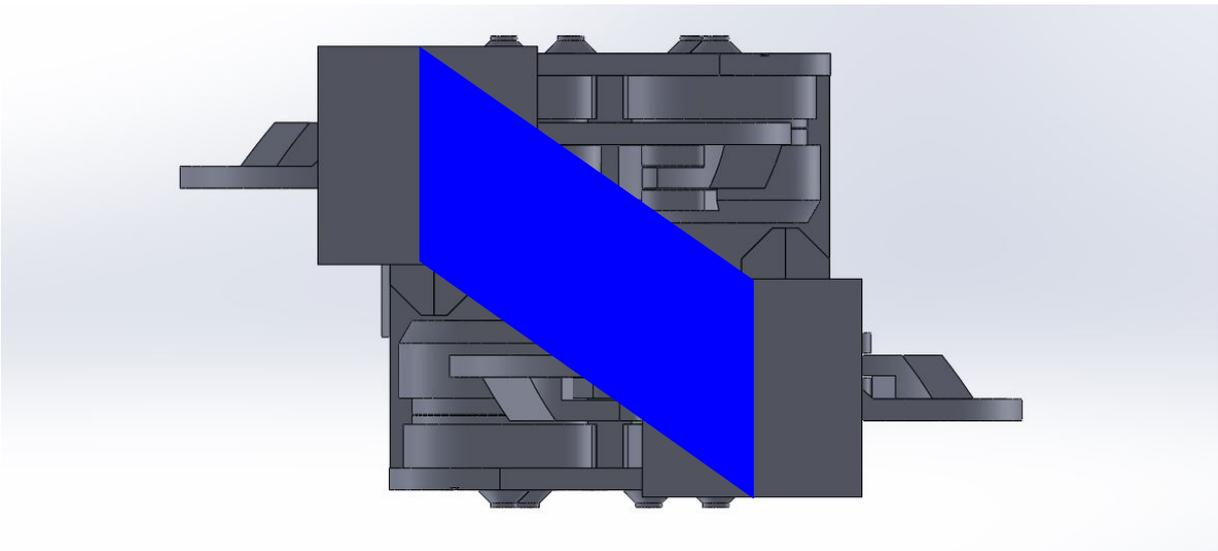


FIGURE 6.2 – Zone de stabilité

Il y eu trois types d'essai en stabilité passive, les essais en position fixe, les essais en mouvement sur ses appuis et les essais de marche. Les résultats des essais en position fixe étaient proches des attendus. Gal Ranc tient bien debout dans des positions centrées et pas désavantageuses pour les moteurs. En d'autres termes avec des espacements entre les pieds compris entre 4cm et 6cm avec des hauteurs égales (*comme sur la figure 6.1*) Gal Ranc est stable, résiste à de petites perturbations bien qu'il tremble légèrement. Ce défaut est probablement dû au PID de l'asservissement des moteurs qui n'est pas optimal. A contrario les essais avec une position fixe dissymétrique ou désavantageuse pour un moteur n'étaient pas concluants. Ils se soldaient majoritairement pas l'affaissement de la jambe la plus sollicitée. Plusieurs ajustement du PID ont légèrement amélioré les résultats mais pas suffisamment. C'est à ce moment que le besoin de soutenir la jambe est apparu.

Les essais en mouvement sur ses appuis ont donné des résultats similaires aux essais fixes. Lorsque le mouvement est symétrique avec un espacement entre 4cm et 6cm la stabilité est bonne. Il a effectué des séries de "squats" avec différentes fréquences et différentes amplitudes de façon convaincante. Cependant lorsque Gal Ranc se met dans des positions désavantageuses pour une des jambes cette dernière s'affaisse. Les essais en marchant ont permis de se rendre compte une dernière fois qu'une jambe ne peut pas soulever seule Gal Ranc, ainsi il traînait des pieds et n'était pas stable. L'ajout de ressort n'a pas eu autant de bienfaits que la simulation le laissait présager. J'avais à ma disposition deux ressorts différents. Pour un ressort qui avait un K de 20N/m , cela fit reculer globalement le moment de la chute en ralentissement l'affaissement des jambes. Cependant cela ne suffit pas à permettre à Gal Ranc de se mettre sur un seul pied. Pour un autre ressort avec un K 100N/m le soutien de la jambe était plus convaincant même trop convaincant puisque les moteurs n'étaient pas capable de tendre le ressort d'eux-même lorsqu'ils levaient la jambe pour effectuer un pas. Gal Ranc restait incapable de marcher grossièrement mais pour une autre raison. Le ressort optimal existe. Il reste à le trouver pour refaire les différents essais dans les meilleurs conditions.

