

ENSEIRB-MATMECA OPTION ROBOTIQUE ET  
APPRENTISSAGE

RAPPORT

---

Etat de l'art projet MEGABOT

---

*Étudiants :*

Floris JOUSSELIN  
Mathilde POMMIER

*Encadrants :*

Julien ALLALI  
Vincent PADOIS  
Grégoire PASSAULT



## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Équilibre et Allures de Marche</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Cinématique Inverse et Stratégies de Contrôle des Mouvements</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Synthèse et Décisions post investigations</b>	<b>9</b>
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>10</b>

## 1 Introduction

L'univers dynamique de la robotique propose un large éventail de projets innovants, parmi lesquels le *MEGABOT* se démarque. Ce projet universitaire se concentre sur un élément fondamental de la robotique, fréquemment éclipsé par la quête d'avancées plus complexes : la locomotion stable et fluide. Contrairement à d'autres initiatives qui se concentrent sur des technologies de pointe comme l'évitement d'obstacles ou l'intelligence artificielle, le *MEGABOT* s'attache au défi de faire bouger un robot de grande taille (250 kg) de manière stable et fluide.

L'objectif principal du projet est de développer un système de locomotion où la base du robot reste aussi horizontale que possible, assurant une stabilité maximale, tandis que les mouvements des pattes sont conçus pour être fluides. Ce document présente un état de l'art sur les différentes approches et techniques qui peuvent contribuer à la réalisation de cet objectif. En mettant l'accent sur les modèles de locomotion et les stratégies de contrôle de mouvement, nous explorons des solutions innovantes et des recherches antérieures pouvant être appliquées ou adaptées au *MEGABOT*.

Cette étude s'inscrit dans une démarche pédagogique et expérimentale, soulignant l'importance de maîtriser les bases de la locomotion avant de s'aventurer dans des applications plus complexes. En explorant l'état actuel de la recherche et en envisageant de nouvelles perspectives, nous cherchons à élargir la compréhension et l'efficacité de la locomotion dans la robotique quadrupède, en particulier pour des robots de grande taille comme le *MEGABOT*.

Dans ce rapport, nous investiguerons des stratégies de contrôle du robot, notamment la **Génération de Trajectoire Analytique** centrée autour du **Centre de Pression (CoP)**, et l'**Active Compliance Control**, qui offrent une démarche robotique à la fois précise et adaptable. En particulier, l'intégration de l'**Active Compliance Control**, qui repose sur l'**Admittance Virtuelle**, permet au robot de répondre de manière plus organique aux contraintes environnementales, créant ainsi un équilibre optimal entre précision et adaptabilité.

Nous explorerons aussi l'importance du **Zero-Moment Point (ZMP)** dans la préservation de l'équilibre du robot, essentiel pour une navigation sûre sur des terrains inégaux. L'application de la méthode **Spring-Loaded Inverted Pendulum (SLIP)** et du modèle **Mass-Mass-Spring (MMS)** seront étudiées pour leur potentiel à réduire les chocs et à imiter la locomotion animale, bien que leur application soit limitée par les capacités mécaniques actuelles du *MEGABOT*. Le mécanisme de la **démarche rampante**, bien que plus simple, sera également décrit et considéré pour son potentiel à accroître la stabilité.

Notre rapport présentera pour finir une **synthèse** des technologies et stratégies les plus prometteuses, fournissant une **feuille de route** pour les futures applications du *MEGABOT*. Ce travail vise à établir un équilibre entre les avancées théoriques et les réalités pratiques de la robotique quadrupède.

## 2 Équilibre et Allures de Marche

Dans le projet *MEGABOT*, une attention particulière est portée aux manières de **marcher** du robot et à son **équilibre**. Ces aspects sont cruciaux car ils déterminent la capacité du robot à **se déplacer efficacement** dans différents environnements. Dans cette section, nous allons explorer les diverses démarches possibles pour le *MEGABOT* et comprendre l'importance de

maintenir un bon équilibre, en se concentrant sur le rôle du **centre de masse** dans ces processus.

## Équilibre

Nous allons, dans un premier temps, nous intéresser à l'équilibre d'un robot.

Tout d'abord, la recherche sur la plateforme *Metabot* [6] offre des perspectives sur l'utilisation de **capteurs** pour **estimer le centre de pression**, facilitant une marche plus stable. L'intégration d'un tel système dans le *MEGABOT* améliorerait sa **stabilité latérale**, particulièrement sur des terrains complexes.

