

THÈSE DE DOCTORAT

Soutenue à Aix-Marseille Université
le 28 août 2023 par

Ilya BRODOLINE

Optimisation mécatronique d'un robot hexapode bio-inspiré
pour une navigation autonome de longue distance

Discipline

Sciences du Mouvement Humain

École doctorale

ED 463 SCIENCES DU MOUVEMENT HUMAIN

Laboratoire/Partenaires de recherche

Institut des Sciences du Mouvement
Équipe Systèmes Bio-Inspirés

Composition du jury

• Dr. Christine CHEVALLEREAU	Rapporteure
• LS2N, CNRS, Nantes	
• Prof. Bruno WATIER	Rapporteur
• JRL, LAAS-CNRS, Toulouse	
• Dr. Anthony HERREL	Examineur
• CNRS, MNHN, Paris	
• Prof. Jean-Marc LINARES	Président du jury
• ISM, SBI, Marseille	
• Jean-Daniel MASSON	Invité
• Agence Innovation Défense	
• Dr. Stéphane VIOLLET	Directeur de thèse
• ISM, SBI, CNRS, Marseille	
• Dr. Julien SERRES	Co-Directeur de thèse
• ISM, SBI, IUF, Marseille	

Affidavit

Je soussigné, Ilya Brodoline, déclare par la présente que le travail présenté dans ce manuscrit est mon propre travail, réalisé sous la direction scientifique de Stéphane Viollet et Julien Serres, dans le respect des principes d'honnêteté, d'intégrité et de responsabilité inhérents à la mission de recherche. Les travaux de recherche et la rédaction de ce manuscrit ont été réalisés dans le respect à la fois de la charte nationale de déontologie des métiers de la recherche et de la charte d'Aix-Marseille Université relative à la lutte contre le plagiat.

Ce travail n'a pas été précédemment soumis en France ou à l'étranger dans une version identique ou similaire à un organisme examinateur.

Fait à Marseille le 23 mai 2023.



Cette œuvre est mise à disposition selon les termes de la [Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Liste de publications et participation aux conférences

Liste des publications réalisées dans le cadre du projet de thèse :

1. (en révision) **I. Brodoline**, S. Viollet and J. R. Serres. *Shaping energy curves of a servomotor-based hexapod robot*. Scientific Reports, 2023.
2. **I. Brodoline**, P. Moretto, S. Viollet, V. Fourcassié, and J. R. Serres. *Test Benches for Comparing the Performance of an Ant's Leg with a Hexapod Robot's Leg*. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, vol. 25, 9, 36-41 (2022). DOI : [10.1109/MIM.2022.9955461](https://doi.org/10.1109/MIM.2022.9955461)
3. **I. Brodoline**, S. Viollet and J. R. Serres. *A methodology to estimate the cost of transport of a hexapod robot based on single leg performance*. ABSTRACTS 47th congress of the Society of Biomechanics In Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, vol. 25 (S1), S41-S42 (2022). DOI : [10.1080/10255842.2022.2116885](https://doi.org/10.1080/10255842.2022.2116885)
4. P. Manoonpong, L. Patanè, X. Xiong, **I. Brodoline**, J. Dupeyroux, S. Viollet, P. Arena and J. R. Serres, *Insect-inspired Robots : Bridging Biological and Artificial Systems*, Review, Sensors, vol. 21, 22, 7609 (2021). DOI : [10.3390/s21227609](https://doi.org/10.3390/s21227609)
5. **I. Brodoline**, S. Viollet and J. R. Serres. *Novel test bench for robotic leg characterization*. ABSTRACTS 46th congress of the Society of Biomechanics In Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, vol. 24 (S1), S267-S268 (2021). DOI : [10.1080/10255842.2021.1978758](https://doi.org/10.1080/10255842.2021.1978758)

Participation aux conférences internationales :

1. **I. Brodoline**, S. Viollet and J. R. Serres. *Full 3D printed hexapod robots with energy efficient joints*. In : Workshop GDR 2088 BIOMIM 1st Annual meeting, Nice, France. Oct. 2020. <https://hal.science/hal-03319418v1>
2. J. Dupeyroux, S. Lapalus, **I. Brodoline**, S. Viollet and J. R. Serres. *Insect-inspired omnidirectional vision for autonomous localization on-board a hexapod robot*, 28th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), 2020 IEEE International Conference on. IEEE, Saint-Raphaël, France. Septembre 2020. <https://hal.science/hal-02873396v1> , <https://youtu.be/nxTZKQaXIe4>

Participation aux conférences nationales :

1. **I. Brodoline**, S. Viollet and J. R. Serres. *A methodology to estimate the cost of transport of a hexapod robot based on single leg performance*. Au 47ème Congrès de la Société de Biomécanique, Monastir, Tunisie. 26-28 Octobre 2022. <https://hal.science/hal-03840277v1>
2. **I. Brodoline**, S. Viollet and J. R. Serres. *Novel test bench for robotic leg characterisation*. Poster au 46ème Congrès de la Société de Biomécanique, Saint-Etienne, France. 25-27 Octobre 2021. <https://hal.science/hal-03418366v1>
3. **I. Brodoline**, Présentation orale à l'Ecole Technologique 2021 – Mécanique et Vivant, ANF RDM, La navigation autonome bio-inspirée appliquée à un robot hexapode. Carqueiranne, France. 19-22 Octobre 2021
4. J. R. Serres, V. Fourcassié, **I. Brodoline**, P. Moretto, S. Viollet. *Projet MiMiC-ANT - Étude de la locomotion lors du transport de charges chez la fourmi : application à la robotique hexapode*. Colloque Ingénierie inspirée par la nature, L'Institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes (INSIS) du CNRS, Juin 2021, en visionconférence, France. <https://hal.uca.fr/TDS-MACS/hal-03285797v1>, <https://youtu.be/oTJDQxqgYgM>
5. **I. Brodoline**, S. Viollet and J. R. Serres. *Full 3D printed hexapod robots with energy efficient joints*. Au : Webinaire aux Journées des Jeunes Chercheurs en Robotique (JJCR), Nov. 2020. <https://hal.science/hal-03319418v1>
6. **I. Brodoline**, S. Viollet and J. R. Serres. *An energy efficient 3D printed leg for bio-inspired hexapod robots*. Poster aux Journée des Jeunes Chercheurs en Robotique (JJCR) & Journées Nationales de la Recherche en Robotique (JNRR), Vittel, France. 14-17 Octobre 2019. <https://hal.science/hal-03326480v1>

Vulgarisation scientifique :

1. Lettre d'AMU N°101, p49, Avril 2023. <https://t.co/Vp1iUobk8H>
2. Nature=Futur! La chaîne Youtube de la bio-inspiration – Le Bio-Robot, 26 Nov. 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=IqrLxtpk7YY>
3. Treize Minutes Jeune Chercheurs Marseille – Le robot et la fourmi – Parc Chanot, Marseille, 16 Déc. 2019. <https://youtu.be/xjR1YZZiJF4>

Résumé

De nos jours, la bio-inspiration est un terme de plus en plus rencontré dans la recherche scientifique et les nouvelles technologies. Formant une méthode de raisonnement à part entière, la bio-inspiration est appliquée aux thématiques très variées, allant de l'architecture à l'informatique. Ce travail de thèse vise à explorer l'une des facettes de la bio-inspiration, qui est la bio-robotique et plus particulièrement, la robotique hexapode. Une multitude de robots hexapodes, inspirés d'insectes, ont été développés au cours des cinquante dernières années. Un phénomène soutenu par la démocratisation de l'impression 3D, qui est de plus en plus utilisée pour la fabrication rapide de prototypes. De plus, de nombreuses études traitant de la locomotion et des techniques de navigation des insectes existent. Elles soulignent les capacités spectaculaires des fourmis, cafards ou phasmes à se déplacer dans des environnements accidentés sur terrain plat et fortement inclinés. Ce sont des capacités désirables pour les robots hexapodes, développées principalement afin de naviguer de manière autonome en milieu extérieur. Cependant, d'un côté, les animaux tels que les fourmis du désert *Cataglyphis fortis* peuvent parcourir plusieurs centaines de mètres et revenir à leur nid. De l'autre, les robots, équipés de capteurs très performants, sont limités à des distances de parcours de seulement une quinzaine de mètres, malgré leur taille imposante. Cette observation conduit donc à l'objectif principal de cette thèse, qui est la construction d'un nouveau robot hexapode, capable de naviguer sur de longues distances (plusieurs centaines de mètres).

Ce projet est divisé en trois parties, chacune guidée par une grande question. La première question, consiste à se demander : qu'est-ce qu'un robot bio-inspiré? Malgré le développement de nombreux robots hexapodes au cours des vingt dernières années, il est important de s'interroger et de redéfinir ce qu'est un robot hexapode bio-inspiré. L'analyse des divers robots à pattes a permis de mettre en évidence des défauts au niveau de la structure mécanique des pattes. Une structure très éloignée de la morphologie animale et limitant les performances des robots.

Cette première question mène naturellement à la seconde problématique, qui consiste à se demander : quels sont les règles de construction d'un robot hexapode bio-inspiré? Un prototype innovant de patte de robot hexapode a donc été construit, équipé de capteurs et actionné. Ce nouveau design de patte, entièrement imprimée en 3D, est inspirée de la morphologie des insectes. Sa conception a deux objectifs : le premier, est de mettre en évidence les questions qui surviennent lors du design de robots bio-inspirés. En effet, de nombreux compromis doivent être faits lors de la construction, il est donc important d'identifier les caractères essentiels de la morphologie animale à mettre en œuvre sur le robot, et ceux dont on peut se passer ; le second objectif du prototype est de trouver une solution technique, inspirée de la nature, alternative aux défauts mécaniques présents chez les hexapodes actuels, permettant

de réaliser des marches de longue distance en milieu extérieur.

La troisième grande question de la thèse consiste à se demander : comment mesurer les performances d'un robot hexapode ? De nombreux indicateurs existent, permettant de qualifier la marche d'un robot, comme par exemple, le coût du transport. Dans le cas des robots bio-inspirés, on aura tendance à vouloir comparer ces performances à celles des animaux. Cependant, plusieurs contraintes, comme les effets d'échelle, sont à respecter. Afin de mesurer les performances des robots et de les mettre en relation avec leurs homologues animales, nous avons construit un banc de test innovant au laboratoire, inspiré des expérimentations réalisées sur les insectes. En plus des observations sur la cinématique et l'énergétique de marche d'un robot hexapode conventionnel, ce banc de test a permis de proposer de nouvelles métriques, et par conséquent, de mieux comprendre les limites de la robotique bio-inspirée actuelle pour discuter des enjeux de la prochaine génération de robots hexapodes.

Mots clés : biomimétisme, bio-robotique, locomotion animale, coût du transport, optimisation énergétique, indicateurs de performance, impression 3D

Abstract

Nowadays, bio-inspiration is a term more and more encountered in scientific research and new technologies. Forming a method of reasoning on its own, bio-inspiration is applied to a wide range of subjects, from architecture to computer science. This thesis aims to explore one of the facets of bio-inspiration, which is bio-robotics, and more specifically, hexapod robotics. A multitude of hexapod robots, inspired by insects, have been developed over the last fifty years. A phenomenon supported by the democratization of 3D printing, which is increasingly used for fast prototyping. In addition, many studies dealing with insect locomotion and navigation techniques exist. They underline the spectacular abilities of ants, cockroaches or stick insects to move in rough environments on flat and steep terrains. These are desirable capabilities for hexapod robots, developed primarily to navigate autonomously in outdoor environments. However, on the one hand, animals such as the desert ants *Cataglyphis fortis* can travel several hundred meters and return to their nest. On the other hand, robots, equipped with very precise sensors, are limited to distances of only fifteen meters, despite their imposing size. This observation leads to the main objective of this thesis, which is the construction of a new hexapod robot, able to navigate over long distances (several hundred meters).

This project is divided into three parts, each guided by a major question. The first question is: what is a bio-inspired robot? Despite the development of many hexapod robots over the last twenty years, it is important to question and redefine what a bio-inspired hexapod robot is. The analysis of various legged robots has allowed to highlight defects in the mechanical structure of the legs. A structure very far from the animal morphology and limiting the performances of the robots.

This first question naturally leads to the second one, which is to ask: what are the rules for building a bio-inspired hexapod robot? An innovative prototype of a hexapod robot leg has been built, equipped with sensors and actuated. This new leg design, entirely 3D printed, is inspired by the morphology of insects. Its design has two objectives: the first is to highlight the issues that arise when designing bio-inspired robots. Indeed, many compromises have to be made during the construction, so it is important to identify the essential characteristics of the animal morphology to be implemented on the robot, and those that can be neglected; the second objective of the prototype is to find a technical solution, inspired by nature, alternative to the mechanical defects present in current hexapods, allowing to carry out long-distance walks in an outdoor environment.

The third major question of the thesis is: how to measure the performance of a hexapod robot? Many indicators exist to qualify the performance of a robot, such as the cost of transportation. In the case of bio-inspired robots, we will tend to compare these performance to those of animals. However, several constraints, such as scale

factors, must be respected. In order to measure the performance of the robots and to compare them with their animal counterparts, we have built an innovative test bench in the laboratory, inspired by the experiments performed on insects. In addition to observations on the walk kinematics and energetics of a conventional hexapod robot, this test bench allowed us to propose new metrics, and consequently, to better understand the limits of the current bio-inspired robotics to discuss the challenges of the next generation hexapod robots.