6.3 Stabilité Active

Quelques essais de stabilisation active ont pu être fait, les résultats sont encourageant. Seulement ils ont dû être fait sans soutien d'un ressort pour coller au modèle utilisé dans l'algorithme de contrôle. Gal Ranc ne se stabilise pas et atteint rapidement l'angle critique comme sur la figure 3.6. La cause peut être un mauvais paramétrage de l'algorithme pour des positions proches de la consigne (*de l'ordre du centimètre*). Pour des positions plus éloignées le trop faible couple moteur ne permet pas de réagir au déséquilibre suffisamment rapidement. Avant de faire des essais de stabilisation active soutenue il faudra refaire l'algorithme de contrôle en intégrant l'action du ressort dans les équations.

Chapitre 7

Conclusion et Perspectives

7.1 Bilan des Performances de Gal Ranc

L'évaluation des performances de Gal Ranc a révélé des résultats encourageants. Ce projet a montré les principaux avantages et inconvénients du mécanisme à cinq barres dans ce type d'utilisation. La position de tous les actionneurs dans le corps simplifie grandement la fabrication, cela est le principal point fort de cette conception. Cependant la grande variation dans la zone des possibles des efforts sur les moteurs rend cette conception difficile à optimiser sur une vaste zone d'utilisation. Bien que Gal Ranc soit loin de présenter une locomotion fiable, il peut compter sur une architecture électronique qui s'est montrée efficace et fiable tout au long des essais. L'algorithme de contrôle donne aussi d'excellents résultats sur le modèle simulé et des résultats encourageants sur le modèle réel.

7.2 Améliorations Potentielles de la Conception

De nombreuses améliorations restent à faire sur Gal Ranc. L'optimisation du soutien de la jambe est primordial, en trouvant un ressort plus optimal ou en changeant de manière de l'utiliser par exemple. L'évolution du modèle stabilisé simulé sera également un point important dans la stabilisation active, en y intégrant l'action du ressort par exemple. Ces améliorations ont l'avantage d'impliquer pas ou peu de modifications sur Gal Ranc pour être implémentées. Cependant d'autres modifications plus profondes pourraient aussi améliorer ses performances. Si les moteurs de la jambe sont placés coaxialement ($L3 = 0m$) la zone des possibles sera plus grande et le comportement de la jambe sera plus simple. Ce qui par la même occasion simplifiera l'optimisation du soutien de la jambe. Des membrures à géométrie variable pourraient également être une piste à creuser pour diminuer la charge sur les moteurs. Un $L1$ petit réduira le couple moteur mais induira une petite zone des possibles. Mais lorsque la jambe doit se soulever pour faire un pas et que le genou rentre en butée une nouvelle articulation passive, bloquée jusqu'alors, se déverrouille pour changer la géométrie. Ainsi la jambe serait forte autour de son point d'utilisation et pourrait faire des mouvements amples. Il faut tout de même noter qu'un $L1$ trop petit rendra compliquée voir impossible la stabilisation active décrite plus haut.

Chapitre 8

Références

- [1] Hubicki C., et al.(2016). "ATRIAS : Design and validation of a tether-free 3D-capable spring-mass bipedal robot."
- [2] Hurst J., et al. (2019). "Cassie : A Dynamic and Talented Robot."
- [3] Boston Dynamics. "Atlas and beyond : the world's most dynamic robots"

Annexe A

Origine

"Gal Ranc"(Occitant Languedocien) veut dire "Coq boiteux" en français.