Plus précisément, l'utilisation de capteurs de pression et leur intégration dans le projet **Metabot** [6] contribue de manière significative à la stabilisation de la marche du robot. Grâce à ces capteurs, le robot peut ajuster dynamiquement son pied de support en fonction des données recueillies, ce qui lui permet de maintenir un meilleur équilibre pendant la marche, en particulier sur des terrains inégaux ou instables.

En ajoutant ce type de capteurs au *MEGABOT*, nous pourrions explorer des stratégies similaires pour améliorer la stabilité latérale et l'équilibre du quadrupède.

Également, le concept du **Zero-Moment Point (ZMP)** [4] est fondamental pour le développement d'une démarche équilibrée. En adoptant le principe du ZMP, le *MEGABOT* pourrait se déplacer de manière plus **stable** et sûre, même sur des surfaces inégales, **optimisant chaque pas pour maintenir l'équilibre**.

Le **ZMP** est un point où la **somme des moments dus aux forces** gravitationnelles, inertielles, de Coriolis et centrifuges est **nulle**, assurant ainsi l'**équilibre dynamique du robot**. La **position du ZMP** doit rester **à l'intérieur du polygone de support** pour maintenir cet équilibre. Si le ZMP se trouve à l'extérieur de ce polygone, cela indique une perte d'équilibre, et le robot peut potentiellement basculer.

Pour le *MEGABOT*, le polygone de support est un carré lorsque les quatre pattes de ce dernier sont fixées au sol et un **triangle** lorsqu'une patte est levée pour faire avancer le robot. La figure 1 représente un quadrupède ayant trois de ses pattes au sol et une soulevée. Le triangle orange représente la **zone de sustentation**. Le robot est statiquement stable si le centre de pression P est dans ce triangle et dynamiquement stable si le centre de masse C l'est également. Le but est également de **garder le ZMP dans ce triangle** afin de conserver l'équilibre du robot (dans le triangle jaune si possible afin de garder une marge de sécurité).

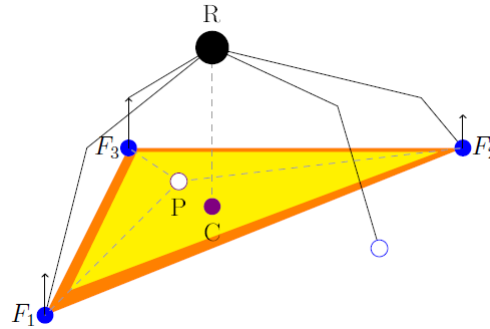


FIGURE 1 – Schéma explicatif du ZMP [6]

## Allures de Marche

Dans un second temps, nous pouvons nous intéresser aux différentes allures de marches développées pour des robots quadrupèdes.

Un premier modèle d'allure de marche intéressant pour notre projet pourrait être le **Spring-Loaded Inverted Pendulum** [7] (SLIP). Ce dernier est composé d'une **masse ponctuelle** (représentant le centre de masse de l'animal ou du robot) montée sur un **ressort** virtuel. Ce ressort représente les **propriétés élastiques des jambes** pendant la course. Ce modèle peut être visualisé sur la figure 2.

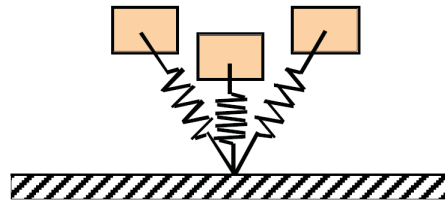


FIGURE 2 – Modèle SLIP [7]

Dans le modèle SLIP, lors de la course, le **centre de masse** tombe à son **point le plus bas à mi-appui**, simulant la **compression d'un ressort de jambe virtuel**. Dans la seconde moitié du pas, le **centre de masse rebondit**, comme si le ressort se détendait et **recupérait l'énergie élastique stockée**. Ce mécanisme est observable chez les humains, les chiens, les lézards, les crabes, les cafards et même les centipèdes. Cette compression suivie de la détente permettent une économie significative d'énergie.

Également, le concept du modèle "**Mass-Mass-Spring**" (MMS) [3] pourrait être utilisé comme base d'allures de marche du *MEGABOT*. Ce dernier introduit une conception de la **dynamique des jambes** qui **tient compte de la masse** et intègre une **colonne vertébrale flexible**. Cette innovation permettrait au *MEGABOT* d'adopter des **allures plus naturelles** et efficaces, **imitant** la dynamique de la **locomotion animale**, et améliorant ainsi la **stabilité** et l'**agilité** du robot. Le *MEGABOT* étant de masse important (250 kg), il serait intéressant d'implémenter cette méthode afin de constater la plus-value d'une colonne vertébrale flexible et de la dynamique des jambes.