Keywords: biomimicry, bio-robotics, animal locomotion, cost of transport, energetic optimization, performance indicators, 3D printing

Remerciements

Ce projet de thèse n'aurait pas vu le jour sans le soutien essentiel de l'Agence Innovation Défense, qui a joué un rôle déterminant dans la réalisation et le développement de cette recherche.

La thèse a été financée avec le soutien du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) dans le cadre du projet MiMiC-ANT subventionné par le [PEPS INSIS 2020 "Ingénierie inspirée par la nature"](#).

Naturellement, je remercie Julien et Stéphane de m'avoir encadré au cours de ces cinq années de thèse, tout en me laissant une grande liberté dans le travail réalisé. Le sujet de thèse que vous m'aviez proposé était passionnant, et, comme tous les sujets de thèse, il s'est avéré plus complexe que ce qu'il ne paraissait au départ. De plus, vous avez toujours su valoriser mon travail en invitant des journalistes ou des photographes pour parler de mes avancées, et en montrant ainsi que la science ne consiste pas seulement à rester plongé dans ses calculs, mais aussi à savoir communiquer de ce que l'on fait.

Je remercie l'ensemble des membres du jury d'avoir accepté d'évaluer mon travail de thèse, en apportant votre savoir et votre sens critique au sujet. Plus particulièrement je remercie Dr. Christine Chevallereau du Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes, Prof. Bruno Watier du Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes de Toulouse, Prof. Jean-Marc Linares de l'Institut des Sciences du Mouvement de Marseille, Dr. Anthony Herrel du Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris, et Jean-Daniel Masson, référent de l'Agence Innovation Défense, Paris.

Ce projet de thèse a été réalisé au sein du campus d'Aix-Marseille Université à Luminy, au milieu des Calanques, un cadre de travail rêvé pour la réalisation d'une thèse. Je remercie donc l'ensemble de l'équipe administrative de l'université et particulièrement de l'Institut des Sciences du Mouvement.

Un projet de thèse sur cinq ans n'aurait jamais été possible sans le soutien moral de ma famille, amis et collègues. Plus particulièrement, je tiens à dire un grand merci à :

Julien Dupeyroux, qui a été un vrai guide au cours de ma première année de thèse. De plus, partager des repas avec toi et Xi Lin était toujours agréable, même si elle nous demandait tout le temps de nous dépêcher.

Aimie, avec qui nous avons commencé la thèse le même jour. Nous avons souvent échangé sur nos moments de souffrance ainsi que sur nos petits exploits, afin de nous soutenir mutuellement et de continuer à avancer dans cette aventure qu'est la thèse. Je profite de ce paragraphe pour remercier John Butler pour sa musique motivante.

Évandro, qui a toujours été là pour demander de mes nouvelles, discuter de la vie, de la flemme, et autre ... et bien sûr tu n'étais plus là lorsque 17h00 sonnait. Parler d'Évandro n'est pas possible sans évoquer Anna. Merci pour les nombreuses discussions sur la culture Frusse. Je te remercie particulièrement pour tes blagues, comme éteindre la lumière de mon bureau.

Un grand merci à l'ensemble des membres de l'équipe SBI. Merci à Marc Boyron et Julien Dipéri, pour leur aide technique. Merci aux autres doctorants et post-doctorants : Laurance (n'oublie pas de boire de l'eau), Nicolas, Corentin, Léandre, Christophe, Lucia, Émilie, Charles, Léo, Antoine, Thomas, Jose, Gabriel et tous les autres. Également merci aux stagiaires, particulièrement à Yahia et Océane, toujours de bonne humeur. Je tiens spécialement à saluer Jean-Marc Ingargiola, qui en dehors de son expertise technique représente le moteur actuel de cette équipe de recherche.

En dehors de mes collègues de travail, cette thèse aurait pris dix années de plus pour être terminée sans le soutien de mes amis. Ainsi, pour ne m'avoir jamais abandonné, même si j'avais tendance à disparaître en plongeant trop profondément dans mon travail, je remercie Constantin, Kirill, Florian, Arnaud, Félix, Antonio, Kevin, PY, Qiao Shu, Hugot et bien sûr Mélan. Également un grand merci à Saran et Gabi, Qiufan, Mariela et Leila. Bien que nous soyons tous originaires de différents pays, nous avons su nous rassembler, partager de nombreux repas copieux, discuter de sujets passionnants et ainsi évoluer tous ensemble dans la vie.

Je ne pourrais finir sans mentionner mon professeur de kung-fu de Montpellier, Pierre-Yves Roquefere, qui a toujours su transmettre une philosophie de vie unique et m'a enseigné l'importance de donner un sens à chaque action réalisée dans mon travail.

Ainsi, pour terminer cette session de remerciements, je souhaite exprimer ma gratitude envers ma famille. Merci à mes parents, mon grand frère Alexey, ma grand-mère Olya et mon chat Maroussia, qui ont toujours été là pour moi, m'apportant de l'aide grâce à leur expérience et leur philosophie. Enfin, un énorme merci à ma femme Yessenia la hermosa, sans qui je n'aurai tout simplement jamais fini ce long périple, qu'est la thèse. Tu as toujours pris soin de moi, même dans les moments les plus difficiles.

Table des matières

Affidavit	2
Liste de publications et participation aux conférences	3
Résumé	5
Abstract	7
Remerciements	9
Table des matières	11
Table des figures	14
Liste des tableaux	16
Liste des acronymes	17
1. Les particularités de la mécanique hexapodes	21
1.1. Bio-mimétisme et bio-inspiration : étude de l'hexapode	22
1.1.1. La bio-robotique au service du comportement animal	22
1.1.2. Quelques exemples d'application	23
1.2. Définition des performances d'un robot hexapode	26
1.2.1. Description de la marche de l'insecte	26
1.2.2. Implémentation de la marche à bord du robot	30
1.2.3. Les indicateurs de performances de la locomotion hexapode	34
1.3. Les compromis du design d'un robot hexapode	39
1.3.1. La structure générale	39
1.3.2. Le nombre de degrés de liberté	44
1.3.3. Le choix des actionneurs	46
1.4. Conclusion	49
2. Design et fabrication d'une nouvelle patte robotique bio-inspirée	51
2.1. Objectifs et contraintes du développement	52
2.2. La conception mécanique de la patte	54
2.2.1. L'échelle du robot	56
2.2.2. Le choix des matériaux	58
2.2.3. Le système moteur	68
2.2.4. Les organes sensoriels	70
2.3. Modélisation et commande de la patte	73
2.3.1. Modélisation d'un actionneur	74

2.3.2. Modélisation d'une patte d'hexapode	81
2.3.3. Génération de trajectoire	83
2.4. Conclusion	84
3. Évaluation des performances d'un robot hexapode	87
3.1. La mesure des performances d'un hexapode	89
3.1.1. Identification des critères de marche	89
3.1.2. Les techniques de mesure des performances	92
3.2. Le banc de test <i>MiMiC-Ant</i>	94
3.2.1. Structure du banc	95
3.2.2. Les scénarios de mesure	96
3.2.3. Calcul de la puissance consommée	98
3.2.4. Expérimentation sur le robot complet	100
3.3. Évaluation des performances	101
3.3.1. Analyse des caractéristiques générales	101
3.3.2. Analyse du coût du transport	105
3.4. Conclusion	115
Conclusion	117
Bibliographie	120
Index	147
ANNEXES	149
A. Influence du nombre de degrés de liberté	150
B. Vues de la patte bio-inspirée <i>Pohod15Leg</i>	151
C. Influence de l'angle de la patte	152
D. Données techniques des matériaux 3D	154
E. Étude de la déformation d'une structure à exosquelette	170
F. Budget de construction de la patte <i>Pohod15Leg</i>	171
G. Documentation technique du moteur RK-370CC	172
H. Aspect irréversible d'une liaison vis sans fin - écrou	173
I. Dimensionnement des ressorts du capteur de force	174
J. Calcul des équations décrivant l'actionneur irréversible	177
J.1. Calcul du couple moteur	177
J.2. Fermeture géométrique	181
K. Circuit électronique de commande des moteurs	182
L. Mesure des caractéristiques internes du moteur RK-370CC	185
M. Réponse temporelle du correcteur à avance de phase	186
N. Programme d'un correcteur sous forme canonique	188
O. Vues additionnelles du banc de test <i>MiMiC-Ant</i>	189
P. Diagramme de classes de <i>MiMiC-Ant</i>	190
Q. Exemple de calcul de la fonction $L(t)$	191
R. Résultat des mesures sur la patte <i>AXLeg</i> et <i>Pohod15Leg</i>	192
S. Calcul de la force de réaction du support	193

T.	Algorigramme de calcul des puissances du robot hexapode	195
U.	Circuit électronique d'amplification des capteurs de force du banc . .	196
V.	Calibration du capteur de force	199

Table des figures

1. Quelques véhicules autonomes	18
1.1. Exemple de robots hexapodes	25
1.2. Les patrons de marche classiques chez l'hexapode	28
1.3. Les motifs des patrons de marche classiques de l'hexapode	29
1.4. Anatomie de la fourmi et son modèle de patte	31
1.5. Différents types de systèmes de contrôle des robots hexapodes	32
1.6. Résistance spécifique minimale de quelques robots à pattes	37
1.7. Coût du transport minimale de quelques espèces	38
1.8. Structure mécanique d'une patte à trois degrés de liberté	40
1.9. Photographie d'une fourmi <i>Messor Barbarus</i>	41
2.1. Pièces détachées de la patte	52
2.2. Vues CAO de la patte bio-inspirée <i>Pohod15Leg</i>	55
2.3. Étapes de fabrication d'un robot hexapode	56
2.4. Différentes armatures de pattes de robot	59
2.5. Comparaison du profil énergétique d'un hexapode sous différentes in- clinaisons de pattes entre le thorax et la coxa	60
2.6. Courbe typique d'un essai de traction	61
2.7. Courbes d'essai de traction des matériaux 3D DFF usuels	67
2.8. Diagramme des étapes de sélection d'un matériau de fabrication	68
2.9. Logiciel de dimensionnement de l'actionneur irréversible	69
2.10. Schéma des organes sensoriels chez les insectes et le robot <i>Pohod15</i>	72
2.11. Schéma cinématique d'un actionneur irréversible	74
2.12. Couple, vitesse et position d'un actionneur irréversible	76
2.13. Schéma bloc du système de commande de l'actionneur	77
2.14. Comparaison des modèles numériques de l'actionneur	78
2.15. Diagramme de Bode de l'actionneur	79
2.16. Réponse temporelle du correcteur avance de phase	80
2.17. Forme canonique d'un filtre IIR de second ordre	81
2.18. Modèle géométrique de la patte <i>Pohod15Leg</i>	82
2.19. Trajectoire définie pour la patte <i>Pohod15Leg</i>	84
2.20. Photographie de la patte bio-inspirée <i>Pohod15Leg</i>	85
3.1. Photographie du robot <i>AntBot</i>	88
3.2. Diagramme des indicateurs de performance d'un hexapode	89
3.3. Exemple de bancs de test utilisés pour l'étude des robots à pattes et des insectes	93
3.4. Structure du banc de test <i>MiMiC-Ant</i>	94

3.5. Scénarios de mesure des indicateurs de performance	96
3.6. Puissance électrique instantanée consommée par la patte <i>AXLeg</i>	99
3.7. Puissance consommée par <i>AntBot</i> [10] en fonction des paramètres de marche	101
3.8. Comparaison des trajectoires de pattes d'une fourmi et d'un robot . . .	102
3.9. Simulation d'une patte de robot	107
3.10. Graphique à quatre quadrants, présentant les indicateurs énergétiques	109
3.11. Graphique à quatre quadrants, présentant les indicateurs énergétiques optimisés et les défauts du robot hexapode	112

Liste des tableaux

1.1. Tableau des robots hexapodes les plus remarquables	23
1.2. Tableau des relations allométriques	43
2.1. Cahier des charges du robot hexapode à concevoir	53
2.2. Table des relations d'échelle entre la patte d'une fourmi et de la patte <i>Pohod15Leg</i>	57
2.3. Amplitudes des articulations d'une patte de fourmi	59
2.4. Table des points définissant la trajectoire d'une patte	83
3.1. Tableau de comparaison des performances d'un hexapode équipé de pattes <i>AXLeg₁</i> et une fourmi <i>Messor Barbarus</i>	101
3.2. Tableau de comparaison des performances d'un hexapode équipé de pattes <i>AXLeg₂</i> et un équipé de pattes <i>Pohod15Leg</i>	104

Liste des acronymes

BLDC

Moteur à courant continu sans bague ni balais (brushless direct current). [47](#)

CoT

Coût du transport (cost of transport). [36](#), [38](#), [39](#), [56](#), [57](#), [106](#)

CPG

Circuit locomoteur spinal (central pattern generator). [30](#)

CTr

Coxa-trochanter. [30](#)

DCB

Moteurs à courant continu à collecteur (direct current brushed). [47](#)

DDL

Degré de liberté. [39](#), [40](#), [44](#), [45](#)

DET

Degré d'élévation de température. [91](#), [97](#), [104](#), [105](#)

DFF

Dépôt de fil fondu. [63–66](#)

FSL

Frittage sélectif par laser. [65](#)

FTi

Fémur-tibia. [30](#), [58](#)

PFO

Point de fonctionnement optimal. [38](#), [112–115](#)

SLA

Stéréolithographie. [64](#)

ThC

Thorax-coxa. [30](#)

TrF

Trochanter-fémur. [58](#)

ZMP

Point de moment nul (zero-moment point). [35](#)

Introduction

Le développement de nouveaux véhicules autonomes, est de nos jours l'une des thématiques influant sur notre vie quotidienne. Les applications de tels engins sont nombreuses : allant d'une simple livraison de repas à domicile, d'un dépôt ou gestion de colis dans les entrepôts, du transport de passagers, jusqu'à des applications plus éloignées de notre vie commune, comme l'archéologie et le soutiens dans les opérations militaires tel que le déminage. L'automatisation de ses véhicules vient pallier la difficulté de leur commande par des humains, qui se complexifie avec le développement de machines intégrant de plus en plus de fonctions et s'adaptant à divers environnement, nécessitant ainsi des opérateurs expérimentés dont les coûts salariaux sont de plus en plus onéreux.