Dans le MMS, contrairement aux modèles rigides traditionnels, la masse des jambes est considérée comme non négligeable et joue un rôle clé dans la dynamique du corps du robot. Le mouvement

de ces masses, en contact avec le sol, génère une flexion du tronc, un aspect souvent négligé dans les modèles rigides. Cette flexion ainsi que la compression et dilatation des ressorts sont visibles sur la figure 3.

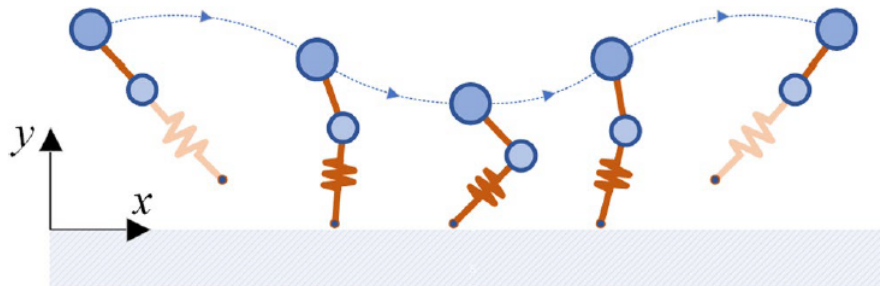


FIGURE 3 – Modèle MMS [3]

La **comparaison** des modèles **MMS** et **SLIP** montre que le **MMS**, en prenant en compte la masse supplémentaire au niveau du genou, permet de modéliser les forces permettant la flexion du tronc pendant la phase de vol. Cela se traduit par une **plus grande longueur de foulée** et une **courbure plus précise du tronc** par rapport au modèle **SLIP**, qui ne permet que d'obtenir un fléchissement de la colonne vertébrale.

Ainsi, pour le *MEGABOT*, l'intégration d'un système semblable au modèle **MMS** pourrait lui permettre de se déplacer avec des **mouvements plus naturels et efficaces**, en tirant parti de la flexibilité de sa structure pour **stocker** et libérer de l'**énergie**, réduisant ainsi les chocs dans la structure mécanique.

Finalement, il est aussi possible d'adopter une allure de marche beaucoup plus basique telle que la **Creeping gait** [2] se concentrant sur un objectif de **stabilité** et non de rapidité ou d'adaptabilité. Cette **démarche rampante** est caractérisée par le **soulèvement** et la **pose** d'**une seule patte à chaque étape de la marche**, ce qui permet de maintenir la **stabilité statique** du robot.

Dans un robot quadrupède, les **pattes** sont **numérotées** de l'avant vers l'arrière, avec les pattes gauches portant des numéros impairs (1 et 3) et les pattes droites des numéros pairs (2 et 4) comme représenté sur la figure 4.

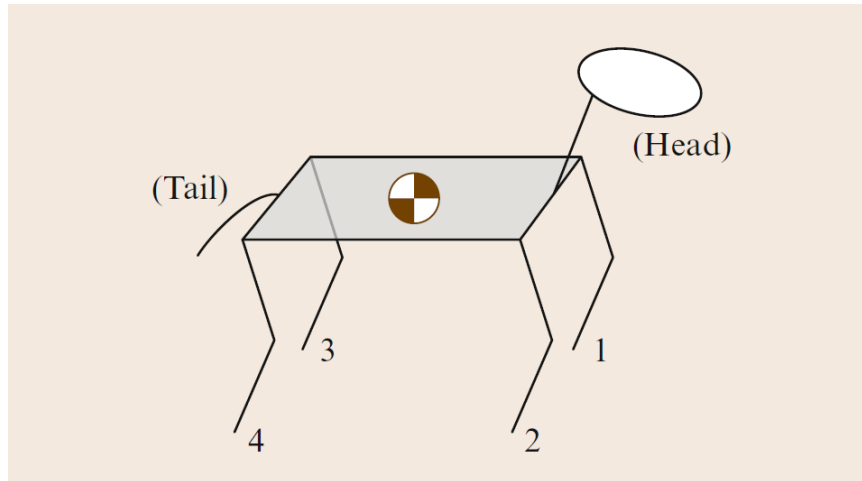


FIGURE 4 – Creeping gait : numérotation des pattes [2]

Il existe **six démarches rampantes** différentes représentées par la figure 5 pour un robot quadrupède. Celles-ci peuvent être distinguées par la série de numéros de pattes indiquant l'ordre de leur placement.