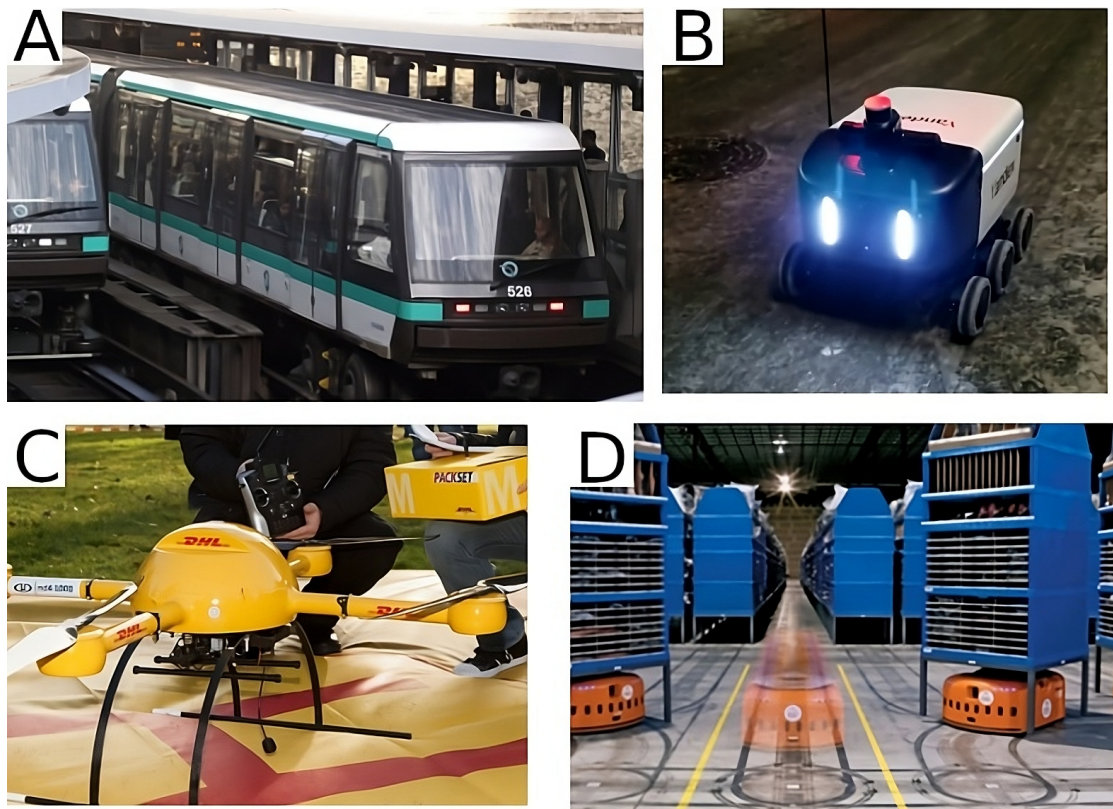


FIGURE 1. – Exemple de véhicules autonomes. (A) Ligne 1 du métro de Paris, sans conducteur. (B) Robot Yandex, utilisé dans la livraison autonome de repas aux particuliers en Russie [1]. (C) Drone de livraison de colis DHL en Chine [2]. (D) Robots de gestion des entrepôts Amazon [3].

On voit ainsi apparaître de plus en plus de robots mobiles, entièrement autonomes. Ce sont des machines complexes, capables de réaliser avec précision les tâches initialement attribuées aux véhicules pilotés. Leurs actionneurs électriques, pneumatiques, ou hydrauliques permettent d'effectuer des actions dans des gammes de forces très variées. Cependant, il est important de bien différencier les *automates* des *robots*. Les automates sont des machines capables de répéter des mouvements programmés d'une manière autonome [4], alors que les robots, sont des automates, ayant en plus la capacité de s'adapter à l'environnement grâce aux capteurs dont ils sont équipés [5]. Bien que le transport de personnes soit une tâche pour l'instant réservée aux automates pour des raisons de sécurité, comme les lignes de métro automatisées (Fig. 1A), les robots présentés sur la Fig. 1 montrent, que l'une des tâches principales des robots mobiles est de naviguer dans un espace inconnu, sujet à de nombreuses perturbations extérieures imprévisibles. Par exemple, le robot de *Yandex* Fig. 1B est utilisé pour la livraison de plats préparés. Son trajet peut être perturbé par le changement de relief du terrain, des zones glissantes, ou des personnes qui coupent le passage du robot au cours de son déplacement. Les robots à pattes sont les mieux adaptées à ce type de tâches, puisqu'ils possèdent une structure mécanique polyvalente pouvant se déplacer sur un terrain accidenté, sauter ou escalader tout type d'obstacles. Ce sont des capacités surpassant les robots à roues, qui nécessitent une surface plane pour se déplacer. Depuis la construction des premiers robots à pattes dans les années 1960 [6], de nombreux algorithmes de navigation ont été mis au point pour réaliser le trajet le plus rapide et atteindre l'objectif avec la plus petite marge d'erreur [7]. Ces algorithmes intègrent divers principes, tel que l'évitement d'obstacles, le calcul du cap, ou la mémorisation du chemin suivi. Cependant, la qualité de la tâche réalisée par un robot, ne dépend pas uniquement du programme implémenté sur celui-ci. La structure mécanique elle-même joue un rôle primordial. Contrairement aux véhicules volants (Fig. 1C), dont l'environnement de travail est faiblement perturbé, un robot à pattes conçu pour se mouvoir rapidement sur un terrain plat, sera en très grande difficulté pour garder son équilibre sur un terrain accidenté. De même qu'un robot conçu pour une locomotion rapide, ne sera pas adapté au transport de charge (Fig. 1D).

Dans le cadre de ce projet de thèse, nous allons nous intéresser à la robotique bio-inspirée. Les algorithmes de navigation, et la locomotion des animaux ayant déjà subi une optimisation naturelle par l'évolution [8]. Les recherches sur les robots inspirés des animaux ont démontré les résultats les plus prometteurs combinés à des solutions minimalistes, ce qui accroît l'intérêt d'étudier les animaux pour confectionner de tels robots [9].

Ce travail a pour but de comprendre les étapes qui se cachent derrière la conception d'un nouveau robot hexapode bio-inspiré. Un robot, dont le but serait de naviguer dans un environnement extérieur, accidenté, et soumis à des perturbations extérieures. Ainsi, plusieurs questions émergent de cet objectif : quels sont les diverses plate-formes existantes dans le domaine de la robotique mobile bio-inspirée ? Comment définir et estimer les performances d'un robot à pattes ? Comment peut-on les améliorer ? Les robots hexapodes actuels étant limités par des distances de parcours d'une quinzaine de mètres [10], peut-on franchir ce cap et atteindre des trajets de plusieurs centaines de mètres ?

Pour répondre à ces questions pluridisciplinaires, ce travail de thèse a été organisé en trois parties. Le chapitre 1 porte sur l'étude des robots bio-inspirés existants, leurs designs mécatroniques, ainsi que leurs performances. Le chapitre 2 présente le développement de la nouvelle patte de robot bio-mimétique *Pohod15Leg*, permettant de mettre en évidence les questions qui surviennent dans le cadre de la construction d'un hexapode bio-inspiré. Le chapitre 3 décrit le banc de test *MiMicAnt-bench*, construit afin d'estimer les performances d'un robot hexapode à partir de mesures réalisées sur une unique patte.

1. Les particularités de la mécanique hexapodes

Sommaire

1.1. Bio-mimétisme et bio-inspiration : étude de l'hexapode	22
1.1.1. La bio-robotique au service du comportement animal	22
1.1.2. Quelques exemples d'application	23
1.2. Définition des performances d'un robot hexapode	26
1.2.1. Description de la marche de l'insecte	26
1.2.2. Implémentation de la marche à bord du robot	30
1.2.3. Les indicateurs de performances de la locomotion hexapode	34
1.3. Les compromis du design d'un robot hexapode	39
1.3.1. La structure générale	39
1.3.2. Le nombre de degrés de liberté	44
1.3.3. Le choix des actionneurs	46
1.4. Conclusion	49

Bio-mimétisme et la Bio-inspiration ?

Avant d'aborder le thème de la bio-robotique, il est nécessaire de définir les notions de bio-inspiration et bio-mimétisme [11]. La bio-inspiration, est un terme général, représentant l'action d'observer des phénomènes naturels, chez les animaux ou même les plantes. Ces observations mettent en évidence, quel que soit l'échelle, des mécanismes ou réflexes, qui seront, par la suite, utilisés pour créer de nouvelles technologies ou d'améliorer celles qui existent déjà [12]. Cette méthode a des applications dans un grand nombre de domaines. L'architecture a, par exemple, été influencée par la structure des arbres, comme les palmiers, qui ont inspiré les colonnes des temples égyptiens, ou encore les études sur la nage des animaux marins tels que le thon, les requins, ont permis de développer des profils aérodynamiques de dirigeables, plus économes en énergie et plus rapides [12]. La bio-inspiration est également un concept important pour l'économie, car le développement de nouveaux produits et services durables influence le marché de l'emploi [13]. Dans le cas de la bio-robotique, les mécanismes découverts sont implémentés directement sur le robot. Le robot en lui-même, n'a pas besoin de représenter l'animal dont on s'inspire, et peut même être très différent comme un robot à roues, puisqu'on se limite seulement à reproduire une fonction précise de l'être vivant.

1. Les particularités de la mécanique hexapodes
- 1.1. Bio-mimétisme et bio-inspiration : étude de l'hexapode

Le bio-mimétisme est un terme plus spécifique, qui consiste à décrire l'action de copier, avec la plus grande ressemblance possible, un élément de l'être vivant étudié. On a donc un sous-système du robot, voire le robot entier, qui reprend la structure ou le comportement exacte de l'animal. On peut prendre l'exemple de l'œil de la mouche, dont la structure composée a été reproduite sur différents robots [14, 15, 16] afin de détecter des mouvements. On peut donc dire que le robot dispose d'un capteur bio-mimétique.

De manière générale, le bio-mimétisme est inclus dans la bio-inspiration. Un robot peut avoir un capteur bio-mimétique, mais pas ses mécanismes, ce qui motive à utiliser le terme de robot bio-inspiré, plutôt que de robot bio-mimétique.

Dans un premier temps, nous allons détailler dans ce chapitre quels sont les divers robots actuels considérés comme bio-inspirés et leurs applications. Dans un second temps, afin de comprendre les enjeux de la robotique actuelle, nous allons voir comment se définit la marche d'un hexapode et quels en sont les paramètres influençant ses performances.

1.1. Bio-mimétisme et bio-inspiration : étude de l'hexapode

1.1.1. La bio-robotique au service du comportement animal

La bio-robotique répond à un double enjeu. Le premier consiste à observer des comportements, mécanismes ou réflexes chez un animal pour ensuite, les mettre en œuvre sur un agent artificiel, tel qu'un robot. Dans ce cas de figure, où l'animal est à l'origine d'une avancée technologique, qui est le plus courant [9], on parle de robotique bio-inspirée. Les limitations technologiques actuelles poussent alors les industriels à investir dans la recherche de solutions révolutionnaires efficaces, simples et fiables dans la nature [13]. Le second cas de figure est plus rare : la bio-robotique permet aussi de mettre en évidence des phénomènes difficilement observable sur l'animal ou à vérifier des hypothèses biologiquement plausibles. Ce cas de figure nécessite le développement d'un robot plus sophistiqué, avec un plus haut degré de bio-mimétisme, puisqu'on doit négliger le plus infime nombre de paramètres pouvant influencer le résultat de l'expérience. On peut prendre l'exemple du *RoboBee*, un robot capable de reproduire les divers signaux échangés entre les individus lors de la danse d'une abeilles *Apis mellifera carnica* [17, 18]. *RoboBee* a été développé afin d'imiter les principes de communications entre les individus d'une ruche, ainsi que de mettre en application les théories biologiquement plausibles, comme la procédure d'acceptation d'un nouveau membre au sein de la ruche. *RoboBee* fut alors équipé de nombreux organes artificiels mimant les signaux de communication des abeilles, tels que la variation de la température du corps, le battement des ailes ou les déplacements suivant un chemin type pour accomplir sa mission et se faire accepter par la ruche. Si l'un de ces signaux aurait été négligé, les hypothèses sur le comportement de la danse de l'abeille n'auraient pas pu alors être vérifiées ou réfutées.