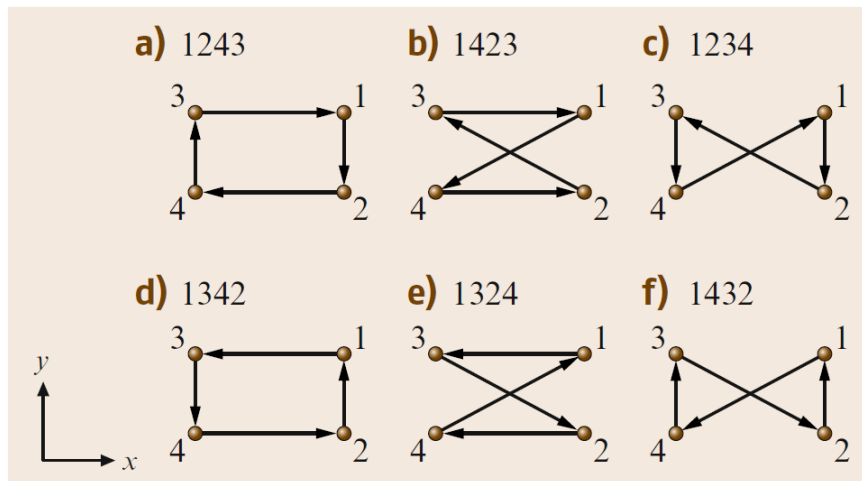


FIGURE 5 – Creeping gait : ensemble des allures [2]

Certaines démarches rampantes offrent une stabilité maximale dans des directions spécifiques. Par exemple, la démarche **1423** offre la **plus grande stabilité** lors de la marche dans la direction de l'**axe x**. D'autres démarches, comme **1243** et **1342**, fournissent une **stabilité moyenne** et sont plus **adaptées pour tourner**.

De façon concrète, six positions sont définies pour chaque pattes : trois au sol et trois autre de coordonnées  $x$  et  $y$  identique mais de coordonnée  $z$  supérieure (la patte est au dessus du sol). Ces trois premières positions représente la position possible de la patte au plus proche de la base du robot, au plus loin et le milieu des deux précédentes. En déplaçant chaque patte comme décrit sur la figure 6, on renforce le triangle de sustentation afin de toujours conserver le centre de masse à l'intérieur de ce dernier. Cette figure étant la première étape de la démarche la plus stable (1423).