1. Les particularités de la mécanique hexapodes
 • 1.1. Bio-mimétisme et bio-inspiration : étude de l'hexapode

Dans cet exemple, plusieurs questions se posent alors concernant le développement d'un robot bio-inspiré, quel que soit l'animal choisi :

- Quelles sont les limites du bio-mimétisme ?
- Peut-on reproduire une structure présente sur un animal, qui ne fait que quelques millimètres, sur un robot, dont la taille, limitée par les progrès techniques, est comprise entre quelques centimètres à quelques mètres [9] ?

1.1.2. Quelques exemples d'application

Chaque année de nouveaux robots hexapodes bio-inspirés sont construits dans le cadre de divers domaines de recherche, tels que la navigation, le comportement social ou encore la locomotion. En restant dans ces trois thématiques, les principaux robots hexapodes développés au cours de la dernière décennie sont présentés en Tab. 1.1.

TABLEAU 1.1. – Liste des robots hexapode les plus remarquables, développés au cours des dix dernières années (2011-2021) [9]. La taille (en mètres), correspond à la plus grande dimension du robot. DDL = degré de liberté du robot. Les données manquantes sont indiquées par "-". Adapté de MANOONPONG, PATANÈ, XIONG et al. [9].

Année	Ref.	Nom	Taille [m]	Masse [kg]	DDL
2021	[19]	HAnTR	0,50	2,9	24
2020	[20]	SILVER 2	0,7	22	18
2020	[21]	HHR	0,80	250	18
2019	[22, 23]	MORF	0,60	4,2	18
2019	[24]	Daisy	1,10	21	18
2019	[25, 26]	Drosophibot	0,80	1	18
2019	[10, 27]	AntBot	0,45	2,3	18
2019	[28]	Corin	0,6	4,2	18
2018	[29]	AmphiHex-II	0,51	14	6
2018	[30]	CRABOT	0,70	2,5	24
2017	[31, 32]	PhantomX AX	0,50	2,6	18
2017	[31, 27]	Hexabot	0,36	0,675	18
2016	[33]	HexaTerra	2	500	18
2016	[34]	Weaver	0,35	7	30
2016	[35]	MX Phoenix	0,80	4,8	18
2015	[36]	Phoenix 3DOF	0,37	1,3	18
2015	[37]	HexaBull-1	0,53	3,4	18

1. Les particularités de la mécanique hexapodes
 • 1.1. Bio-mimétisme et bio-inspiration : étude de l'hexapode

2015	[38, 39]	MantisBot	0,74	6,1	28
2015	[40]	Snake Monster	0,70	4,6	18
2015	[41]	BionicANT	0,15	0,105	18
2015	[42]	X2-VelociRoACH	0,10	0,054	6
2014	[43, 44, 45]	HECTOR	0,95	13	18
2014	[46, 47]	Messor II	0,30	2,5	18
2014	[48, 49]	LAURON V	0,90	42	24
2014	[50]	CREX	1	27	24
2013	[51]	CR200	2,5	600	36
2012	[52]	Octavio	1	10,8	18
2012	[53]	HITCR-II	0,5	3,5	18
2011	[54]	-	0,46	3	18
2011	[55, 56]	EduBot	0,36	3,3	6

Par leur polyvalence, les plate-formes hexapodes offrent des possibilités d'application très variées. Leurs nombreuses pattes peuvent tout autant servir à manipuler des objets, qu'à naviguer dans des milieux inconnus sur des terrain accidentés ou confinés. Par rapport aux quadrupèdes, à motorisation égale, les hexapodes peuvent transporter des charges plus lourdes, puisqu'ils ont une plus grande force de propulsion. De même qu'un sportif, qui trouvera plus facile de réaliser un mouvement de squat avec les deux jambes plutôt qu'avec une seule. En outre, les pattes additionnelles garantissent le fonctionnement du robot en cas de panne de certains moteurs [57]. Cependant, en dehors de Hexabot, AntBot et BionicANT, les robots de la Tab. 1.1 visent à faire uniquement des études de locomotion. Plus particulièrement, sont étudiées les façons d'optimiser la marche, d'avoir la meilleure trajectoire des pattes et de mieux interagir avec les obstacles de l'environnement. Ceci souligne le fait, que la robotique hexapode actuelle n'est pas aussi polyvalente qu'elle le sous-entend. De nombreux défis technologiques restent encore à surmonter, pour voir apparaître des robots à pattes marcher côte à côte avec l'humain. Pour l'instant, les tâches de navigation et d'exploration sont réservés aux véhicules volants, plus rapides et plus faciles à contrôler [58].

Parmi les derniers robots hexapodes, plusieurs catégories se distinguent, définies par le type d'actionneur utilisé. La catégorie la plus courante correspond aux robots ayant une masse de 500 g à 10 kg. L'ensemble de ces robots est actionné par des servomoteurs électriques de faible puissance (autour de 30 W). Leur utilisation fréquente est liée au fait qu'ils ont, tout d'abord, un coût de fabrication faible de 500 à 3 k€, défini par la gamme du servomoteur choisie. De plus, ils sont très simples à commander, car généralement il existe de nombreuses cartes de développement préfabriquées intégrant le système de contrôle. La catégorie des robots ayant une masse autour de 20 kg, correspond à des modèles possédant une motorisation plus avancée, plus de puissance, plus de solidité, mais aussi un prix vingt fois plus élevé.

1. Les particularités de la mécanique hexapodes

• 1.1. Bio-mimétisme et bio-inspiration : étude de l'hexapode

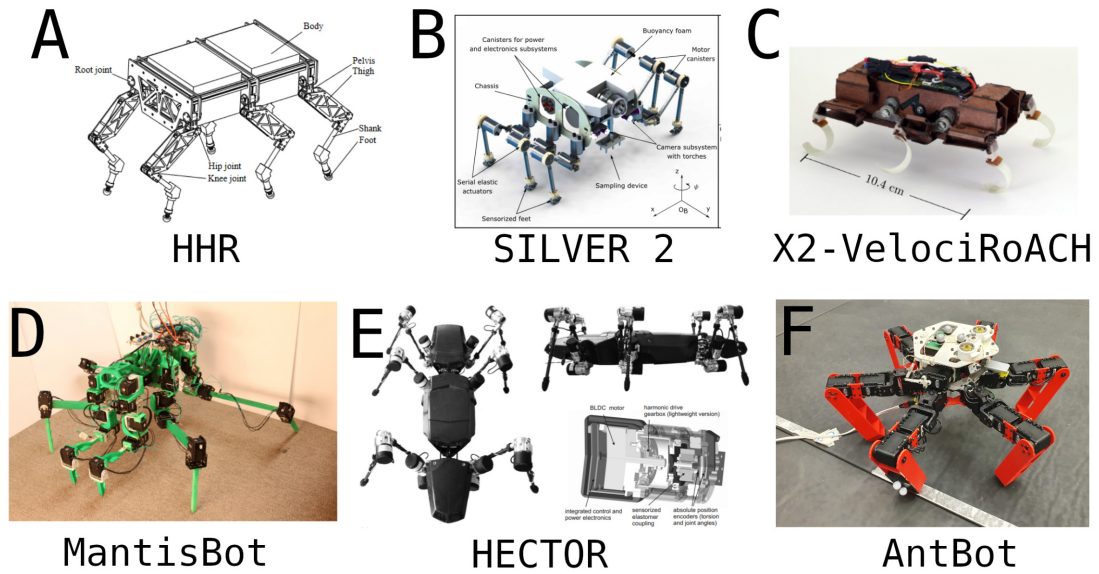


FIGURE 1.1. – Exemple de robots hexapodes de diverses catégories, extraits de la Tab. 1.1. (A) Robot HHR [21], actionné par des vérins hydrauliques. (B) SILVER 2 [20], robot d’exploration sous-marin. (C) X2-VelociRoACH [42], hexapode mimant la course des cafards. Sa fréquence de marche de 45 Hz dépassent les performances animales. (D) MantisBot [38], robot utilisé pour étudier le contrôle neuronal de la marche chez les phasmes. (E) Robot HECTOR [43] capable de se mouvoir dans un environnement complexe grâce aux algorithmes bio-inspirés. (F) AntBot [10], hexapode navigant en autonomie, utilisant des capteurs inspirés des organes sensoriels des fourmis du désert *Cataglyphis Fortis*.

Ce dernier point rend difficile l’utilisation de ce type de robot pour des applications académiques, alors qu’ils ont l’avantage de pouvoir transporter des équipements de mesure très lourds. Plus rare, les robots d’une masse supérieure à 100 kg sont ceux actionnés par un système hydraulique ou pneumatique (exemple Fig. 1.1A). Quant à la catégorie des robots ayant une masse inférieure à 100 g , elle est formée par les robots aux designs particuliers souvent possédant moins de degrés de liberté que les hexapodes conventionnels ou disposant d’actionneurs à effet piézoélectrique comme BionicANT. En outre, une autre catégorie particulière d’hexapodes est à prendre en compte. Les robots tels que AmphiHex-II, X2-VelociRoACH (Fig. 1.1C) ou encore EduBot, qui ne possèdent pas des pattes conventionnelles, mais ce qu’on appelle des *Whegs* (mi-roue mi-patte) [59, 60]. Ce sont des pattes souples, avec un profil circulaire, permettant de déplacer le robot comme s’ils avaient des roues, imitant ainsi la course de certains insectes comme les cafards [42]. Dans ce cas-là, il n’y a aucun contrôle de la trajectoire des pattes, le but recherché est d’avoir une meilleure accroche au terrain par rapport aux roues tout en gardant une vitesse élevée. Ces hexapodes peuvent donc passer par-dessus des rochers, la boue et autres terrains accidentés à très grande allure. En tenant compte des spécifications des robots hexapodes les plus récents, la suite de ce manuscrit va uniquement traiter le cas des robots hexapodes les plus

1. Les particularités de la mécanique hexapodes
- 1.2. Définition des performances d'un robot hexapode

courants. C'est-à-dire, des robots construits à partir d'un assemblage de servomoteurs identiques, possédant 18 degrés de liberté, comme le robot AntBot (Fig. 1.1F). Ce design est actuellement le plus répandu dans le monde académique en raison des nombreux avantages évoqués précédemment. Il reflète donc l'image que l'on associe aux robot hexapodes.

Si maintenant on s'intéresse aux aspects bio-inspirés des robots de la Tab. 1.1, à première vue on peut dire que ce sont tous des robots inspirés d'insectes, puisqu'ils ont six pattes. Toutefois, dans la majorité des cas, l'esthétique et le nom sont les seules caractéristiques communes qu'ils partagent avec les animaux. À part *Drosophibot* et *MantisBot*, aucun des robots hexapodes ne respecte la morphologie de l'animal imité, aussi bien par la dimension des segments composant le corps, que par le nombre de degrés de liberté des pattes et du corps. En réalité, les robots hexapodes ne doivent pas être considérés comme étant un insecte en entier. Ces plate-formes mobiles sont plutôt représentatives uniquement du thorax de l'animal, formant un seul bloc auquel sont attachés les pattes. La tête et l'abdomen sont présents que dans quelques rares cas, comme le robot *HECTOR* (Fig. 1.1E). De plus, la bio-inspiration ne concerne généralement pas la morphologie du robot mais l'algorithme implémenté ou un ensemble de capteurs présents sur le robot bio-inspiré. Ainsi, ces hexapodes permettent soit de vérifier des hypothèses du domaine de la neurobiologie, soit de comprendre le rôle des organes sensoriels de l'animal. Dans le premier cas, on peut prendre l'exemple de *MantisBot* [61] (Fig. 1.1D), un robot dont le contrôle neuronal gère la synchronisation entre les membres des pattes et engendre une marche directionnelle semblable aux insectes. Dans le second cas, on peut prendre l'exemple de *HECTOR* [45] (Fig. 1.1E) utilisant un algorithme de vision bio-inspiré, lui permettant ainsi de naviguer tout en évitant des obstacles.

1.2. Définition des performances d'un robot hexapode

1.2.1. Description de la marche de l'insecte

Afin de pouvoir estimer les performances d'un robot et de les comparer à un autre robot ou un animal, il faut comprendre comment un hexapode se déplace. La marche étant inspirée de l'animal, nous allons nous focaliser sur les observations biologiques menées sur les insectes (cafards, phasmes, fourmis) - modèles pour la locomotion. Même si, selon les travaux, les espèces étudiées sont différentes, les phénomènes observés peuvent être généralisés à l'ensemble des hexapodes [9].

La marche d'un hexapode consiste à faire des mouvements répétitifs avec chacune des six pattes. Le mouvement d'une patte est divisé en cycles, auquel est attribuée une période T [62] après laquelle la patte va reproduire le même mouvement. À son tour, la période peut être divisée en deux phases [63]. Une première phase d'appui (*stance phase*), qu'on peut aussi appeler phase de propulsion, qui correspond au moment où la patte est en contact avec le sol. À ce moment, les muscles propulsent le corps du robot vers la direction de la marche et supportent la charge transportée ainsi que le

1. Les particularités de la mécanique hexapodes
 • 1.2. Définition des performances d'un robot hexapode

poids du corps. La seconde phase (*swing phase*), est une phase de balancement de la patte. Dans cette phase aérienne, la patte est soulevée afin de la ramener au point de départ à partir duquel une nouvelle propulsion du corps pourra être initiée.

En considérant la longueur d'un pas L , on peut définir plusieurs relations définissant d'une manière générale la marche de l'hexapode (Eq. 1.1-1.4).

Période du cycle $T = T_{swing} + T_{stance}$ (1.1)

Vitesse de marche $v = \frac{2 \cdot L}{T}$ (1.2)

Fréquence de marche $f = \frac{1}{T}$ (1.3)

Rapport cyclique $\beta = \frac{T_{stance}}{T}$ (1.4)

En plus de ces paramètres, un patron de marche (*gait* en anglais), doit être choisis afin de pouvoir définir le type de marche, c'est-à-dire, comment les six pattes sont synchronisées entre elles. Un patron de marche est caractérisé par une valeur appelée la phase relative θ_i (Eq. 1.5) [64, 62], définie pour chaque patte i . Cette phase correspond au décalage temporel au bout duquel la patte i va commencer son mouvement. La référence est choisie arbitrairement. On peut, par exemple, prendre la patte avant gauche comme ayant une phase nulle $\theta_1 = 0$, Fig. 1.2.

Phase relative $\theta_i = \frac{\Delta t}{T} \in [0, 1]$ (1.5)

La valeur de θ_i est comprise entre 0 et 1, car elle est définie relativement à la durée totale de la période de marche. Parfois, cette valeur est donnée en degrés, comme fraction de 360° . Un exemple de patrons de marche fréquemment rencontrés dans la littérature est présenté Fig. 1.2B-D.

Afin de définir un patron de locomotion dans sa globalité, il est nécessaire d'associer l'ensemble des phases à la valeur d'un rapport cyclique. La figure 1.3 représente divers motifs des patrons de marche associés à une valeur de rapport cyclique β égale à $1/2$ et $2/3$. Plus le rapport cyclique augmente, plus la durée d'appui est longue, comme représenté par les zones sombres sur la figure 1.3. Inversement, si le rapport cyclique diminue, c'est la durée des pattes en l'air qui augmentent, comme représenté par les zones claires sur la figure 1.3. Il est important de noter, que très fréquemment, lorsqu'on parle de patron de marche, on sous-entend la valeur du rapport cyclique [65, 66] en fonction des patrons classiques de marche. Dans le cas de la marche en tripode

1. Les particularités de la mécanique hexapodes
• 1.2. Définition des performances d'un robot hexapode

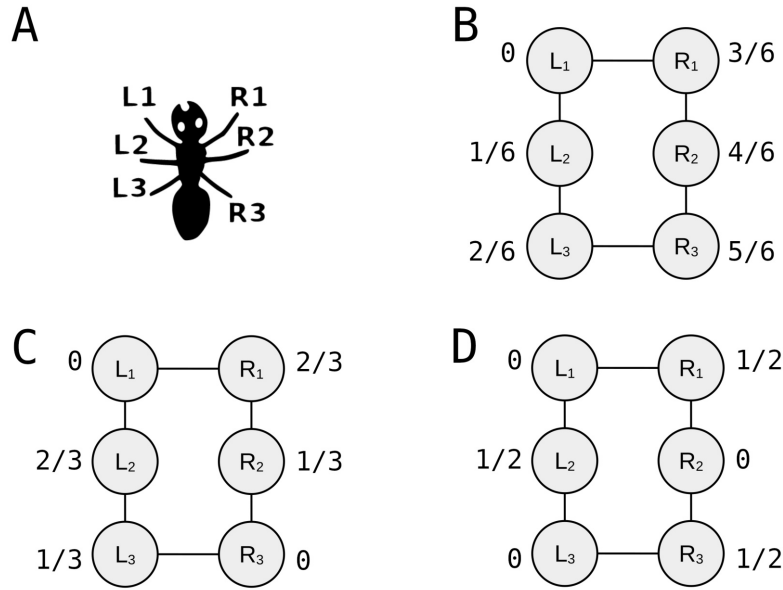


FIGURE 1.2. – Patrons de marche classiques chez l'hexapode. (A) Désignation des pattes. (B) Rythme métachronal ou *wave gait*. (C) Marche tétrapode, marche lente des phasmes [64]. (D) Marche tripode.

alterné, on sous-entend la valeur de β égale à $1/2$, qui est la valeur la plus courante. De la même façon, lorsqu'on parle du rythme métachronal, on utilise dans la majorité des cas un β égale à $2/3$, qui permet d'observer dans cette condition le motif caractéristique en vague.

Comme le définit l'équation 1.4, le rapport cyclique reflète la proportion du temps d'appui au sol d'une patte. Plus cette valeur est grande, plus les phases d'appui seront longues. Il est important de noter, que dans le cas où le rapport cyclique est faible, on peut voir apparaître des phases aériennes. Si, par exemple, on prend le cas de la marche en tripode (Fig. 1.2D), avec un rapport cyclique β inférieur à $0,5$, on aura à certains instants aucune patte en contact avec le sol. Pour certains êtres vivants, comme les humains, cette particularité permet de distinguer la marche de la course [67]. Dans le cas des robots hexapodes, leurs masse imposante et l'absence d'élasticité dans les pattes n'autorisent pas d'avoir des phases aériennes. Pour cette raison la Fig. 1.2 indique les valeurs limites de β pour un robot hexapode. La marche des hexapodes, caractérisée par un contact permanent des pattes avec le sol est en fait l'atout principal de ce type de morphologie. Plus particulièrement, les insectes, gardent toujours au moins trois points de contact avec le sol. Ce minimum de trois point de contacts, forme un *polygone de support*. Tant que leur centre de masse reste à l'intérieur, leur stabilité est garantie à tout instant [68, 33, 69]. C'est ce qu'on appelle la stabilité statique. Les quadrupèdes ou les bipèdes n'ont pas un corps adapté à ce type de comportement, ils sont donc constamment en équilibre dynamique [6]. De la même façon, le nombre de pattes en contact avec le sol influe sur l'oscillation du corps. Plus il y a de pattes en contact avec le sol, moins l'animal ou le robot va osciller verticalement [70]. Dans

1. Les particularités de la mécanique hexapodes

- 1.2. Définition des performances d'un robot hexapode

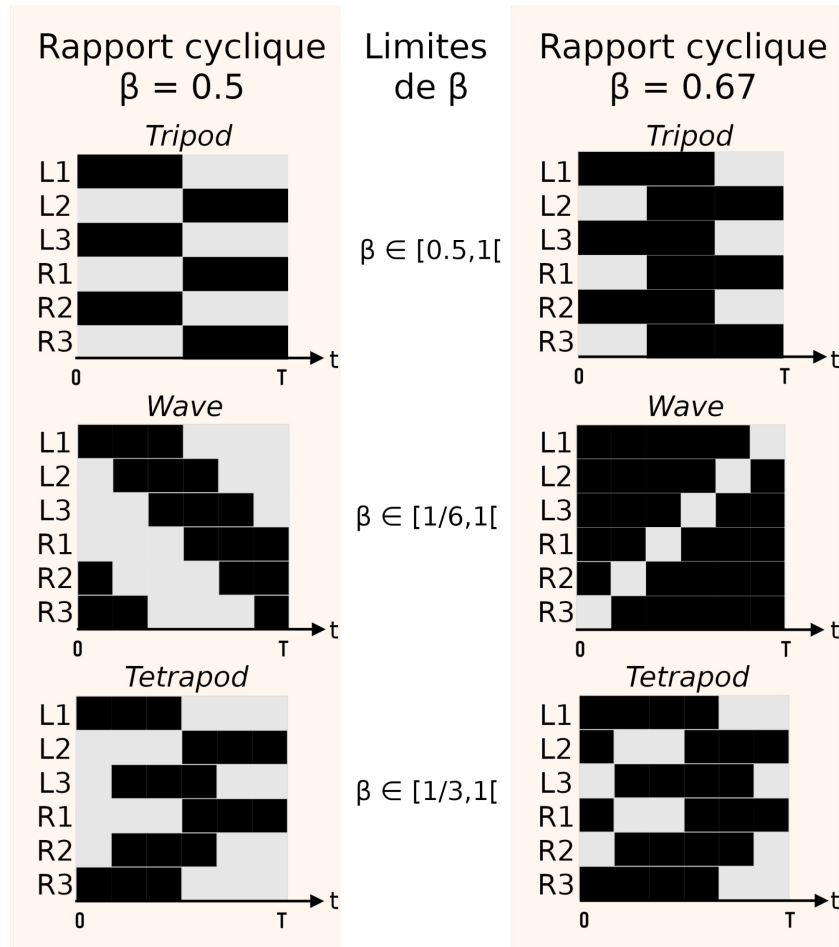


FIGURE 1.3. – Motifs des patrons de marche classiques chez l'hexapode. Les sections sombres sont les phases de propulsion et les sections claires sont les phases de balancement. La limite du rapport cyclique β correspond aux valeurs pour lesquelles il n'y a pas de phases aériennes.

le cas du robot, cela peut s'avérer utile, lorsque des capteurs sensibles aux vibrations sont embarqués.

Il est intéressant de remarquer, que dans les exemples précédemment cités, la marche est décomposée en seulement deux phases. Ce modèle est simple à comprendre et à implémenter sur un robot. Cependant, plusieurs études décomposent la marche de quatre jusqu'à sept étapes. Ceci est fréquent chez l'humain, qui aura des phases de transition afin de transférer la charge d'un pied à l'autre. En étudiant l'appui du pied, qui commence par la pose du talon, et finissant par les orteils, on peut ainsi décomposer son cycle de marche en sept phases [71]. On retrouve aussi cette décomposition chez certains robots quadrupèdes [72], ce qui permet de mieux contrôler les transferts d'énergie élastique entre les pattes du robot et le terrain. Dans le cas des insectes, les modèles de marche utilisés par les biologistes sont typiquement composés uniquement de deux phases : la propulsion (*stance*) et le balancement

1. Les particularités de la mécanique hexapodes
- 1.2. Définition des performances d'un robot hexapode

(*swing*). Pour cette raison, dans la suite du manuscrit nous allons supposer qu'aucune phase de transition existe.

1.2.2. Implémentation de la marche à bord du robot

Afin de comprendre le fonctionnement de la marche des robots hexapodes et les exigences de leur design, il est important de s'intéresser aux algorithmes qui contrôlent leur locomotion. La génération des patrons de marche bio-inspirés est l'une des thématiques principales des études menées sur les robots à pattes [9]. Les algorithmes de marche, inspirés des systèmes nerveux des animaux, doivent prendre en compte la coordination inter-membre et intra-membre de l'individu, ainsi que de la compliance articulaire. La coordination inter-membre, concerne les lois qui sont responsables de la coordination entre les six pattes du robot (ou de l'insecte), donc responsable de la génération des divers patrons de marche, comme la marche tripode, tétrapode, etc. La coordination intra-membre concerne les relations entre les différentes articulations d'une même patte, et est responsable du contrôle des phases d'appui et de balancement [73], ainsi que de la réaction des pattes aux perturbations extérieures. Quant à la compliance articulaire, elle représente la capacité des articulations à absorber et dissiper l'énergie lors des mouvements et des impacts, nécessaire au rejet des perturbations extérieures. D'une manière générale, la coordination motrice et le rejet de perturbations sont responsables de l'efficacité énergétique de la marche [74, 75]. En plus de ces caractéristiques bas-niveau de la locomotion animale, relative à la biomécanique et aux réseaux de neurones contrôlant les muscles des pattes, il existe des modèles décrivant la cognition des insectes [76]. La cognition représente la capacité à planifier d'avance comment une tâche va être réalisée [77]. Cependant, ce type de contrôle concerne des décisions de haut niveau, et particulièrement en ce qui concerne la robotique, ce type de décisions est à la charge de l'opérateur qui programme l'hexapode. Pour cela, nous allons uniquement nous intéresser au contrôle de bas-niveau inhérent à la locomotion de l'hexapode.

La marche des insectes

Le contrôle de la locomotion chez les insectes, dont est inspiré le contrôle des robots, est réalisée par des structures de neurones spécifiques du système nerveux centrale, localisées dans les ganglions thoraciques (Fig. 1.4A) [78, 79]. Au sein de ces ganglions, existe le *circuit locomoteur spinal* (*central pattern generator* - Circuit locomoteur spinal (central pattern generator) (CPG)) [80, 81], responsable de la génération des signaux moteurs rythmiques. En réalité, il existe plusieurs CPG, un dans chaque hémisegment d'articulation, qui contrôle les motoneurones, et par conséquent, l'actionnement des muscles squelettiques de la patte. Il y a des CPG distincts, qui périodiquement inhibent les muscles antagonistes de chacune des trois articulations principales de la patte (Fig. 1.4B) : thorax-coxa (Thorax-coxa (ThC)), coxa-trochanter (Coxa-trochanter (CTr)) et femur-tibia (Fémur-tibia (FTi)) [81]. Certains interneurones, composants les CPG, sont responsables de la transition entre les phases d'appui et de balancement, d'autres engendrent des mouvements de recherche de support d'appui pour la patte [82].