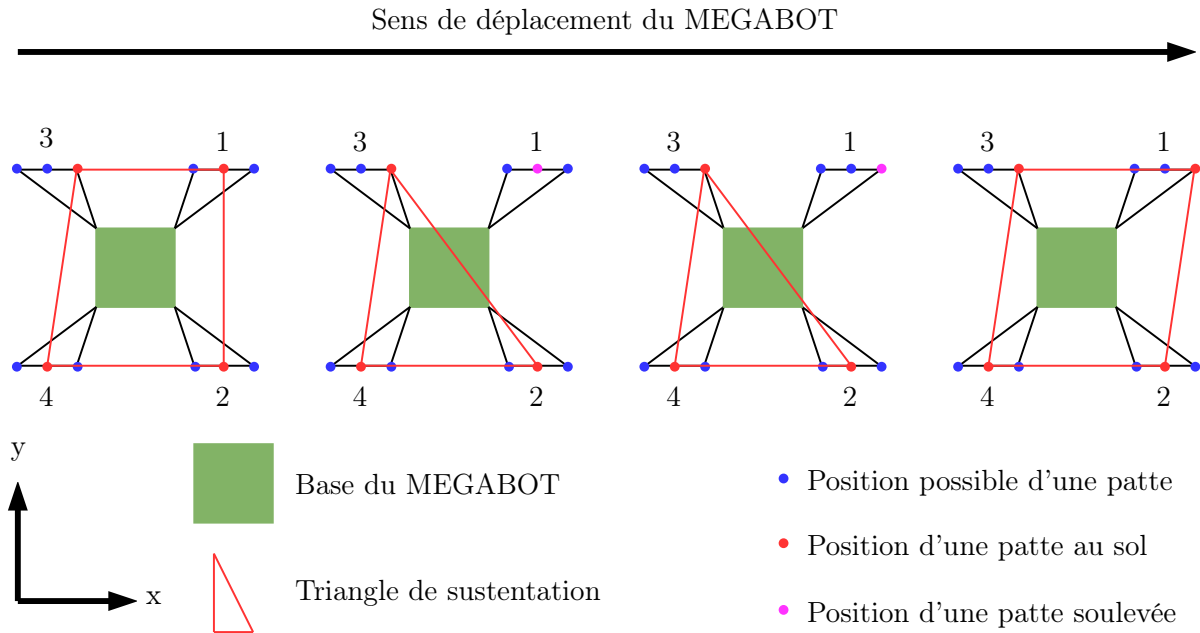


FIGURE 6 – Creeping gait : déplacement de la patte 1 sur l'axe x

### 3 Cinématique Inverse et Stratégies de Contrôle des Mouvements

Après avoir étudié la locomotion du *MEGABOT* d'un point de vue plus statique, cette section se concentre sur l'exploration de méthodes visant à mouvoir le *MEGABOT* en s'intéressant à la cinématique inverse et les stratégies de contrôle de celui-ci.

La méthode de **Génération de Trajectoire Analytique Centrée sur le Centre de Pression (CoP)** [1] se distingue par sa capacité à générer des mouvements fluides et adaptatifs expérimenté sur le robot HyQ, optimisant la cinématique inverse pour une meilleure navigation sur divers terrains.

La génération de trajectoire pour les robots quadrupèdes est souvent confrontée au **problème** de la **dynamique complexe** due à la multiplicité des pattes. Pour obtenir des trajectoires de mouvement réalisables, on se **base** donc sur le centre de pression (**CoP**). Dans ce contexte, la génération de trajectoire commence par **définir le CoP désiré** et **résoudre les équations du mouvement** pour **obtenir la trajectoire** du centre de masse (**CoM**) qui **respecte ce CoP**. Dans le modèle utilisé, le **CoP** est maintenu **constant** pendant les phases dites de **support simple** et **varie linéairement** pendant celles de **support double**.

En parallèle, l'**Active Compliance Control** [1] basé sur l'Admittance Virtuelle introduit une flexibilité dans la gestion des articulations, permettant au robot de réagir de manière plus "organique" aux contraintes environnementales.

Plus précisément, ce système de contrôle active l'adaptabilité des articulations en réponse à des erreurs de force détectées. En utilisant un bloc d'admittance, le contrôleur calcule les déplacements articulaires qui correspondent aux erreurs de force, et ces déplacements sont ensuite insérés dans la boucle de contrôle de position comme un terme de feedback secondaire.

Cette combinaison de trajectoire analytique et d'**Active Compliance Control** crée un équilibre entre précision des mouvements et adaptabilité, essentiel dans les environnements dynamiques et imprévisibles.



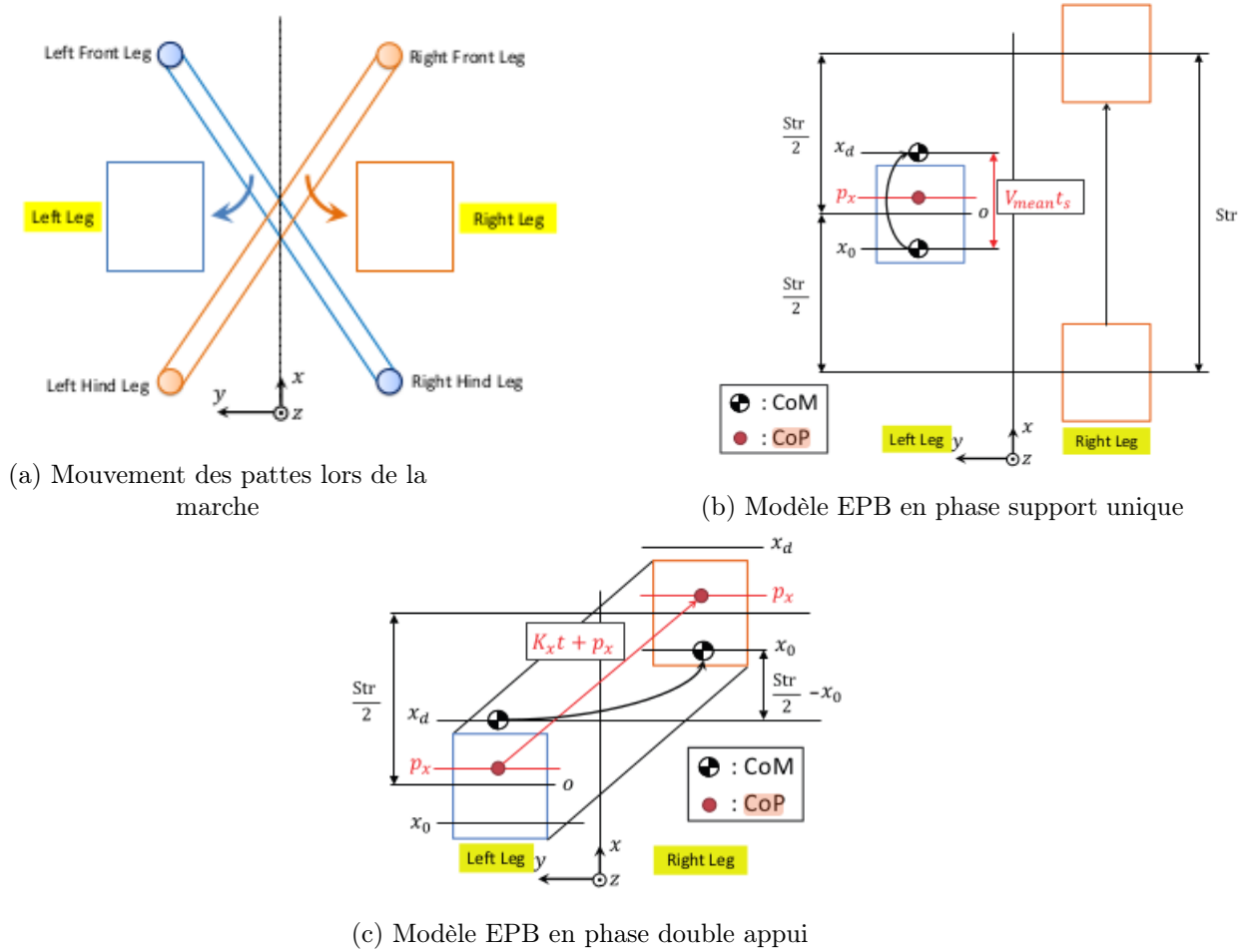


FIGURE 7 – Modélisation de la dynamique de marche d'un robot quadrupède : Aperçu des phases de support et de la gestion du Centre de Masse (CoM) et du Centre de Pression (CoP)[1]

Le schéma 7a illustre la séquence de mouvement des pattes durant la marche dans le modèle **Equivalent Pendulum Body (EPB)** [1], mettant en évidence le mouvement alterné des pattes avant et arrière. Les mouvements des pieds sont coordonnés de manière à simuler une démarche bipède, ce qui simplifie le problème de génération de trajectoire. La représentation montre comment les pattes diagonalement opposées se déplacent simultanément, ce qui est caractéristique du trot. Cette symétrie est exploitée pour générer des trajectoires de mouvement équilibrées et réalistes.

Le diagramme 7b dépeint le modèle **EPB** [1] pendant une phase de support unique, avec le vecteur de vitesse moyenne du **CoP**. Cette phase est critique car elle représente le moment où une seule patte supporte le poids du robot, ce qui requiert une gestion précise du CoM et du CoP pour maintenir l'équilibre. Le contrôle de la trajectoire du CoM pendant cette phase est essentiel pour assurer une marche stable et est obtenue par des calculs analytiques qui tiennent compte des contraintes physiques et de la symétrie des mouvements.

Enfin, le modèle **EPB** [1] est représenté durant une phase de double appui 7c, montrant les ajustements du **CoP** entre les pattes pour maintenir l'équilibre. Cette phase implique un déplacement linéaire du CoP entre les pieds supportés, ce qui est essentiel pour le passage d'un pas à l'autre tout en maintenant l'équilibre dynamique. L'équilibre durant la phase de double appui est également calculé analytiquement.

Appliqué au *MEGABOT*, inclure une telle stratégie de contrôle permettrait de prendre en compte l'aspérité du terrain sur lequel le *MEGABOT* se déplacerait.

Une approche plus classique est d'appliquer la **cinématique inverse** dans la robotique quadrupède avec des méthodes telles que l'**Analyse des Jacobiens de Manipulateur** [8]. Elle éclaire sur la manière dont les variables de mouvement des robots peuvent être précisément contrôlées et manipulées pour atteindre des objectifs spécifiques. Toutefois, une telle exploitation de la cinématique inverse n'est pas nécessairement faisable dans le cas de boucle cinématique fermée comme présentes dans l'architecture du *MEGABOT*.