1. Les particularités de la mécanique hexapodes

• 1.2. Définition des performances d'un robot hexapode

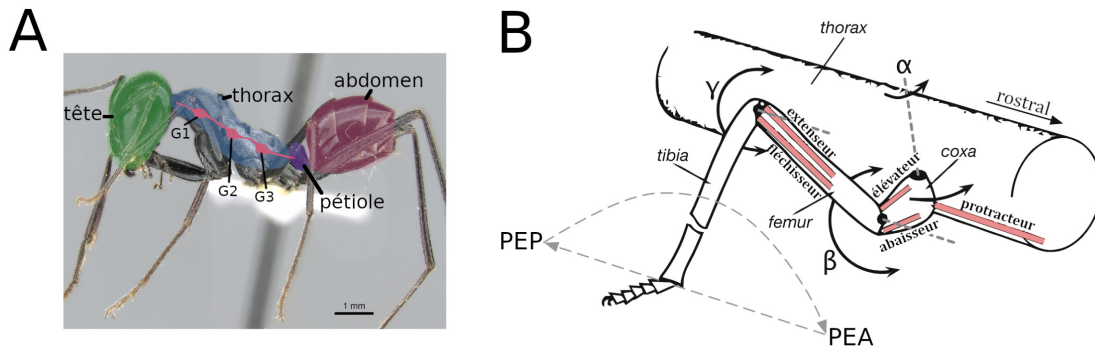


FIGURE 1.4. – Anatomie de la fourmi et son modèle de patte. (A) Anatomie de la fourmi. G1, G2 et G3 correspondent aux ganglions thoraciques. Adapté de [83]. (B) Modèle de la patte de fourmi avec ses muscles. PEP est la position extrême postérieure, PEA est la position extrême antérieure. L'angle α est la position Thorax-coxa, l'angle β est la position coxa-trochantofémur, l'angle γ est la position fémur-tibia. Adapté de SCHILLING, HOINVILLE, SCHMITZ et al. [63].

Les CPG ne sont pas seuls responsables de la marche chez les insectes. Les organes sensoriels ont aussi une grande influence sur le mouvement des pattes. Par exemple, une information sur la position articulaire des pattes est transmise au système nerveux [84] des phasmes, ce qui influence la fréquence des phases d'appui et de balancement. De même, les *sensilles campaniformes*, des mécanorécepteurs donnant une information sur la charge transportée par l'animal, influencent aussi les motoneurones [85]. Les organes sensoriels, peuvent influencer les CPG de deux façons distinctes : par une rétroaction de haut niveau, qui affecte directement la commande centrale des CPG [86] ; une rétroaction de bas niveau, qui affecte la phase des oscillations des CPG [87].

Un dernier mécanisme intervenant au cours de la marche des insectes a été mis en évidence [88], un mécanisme à modèle direct. Cela correspond à une structure neuronale qui reprend le fonctionnement d'un observateur d'état, qui estime à partir de la commande moteur, l'état des organes sensoriels. Cette estimation procure une information additionnelle à l'insecte pour ajuster sa marche [9].

Les études des structures neuronales précédentes expliquent et décrivent de nombreux comportements de la locomotion animale [9]. La coordination inter-membre, a été décrite par cinq règles de Wilson [89] ou encore par les six règles de Cruse [63]. Ces règles, modélisées par un système neuronal (comme le *neuroWalknet* [63]), simulent la génération de la marche chez différents insectes [90, 91]. La coordination intra-membre a été particulièrement étudiée chez les insectes lors de la navigation sur terrain accidenté, ayant un grand intérêt pour la robotique hexapode [92, 91]. Par exemple, l'étude de la marche des criquets sur terrain accidenté [93], a mis en évidence trois stratégies : la recherche de support par mouvement rapides ascendants et descendants ; une forte élévation de la patte, lors d'un contact avec un objet ; la recherche locale de support, par des petits mouvements du tarse. En ce qui concerne la compliance des articulations, l'étude des relations entre la cinématique des articu-

1. Les particularités de la mécanique hexapodes

- 1.2. Définition des performances d'un robot hexapode

lations et leur comportement dynamique [94]. Deux valeurs significatives décrivant la compliance : la raideur, ratio entre le couple et le déplacement angulaire de l'articulation ; l'amortissement, i.e. la force opposée au mouvement et proportionnelle à la vitesse de l'articulation. Fréquemment, la locomotion des êtres vivants à pattes est modélisée par un système masse (le corps de l'animal) sur ressort amortis (les pattes) [70]. La prise en compte de la compliance, permet non seulement d'économiser en énergie, mais aussi d'adapter sa marche à divers terrains [70, 95, 96]. Les modèles numériques de muscles reprenant ces caractéristiques approfondissent les connaissances des principes neuromécaniques de la locomotion des insectes [97]. Le modèle de muscle de Hill est l'un des plus courants [98, 99]. Par exemple, Proctor et Holmes ont construit un modèle neuromécanique afin d'étudier les effets des perturbations sur la locomotion des cafards *Blaberus discoidalis* [100]. Un modèle constitué de 24 oscillateurs neuro-nales et 48 paires de muscles de Hill. Cependant, ce type d'études a été seulement réalisé par simulation car un grand nombre de paramètres doivent être optimisés hors-ligne à partir d'équations différentielles non-linéaires. Par conséquent, elles ne prennent pas en compte les délais du retour d'état rencontrés chez les insectes réels. Ainsi, de nombreuses questions sur les principes neuromécaniques de la locomotion des insectes sont encore non résolues [9].

La marche des robots

L'ensemble des mécanismes précédemment cités, intervenants au cours de la marche des insectes possède un équivalent chez les robots hexapodes. L'implémentation de ces modèles biologiques sur un robot peut être faite par plusieurs méthodes (Fig. 1.5) : le contrôle bio-inspiré, l'approche par l'ingénierie du contrôle, l'apprentissage automatique (machine learning), ou la combinaison de ces méthodes.

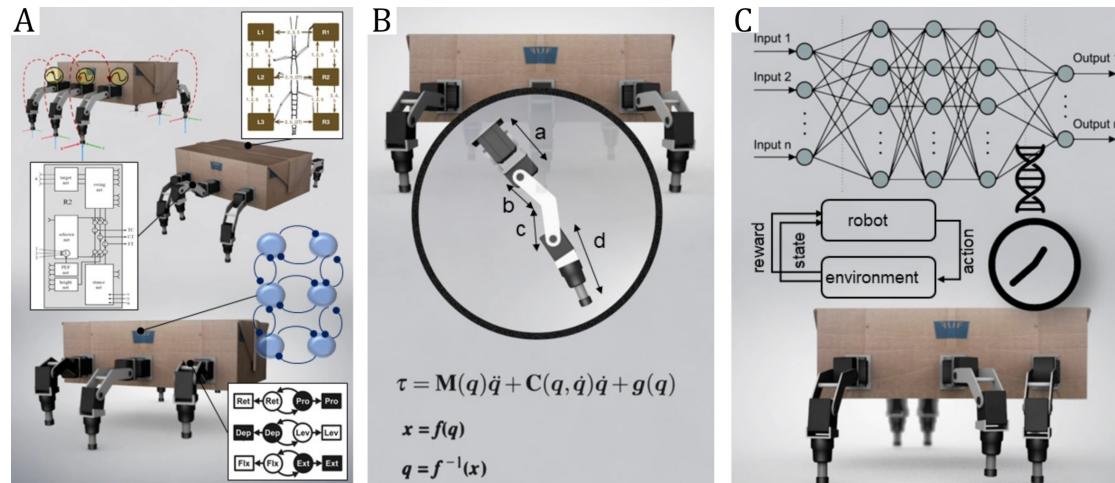


FIGURE 1.5. – Différents types de systèmes de contrôle des robots hexapodes. Adapté de MANOONPONG, PATANÈ, XIONG et al. [9] (A) Contrôle bio-inspiré. (B) Approche par l'ingénierie du contrôle (C) Approche par apprentissage automatique.

1. Les particularités de la mécanique hexapodes

- 1.2. Définition des performances d'un robot hexapode

Le contrôle bio-inspiré (Fig. 1.5A) est la méthode la plus proche des mécanismes des insectes. Basée sur l'utilisation de CPG virtuels, dont les signaux rythmiques engendrent les mouvements des pattes (coordination intra-membre) et en respectant les règles de la coordination inter-membres [101]. De nombreux modèles de CPG ont été développés [102] plus ou moins abstraits. Comme des modèles biophysiques utilisant les équations de Hodgkin-Huxley pour modéliser les neurones [103], ou des modèles simplifiant le fonctionnement des neurones par des fonctions purement mathématiques [104, 105, 102]. De manière générale, les CPG fonctionnent comme des systèmes en boucle ouverte, générant un signal périodique sans aucune boucle de retour. Les signaux rythmiques générés peuvent être modifiés afin d'adapter leur fréquence [106, 107], leur motif [108, 109] ou la phase [110]. En dehors des CPG, dans les contrôleurs bio-inspirés s'inscrivent les contrôleurs basés sur les réflexes pures [111, 112]. Le plus connu est le *neuroWalknet* [63], inspiré des réseaux neuronales des phasmes. Le réseau de neurones artificiels ainsi construit est constitué de plusieurs sous-réseaux, chacun responsable d'un réflexe (phase d'appui, phase de balancement, ou positions articulaires cibles). Il prend en compte les entrées des capteurs, tels que les capteurs de position articulaire, de vitesse, de contact avec le sol. Son architecture respecte les règles de coordination inter-membres et intra-membre des insectes.

L'approche par l'ingénierie du contrôle (Fig. 1.5B) utilise les modèles cinématiques directs et inverses [113, 114, 115] afin de définir la trajectoire des pattes. La trajectoire du bout de patte, associée au patron de marche choisis, fournit ainsi les positions angulaires de chacune des articulations. La trajectoire du bout de patte est souvent considérée comme rectiligne pour la phase d'appui et parabolique pour la phase de balancement. Une autre possibilité consiste à utiliser la trajectoire des pattes directement extraites des enregistrements d'insectes [116, 78, 114]. Dans les travaux de CRUSE et BARTLING [116], plusieurs enregistrements de trajectoire de pattes de phasmes ont été réalisées pour déduire les positions angulaires des articulations, et les implémenter sur un robot. IGNASOV, KAPILAVAI, FILONENKO et al. [114] ont mise en place une procédure pour générer des mouvements de pattes complexes, semblables à ceux des insectes. Cette procédure consiste à associer des enregistrements de la positions des bouts de pattes d'un insecte à une simulation de robot, avec une étape de validation une fois la trajectoire implémentée. Dans le cas de l'approche par l'ingénierie du contrôle, la coordination inter-membre est mise en place par un ensemble de règles pré-programmées sur le robot. Chaque comportement additionnel nécessite l'ajout d'un module supplémentaire, comme par exemple le contrôle de la posture [117]. La prise en compte du relief de l'environnement est souvent réalisée par l'utilisation de capteurs visuels tels que les caméras [118, 119, 120], ou des lidars (télétection par laser, *Light Detection and Ranging*) [121, 122]. Ces données sont utiles au robot pour construire un modèle de l'environnement, identifier la qualité du sol, et ainsi ajuster la position de ses pas ou de la posture. Par exemple, pour se déplacer dans des espaces confinés [120]. Les propriétés de la compliance des muscles, sont reproduites par le contrôle d'impédance (dans le cas d'une commande du couple moteur) ou d'admittance (dans le cas de la commande de la position des moteurs) [123, 124, 125]. Des modèles neuromécaniques peuvent aussi être utilisés pour reproduire la compliance des pattes d'insectes [126]. Comme, par exemple, la méthode de SZCZECINSKI,

1. Les particularités de la mécanique hexapodes
- 1.2. Définition des performances d'un robot hexapode

GOLDSMITH, YOUNG et al. [127], où un modèle neuronal est utilisé pour commander en position des servomoteurs (Dynamixel AX-12) d'une patte de robot et simuler une réponse dynamique semblable aux muscles des insectes.

L'apprentissage automatique ou machine learning (Fig. 1.5C), est la troisième méthode permettant d'implémenter la marche sur un robot hexapode. Elle consiste à générer automatiquement des patrons de marche pour marcher sur terrain plat ou accidenté, et pouvant gérer les situations les plus extrêmes, comme par exemple si une patte du robot se casse [57]. Plusieurs méthodes d'apprentissage existent à ce jour, mais ce domaine scientifique est actuellement très fertile et prolifique. Les techniques d'apprentissage par renforcement [128, 129], par imitation [130], par essai-erreur [57] ou bien des algorithmes basés sur les règles de l'évolution [131, 132, 133]. Par exemple, HAFNER, HERTWECK, KLÖPPNER et al. [128] ont développé une méthode utilisant l'apprentissage par renforcement capable d'apprendre à divers robots à pattes de marcher. Un autre exemple est le contrôle mis au point par TING, FANG, LELE et al. [130], où le robot entraîné apprend à imiter les spécificités de la marche d'un hexapode cible, plus expérimenté. L'apprentissage automatique est donc très flexible, capable de reproduire les fonctions de la locomotion animale les plus complexes avec un nombre de capteurs limité.