Dans le cas de boucle cinématique fermée la méthode de **Programmation Quadratique (QP)** peut être une alternative. L'article "*An Optimization-Based Locomotion Controller for Quadruped Robots Leveraging Cartesian Impedance Control*" [9] présente une méthode de **Contrôle d'Impédance Cartésien Optimisé par Programmation Quadratique (QP)**. Cette innovation allie la précision de la cinématique inverse avec l'adaptabilité du contrôle d'impédance, offrant une méthode de contrôle des mouvements à la fois précise et flexible. Cette intégration permet au robot de maintenir une stabilité même en présence de perturbations ou de changements dans l'environnement, une avancée significative pour les applications pratiques dans des environnements variés. C'est d'ailleurs la méthode de **Programmation Quadratique (QP)** qui est actuellement utilisée pour le contrôle du *MEGABOT*.

Une autre approche est l'**Analyse de Faisabilité basée sur le Couple (Wrench)**, utilisant des concepts comme l'**Actuation Wrench Polytope (AWP)** et le **Feasible Wrench Polytope (FWP)**. Cette méthode permet une planification de mouvement qui prend en compte les capacités physiques et les limites d'actuation du robot, assurant ainsi que les trajectoires planifiées soient à la fois optimales et réalisables. Cette approche représente une étape importante dans la garantie que les stratégies de contrôle et les plans de mouvement soient en parfaite harmonie avec les capacités physiques du robot. Ces polytopes sont représentés sur un robot quadrupède comme suit.

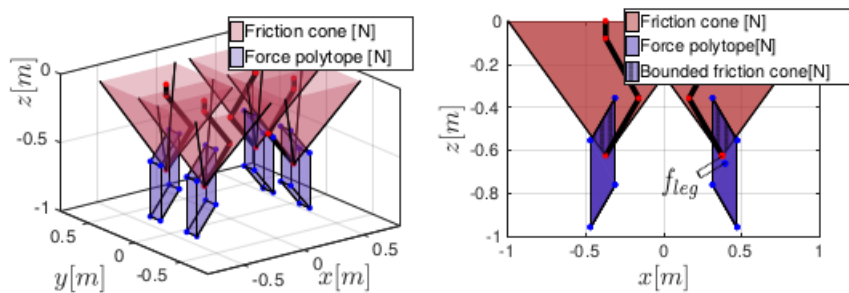


FIGURE 8 – Représentation des polytopes de force (bleus) et des cônes de frottement (roses) de chaque patte.[5]

Avec le modèle du *MEGABOT* adapté, il pourrait être possible d'exploiter de manière semblable les polytopes du *MEGABOT* pour planifier au mieux ses commandes de mouvement.

Collectivement, ces contributions offrent un cadre enrichi pour la cinématique inverse et les stratégies de contrôle des mouvements envisageable pour le *MEGABOT*. Elles marquent une évolution significative vers des systèmes robotiques plus sophistiqués, capables de naviguer et

d'opérer de manière autonome dans des environnements complexes.

## 4 Synthèse et Décisions post investigations

Dans cette partie, nous effectuerons un travail de synthèse sur l'ensemble des pistes de recherche proposée ci-avant afin d'aboutir à des décisions sur les technologies à employer sur le projet *MEGABOT*.

Notre étude a révélé des stratégies prometteuses pour améliorer ces aspects, notamment à travers l'utilisation de **capteurs de pression** pour estimer le centre de pression et ainsi faciliter une marche plus stable, comme démontré par les recherches sur la plateforme **Metabot**.

Actuellement, le *MEGABOT* n'est pas doté de tels capteurs par souci financier. Étant un projet universitaire à but non-lucratif, il est important de réduire les coûts de production du robot afin de rendre la conception possible. Par conséquent, bien que d'une utilité incontestable, les capteurs de pression ne seront pas ajoutés au prototype actuel.

Dans cette optique, notre approche se concentrera sur l'application du **principe fondamental** du **Zero-Moment Point (ZMP)**. Le ZMP, un concept essentiel pour le développement d'une démarche équilibrée, offre une solution efficace pour maintenir la stabilité du *MEGABOT* sans nécessiter l'investissement supplémentaire dans des capteurs coûteux. En **optimisant** la position du ZMP à l'intérieur du polygone de support, nous pouvons assurer une meilleure **stabilité** du *MEGABOT*.