1.2.3. Les indicateurs de performances de la locomotion hexapode

L'ensemble des paramètres de marche d'un hexapode, comme la fréquence, le choix du patron de locomotion ou bien le rapport cyclique, ont tous une influence sur les performances du robot. De même, certains algorithmes de contrôle sont plus économes en énergie que d'autres. C'est le cas des contrôles neuronaux, qui sont capables d'identifier la qualité du sol par les capteurs de force au bout des pattes [134, 111], pour adapter la locomotion au type de terrain. Ce type de contrôle adaptant la marche est plus économe en énergie que d'autres algorithmes engendrant un unique et constant patron de marche. Ainsi, il serait judicieux de s'interroger sur les indicateurs de performances d'un robot. Un robot peut consommer plus d'énergie qu'un autre, seulement parce qu'il transporte une charge plus lourde. Un robot qui marche plus rapidement qu'un autre, n'est pas forcément plus performant qu'un plus lent. En effet, certains robots sont construits pour courir des marathons, d'autres sont des sprinters. Depuis les débuts de la robotique, les performances des animaux à pattes et les robots ont été comparées [135, 6]. Une multitude d'indicateurs ont été définis afin de caractériser la qualité de leur marche. Ces indicateurs prennent en compte différents paramètres, comme la vitesse de marche, la stabilité ou bien l'énergie consommée. Nous donc allons voir les indicateurs les plus couramment utilisés de nos jours, applicables au domaine de la robotique hexapode.

1. Le nombre de Froude F_r

Bien que la vitesse de marche ne soit pas un critère de performance universel, elle peut permettre de comparer des robots de la même catégorie, voire des hexapodes à leurs homologues insectes. Le nombre de Froude est un indicateur sans dimension [65], reflétant la vitesse de marche de l'hexapode (Eq. 1.6).

1. Les particularités de la mécanique hexapodes
- 1.2. Définition des performances d'un robot hexapode

$$F_r = \frac{v^2}{g \cdot h} \quad (1.6)$$

avec v la vitesse de marche du robot, h la hauteur de hanche du robot (ou distance entre le sol et le corps du robot), appelée longueur caractéristique et g la constante d'accélération de gravité.

Une autre façon de calculer le nombre de Froude est d'estimer la vitesse v par le produit $h \cdot f$, où f est la fréquence de marche du robot.

Le nombre de Froude est utilisé pour comparer les allures des animaux entre eux [136]. ALEXANDER [136] a supposé que deux individus de taille différente, choisissent un même patron de marche lorsqu'ils se déplacent à la même valeur de nombre de Froude. Par exemple, la transition de la marche à la course se fait à $F_r = 1$. Ce changement du patron de locomotion favorise certains muscles à fibres rapides, et minimise l'utilisation des muscles à fibres lentes [136]. Cet indicateur est aussi utilisé en robotique [137], afin de mettre en évidence quel robot est le plus rapide, indépendamment de leur dimension et semble aussi être peu influencé par la masse [137].

2. La marge de stabilité

La stabilité des robots à pattes est déterminée grâce au calcul du point de moment nul (*Zero-Moment Point*, Point de moment nul (zero-moment point) (ZMP)) [138]. Le ZMP correspond au point où s'applique la résultante de l'ensemble des forces gravitationnelles et effets inertiels où le moment de la résultante de ces forces est nulle dans le plan du sol [139]. Tant que ce point reste à l'intérieur du polygone de support, défini par les points de contact des pattes avec le sol, le robot est en équilibre dynamique. Dans le cas des robots hexapodes bio-inspirés, cette notion a peu de sens, car le patron de marche typiquement utilisé est la marche tripode. L'hexapode garde toujours trois appuis au sol, ce qui lui garantit une stabilité à tout instant. Cependant, bien que les insectes préfèrent des patrons de marche stables [64], un robot peut se déplacer avec des patrons de marche bipodes afin d'atteindre des vitesses supérieures [140]. Dans ce cas, la notion de ZMP est importante, car il est nécessaire de garantir l'équilibre dynamique du robot. Cependant, le point ZMP n'est pas tout à fait un indicateur de stabilité, mais une condition à vérifier. Pour un robot se déplaçant d'une manière dynamique, on peut plutôt définir la marge de stabilité [141]. Cette marge correspond alors à la distance minimale du ZMP au bord le plus proche du polygone de support. De façon similaire, un indicateur de marge de stabilité énergétique a aussi été défini [142]. Il correspond au minimum d'énergie nécessaire pour mettre en rotation le centre de gravité du robot, le long du bord du polygone de support.

3. La résistance spécifique ϵ

En 1950, GABRIELLI et KARMAN [143] ont établi un indicateur de performance énergétique appelé la résistance spécifique ϵ . Cet indicateur est défini comme

1. Les particularités de la mécanique hexapodes
- 1.2. Définition des performances d'un robot hexapode

le rapport entre la puissance moyenne consommée par un véhicule P_{in} et le produit de son poids $m \cdot g$ (g est l'accélération de pesanteur) par la vitesse moyenne de déplacement v (Eq. 1.7). Plus ϵ est petit, plus le véhicule est économe en énergie.

$$\epsilon = \frac{P_{in}}{m \cdot g \cdot V} \quad (1.7)$$

Cette définition tient son origine de la définition de la force de traction F_T (Eq. 1.8) [144], lorsque le rendement du véhicule est de 100%. Cette valeur est généralement calculée pour des véhicules à roues, se déplaçant avec friction sur un chemin. Par exemple, l'ingénierie ferroviaire utilise fréquemment cette grandeur pour calculer la performance énergétique d'un train [144].

$$F_T = \frac{P_{in}}{V} \quad (1.8)$$

En divisant la force de traction F_T par le poids du véhicule, on obtient une valeur sans dimension, la résistance spécifique ϵ . Au cours des vingt dernières années, cette valeur a été aussi appelée, incorrectement, le coût du transport (*cost of transport*, Coût du transport (cost of transport) (CoT)) [6, 135]. Cette valeur se calcule aussi en utilisant la puissance mécanique de sortie du véhicule P_{out} [145] au lieu de la puissance consommée P_{in} [146, 147]. Il existe aussi d'autres définitions similaires, telle que le CoT vertical [148], défini pour les robots grimpants.

La résistance spécifique ϵ est une valeur usuellement utilisée pour comparer les performances énergétiques des robots mobiles [149, 19, 150]. Cet indicateur de performances n'a pas de valeur unique associée à un robot. Elle est définie pour une vitesse donnée, une charge transportée, et varie en fonction du type de terrain [48] ou du patron de marche choisi [151, 19]. Un patron de marche tétrapode ou pentapode détériore la valeur de ϵ , de même qu'un terrain incliné ou accidenté. Ainsi, la comparaison des performances de plusieurs véhicules ne peut être faite que dans les mêmes conditions physiques. Les véhicules doivent être aussi de la même classe et masse [143, 135], car certains véhicules sont faits pour transporter de lourdes charges et d'autres le sont pour se déplacer à de grandes vitesses.

En robotique à pattes, il est fréquent de prendre en compte uniquement la valeur minimale de la résistance spécifique $\min(\epsilon)$. La figure 1.6 représente cette valeur pour quelques robots à pattes. Globalement, sur terrain plat, $\min(\epsilon)$ dépend linéairement de la masse du robot sur un graphique à échelle logarithmique, avec une pente négative [135, 152, 153] (Fig. 1.6).

La figure 1.6 montre que la résistance spécifique permet de regrouper les robots dans plusieurs catégories. On distingue notamment les marcheurs passifs bipèdes, qui sont les machines ayant les plus faibles besoins énergétiques ($\epsilon < 0.3$). Ce type de machines peut marcher à vitesse constante sur de très longues distances exploitant des mouvements de balancement. Le record du monde est

1. Les particularités de la mécanique hexapodes
- 1.2. Définition des performances d'un robot hexapode

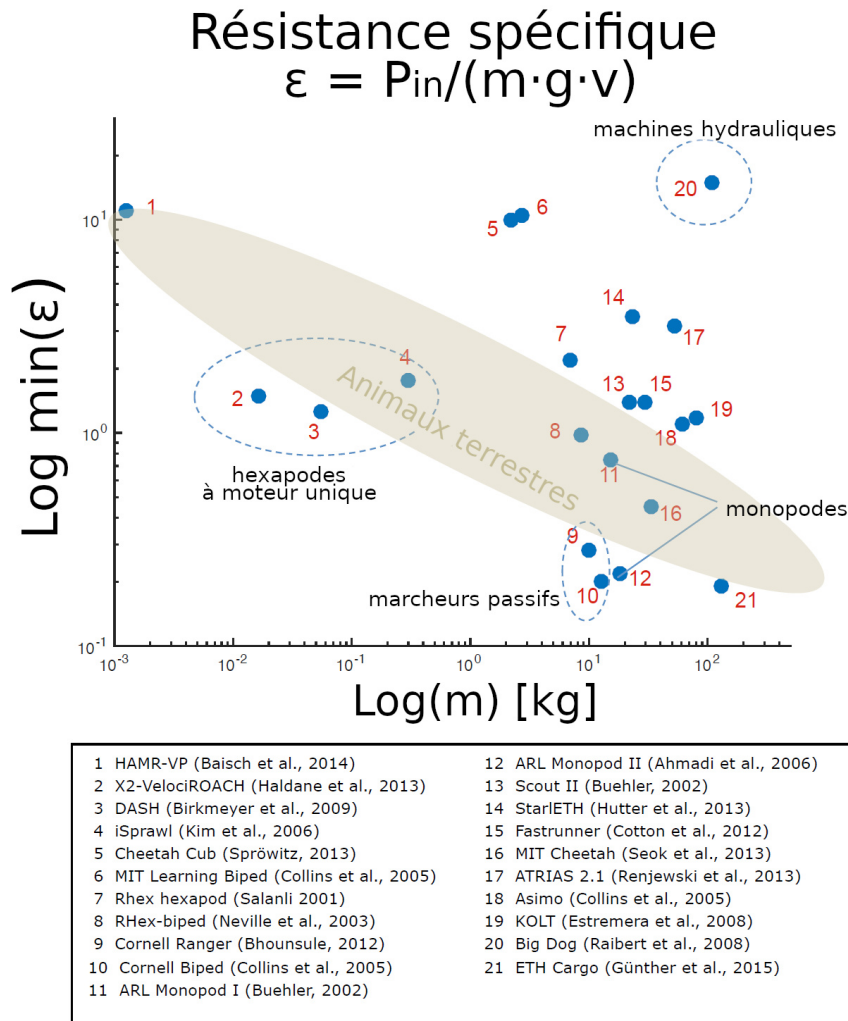


FIGURE 1.6. – Résistance spécifique minimale de quelques robots à pattes. Adapté de KIM et WENSING [6].

détenu par le robot *Cornell Ranger* [154], après avoir parcouru 65km en 31 heures de marche. En nous dirigeant vers des valeurs de résistance spécifique plus grandes ($1 < \epsilon < 3$), on arrive aux robots hexapodes à design réduit. Ce sont des robots hexapodes équipés, soit de *whegs* (des roues en forme de pattes), soit actionnés par un moteur unique. À partir des ϵ supérieures à 10, on retrouve les robots hydrauliques, et ceux à base de servomoteurs.

On constate alors que, posséder moins de pattes et de membres actionnés favorise l'économie d'énergie. De même qu'un nombre réduit de moteurs. Cependant, le choix de la technologie de l'actionneur est fondamental, car c'est sa puissance spécifique (puissance générée par rapport à la masse de l'actionneur W/kg), qui détermine, en priorité, sa résistance spécifique.

1. Les particularités de la mécanique hexapodes
- 1.2. Définition des performances d'un robot hexapode

4. Le Coût du Transport (CoT)

Dans le domaine de la biologie, une grandeur appelée le coût du transport (*cost of transport* - CoT) est très fréquemment utilisée pour comparer les performances énergétiques de la locomotion animale. Elle est définie comme étant le rapport du flux d'oxygène consommé au cours d'une activité Φ_{O_2} et du produit de la masse m par la vitesse v (Eq. 1.9)

$$CoT [ml \cdot m^{-1} \cdot kg^{-1}] = \frac{\Phi_{O_2}}{(v \cdot m)} \quad (1.9)$$

Le CoT peut être mesuré par respirométrie [135, 155] pour un grand nombre d'êtres vivants. Dans le cas des humains ou des quadrupèdes, comme le cheval, le flux d'oxygène est mesuré grâce à un masque respiratoire [156]. Dans le cas des insectes, comme les fourmis, le flux d'oxygène est mesuré sur plusieurs individus traversant un tunnel équipé d'appareils de mesure [157].

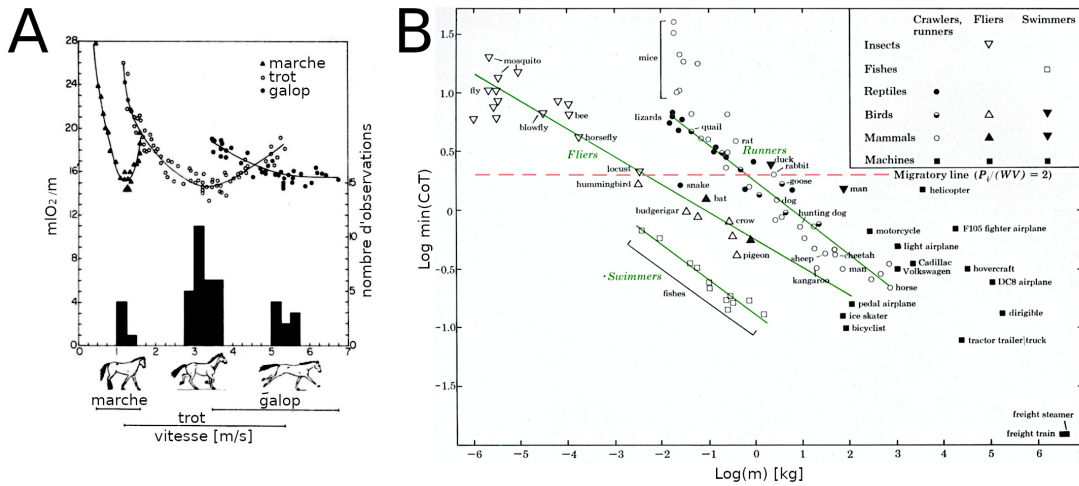


FIGURE 1.7. – Coût du transport minimale de quelques espèces. (A) Coût du transport du cheval. Adapté de HOYT et TAYLOR [156]. (B) Logarithme du coût du transport minimal de quelques espèces animales. Adapté de TUCKER [135].