Dans notre exploration des allures de marche pour le *MEGABOT*, nous avons examiné plusieurs modèles dynamiques, notamment le Spring-Loaded Inverted Pendulum (SLIP) et le Mass-Mass-Spring (MMS). Ces modèles offrent des avantages indéniables, en particulier en termes de réduction des chocs et d'imitation de la dynamique naturelle de la locomotion animale. Cependant, ces modèles dévoilent leur plein potentiel lors de la course, ou tout du moins lors d'une marche rapide, ce qui ne sera pas le cas du *MEGABOT*. En effet, les contraintes mécaniques actuelles du robot ne lui permettront pas d'atteindre une vitesse suffisante. En outre, compte tenu de l'état actuel d'avancement du projet, la structure mécanique existante du *MEGABOT* ne subira pas de modifications.

En conséquence, nous optons pour une **démarche plus élémentaire** basée sur la **stabilité**, privilégiant une **allure patte par patte**. Ce choix garantit une marche stable et équilibrée, où le *MEGABOT* maintient **toujours au moins trois points d'appui au sol**, renforçant ainsi le **triangle de sustentation**. Cette méthode permet de garder le centre de masse et le Zero-Moment Point (ZMP) toujours à l'intérieur de ce triangle, offrant ainsi une marge de sécurité et une stabilité accrue.

Dans notre exploration des stratégies de contrôle, nous avons abordé la **Génération de Trajectoire Analytique Centrée sur le Centre de Pression (CoP)** afin d'optimiser la **cinématique inverse**. Nous ne retiendrons pas cette méthode car obtenir le modèle de pression sous chaque pattes nécessiterait une complexification du modèle actuellement disponible et surtout l'intégration de capteurs qui ne nous sont pas accessibles.

D'ailleurs, le *MEGABOT* présentant des boucles cinématique fermé, la méthode de calcul de **cinématique inverse** n'est pas trivialement applicable et c'est la méthode de résolution numérique par **Programmation Quadratique (QP)** qui est retenu.

Il pourrait être envisageable, en complexifiant la modélisation du *MEGABOT*, de prendre en compte une représentation des **Polytopes** de vitesse ou d'accélération, mais ceux de force ou de couple nécessiterais, encore une fois, l'ajout de capteurs. Cependant, une telle intégration relève de l'optimisation plus que du contrôle fondamentale et ne sera donc pas le centre d'intérêt de la poursuite de notre travail.

## 5 Conclusion

En conclusion, ce rapport d'état de l'art a mis en lumière les avancées techniques et théoriques essentielles pour la conception d'une locomotion stable et efficace pour le *MEGABOT*. En prenant en compte les contraintes spécifiques à un projet académique, nous avons sélectionné des stratégies éprouvées et accessibles qui s'alignent avec les ressources et les objectifs du projet. L'approche adoptée allie des mécanismes de locomotion bien établis comme le **Zero-Moment Point** et les **démarches rampantes** à des méthodes de résolution numérique adaptées, telles que la **Programmation Quadratique**.

## Références

- [1] C. SEMINI D. G. CALDWELL B. UGURLU I. HAVOUSTIS. “Analytical Trajectory Generation and Active Compliance Control”, (2013).
- [2] OUSSAMA KHATIB BRUNO SICILIANO. “Springer Handbook of Robotic”, (2008).
- [3] S. DOMINGUEZ C. ROSSI E. A. PARRA RICAURTE J. PAREJA. “Comparison of Leg Dynamic Models for Quadrupedal Robots with Compliant Backbone”, (2022).
- [4] BRANISLAV BOROVAC MIOMIR VUKOBRATOVIĆ. “Zero-Momement Point - Thirty Five Years of its Life”, (2004).
- [5] ROMEO ORSOLINO et al. “Application of Wrench-based Feasibility Analysis to the Online Trajectory Optimization of Legged Robots”, (2017).
- [6] GRÉGOIRE PASSAULT. “Optimisation de la locomotion de robots bas coût à pattes”, (2016).
- [7] D. E. KODITSCHKEK R. J. FULL. “Templates and Anchors : Neuromechanical Hypotheses of Legged Locomotion on Land”, (1999).
- [8] Zexiang Li S. Shankar Sastry RICHARD M. MURRAY. “A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation”, (1994).
- [9] GUIYANG XIN et al. “An Optimization-Based Locomotion Controller for Quadruped Robots Leveraging Cartesian Impedance Control”, (2020).