Comme le montre la Fig. 1.7A, le coût du transport du cheval est en forme de parabole. En fonction de l'environnement, l'animal adapte sa vitesse de marche pour atteindre le minimum énergétique. On peut voir, que la même valeur minimale peut être atteinte à différentes vitesses de déplacement, par la sélection d'un patron de locomotion différent (marche, trot, galop). Il y a donc plusieurs points de fonctionnement optimaux (Point de fonctionnement optimal (PFO)). De même que pour la résistance spécifique, il est courant de faire des comparaisons de la valeur minimale du CoT entre plusieurs individus, voire même avec des machines (Fig. 1.7B). Ainsi, on peut distinguer plusieurs groupes d'individus en fonction de leur type de locomotion : les espèces qui volent, qui marchent, et celles qui nagent. De plus, à une valeur de CoT de 2, on atteint la limite migratoire [135]. Les animaux en dessous de cette valeur ont une marche suffisamment

1. Les particularités de la mécanique hexapodes

• 1.3. Les compromis du design d'un robot hexapode

économe en énergie afin de parcourir de longues distances. Les animaux dont le CoT est au-dessus de 2, vont avoir tendance à rester dans le même habitat tout au long des saisons. Couramment, le CoT des animaux est considéré comme étant une référence pour la locomotion des robots [6]. Le développement de nouveaux robots hexapodes et l'optimisation des méthodes de contrôle visent tout d'abord à atteindre les performances animales, pour ensuite envisager de les dépasser.

1.3. Les compromis du design d'un robot hexapode

Le design d'un robot hexapode bio-inspiré est fait de compromis entre les performances souhaitées, les similitudes avec l'animal imité, et la faisabilité limitée par les progrès technologiques actuels. Quatre parties du design d'un robot sont à considérer avec attention : la structure du corps, le nombre de degrés de liberté (Degré de liberté (DDL)), le choix des actionneurs, et l'ensemble des capteurs.

1.3.1. La structure générale

Le choix de la structure mécanique du corps du robot est primordial. Elle va tout d'abord définir l'échelle du robot, donc influencer le choix de la motorisation. Dans le cas des hexapodes, un robot est composé de six pattes attachées à un corps central, le thorax du robot. On peut donc dire que choisir le design du robot, c'est choisir le design des pattes.

Les pattes

La structure des pattes des robots inspirés d'insectes peut être séparée en deux groupes : les pattes composées de plusieurs corps en série et les pattes formées d'un seul corps.

Les pattes formées de plusieurs corps, constituent le groupe le plus fréquemment rencontré en robotique hexapode. Un insecte a, par définition, une patte composée de six segments (voir Fig. 1.9) : la coxa, le trochanter, le fémur, le tibia et le tarse (qui peut être divisé en plusieurs segments) et pre-tarse [158, 159]. Ce dernier segment est souvent muni de griffes, procurant une meilleure adhérence et amortissement lors de la marche [160, 161]. Le tarse peut aussi avoir une structure particulière, comme chez les cicadelles, qui peuvent sauter à partir de surfaces lisses jusqu'à une hauteur égale à 30 % de la longueur des pattes [161]. L'ensemble des segments de la patte est arrangé d'une manière à former un zig-zag, donnant une posture étalée horizontalement, appelée *sprawled posture*. Ce type d'arrangement répartit mieux les forces sur l'ensemble des muscles de la patte [162, 70]. Néanmoins, dans le domaine de la robotique, le design des pattes est couramment réduit à seulement trois segments [63] : la coxa, le trochanter-fémur et le tibia. Le coxa étant très petite, représentant autour de 7% de la longueur de patte (0,6mm pour la patte du milieu d'une *Cataglyphis fortis* [163]), pour

1. Les particularités de la mécanique hexapodes
• 1.3. Les compromis du design d'un robot hexapode

des raisons de dimensions de la motorisation du robot, le trochanter est plutôt rattaché à la coxa, qu'au fémur. Dans les deux cas, cet arrangement forme une structure composée de trois DDL, représentés par trois liaisons pivot (Fig. 1.8).

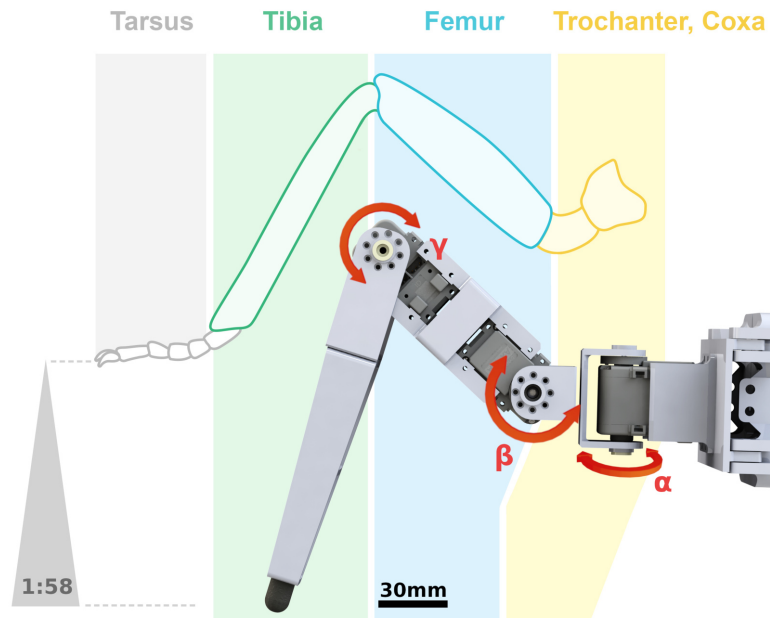


FIGURE 1.8. – Structure mécanique d'une patte conventionnelle à trois degrés de liberté, inspirée de la fourmi du désert *Cataglyphis fortis* à l'échelle 1 : 58 [9]. L'angle α correspond à la liaison thorax-coxa (protracteur-rétracteur), l'angle β correspond à la liaison trochanter-femur (élévateur-abaisseur) et l'angle γ représente la liaison fémur-tibia (extenseur-fléchisseur). Illustration : ©Camille Dégardin & Ilya Brodoline (2021).

Le tarse est donc un segment souvent négligé dans les robots construits au cours de la dernière décennie, malgré les avantages offerts par ce segment. De plus, la longueur de ce segment représente plus de 30% de la longueur totale de la patte [164]. Cette tendance peut être expliquée par le fait, que les travaux actuels menés sur les robots à pattes sont faits dans des environnements contrôlés. L'adhérence au sol et la texture des obstacles rencontrés au cours de la marche sont donc contrôlées. Les robots ne nécessitent donc pas de mécanisme particulier afin de pallier aux incertitudes du terrain exploré. Tout de même, au cours des dernières années, quelques mécanismes de tarse artificiels ont vu le jour [165, 166] afin d'améliorer l'efficacité de la marche sur terrain accidenté et incliné. Ces avantages restent à être démontrés sur des robots complets se déplaçant en milieu extérieur. De même, d'autres mécanismes spécifiques de pattes ont été construits afin de copier un comportement animal particulier. Par exemple, le robot TITAN-XIII est capable de changer de posture au cours de la marche [117], afin de tirer parti des performances de la marche des quadrupèdes et de la stabilité des hexapodes. Des pattes robotiques saltatoires inspirées de la morphologie des insectes, tels que les crickets, ont aussi été développés [167, 168]. Ce mécanisme permet de se déplacer en réalisant une multitude de sauts pour être plus économes en énergie.

1. Les particularités de la mécanique hexapodes

• 1.3. Les compromis du design d'un robot hexapode

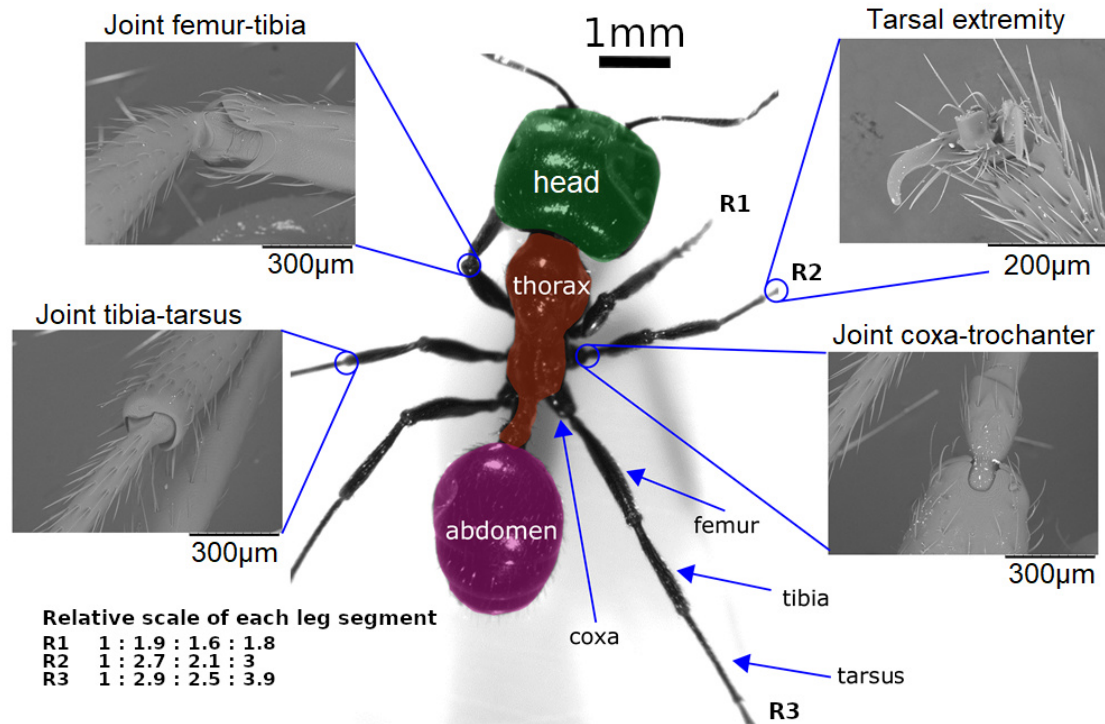


FIGURE 1.9. – Photographie d'une fourmi *Messor Barbarus*, présentant les différentes structures de la morphologie. Photographie par Hugo Merienne, Centre de Recherches sur la Cognition Animale (CRCA UMR 5169), Toulouse, France. La taille relative de chaque segment (coxa-trochanter, fémur, tibia, tarse) par rapport à la coxa de chaque patte est extraite de DIXEY et GARDINER [164]. Figure adaptée de MERIENNE [68] sous Licence CC-BY, 2019.

La seconde catégorie de pattes, sont les pattes composées d'un seul corps. Utilisé par des robots du type R-Hex [169], équipés avec des *whegs*, les robots origamis [170, 171] ou des robots à pattes compliantes [172, 173]. L'avantage de ce type de structure, est de se passer de nombreuses pièces mécaniques comme les roulements à billes, les axes, les vis et les écrous. Ces robots ont donc un coût de fabrication extrêmement réduit, ils sont ainsi plus simples à monter. Le jeu mécanique au sein de la structure est aussi réduit, ce qui engendre des mouvements de pattes plus fluides. Le design général est aussi plus organique, car il est plus proche de la morphologie des êtres vivants, composés de membres souples. Le développement de robots dont les pattes sont composées que d'un seul corps est liée aux avancées technologiques dans le domaine de la fabrication additive et le développement de nouveaux matériaux. Ces derniers, permettent d'usiner des liaisons souples et déformables par la chaleur [174]. Ainsi, les structures mécaniques des pattes des robots se rapprochent de plus en plus de la morphologie des insectes en termes de dimensions et de masse. Jusqu'à maintenant, le poids important de la motorisation constituait le défaut principal des robots à pattes. Pour un hexapode construit à base de servomoteurs, cette masse peut représenter jusqu'à 65 % de la masse totale du robot, embarquant des capteurs et une

1. Les particularités de la mécanique hexapodes

• 1.3. Les compromis du design d'un robot hexapode

batterie (estimé à partir de *AntBot* [10]). D'un autre côté, pour un insecte comme le cafard, la masse de l'ensemble des pattes représente approximativement 2 % de la masse totale de l'animal [175]. Cette légèreté aide à réduire l'inertie, et ainsi à atteindre des fréquences de mouvement élevées (autour de 15 Hz [42]). En plus de l'impression 3D, d'autres matériaux, plus solides et plus légers, devraient prendre la place des matériaux usuels tels que l'aluminium usiné ou le plastique moulé. Ceci est le cas de la *chitosan-fibroin*, un polymère inspiré de la cuticule des insectes fabriquée à partir de carapace de crevettes [176, 177].

Pour résumer, quel que soit la catégorie de pattes choisie, le design de l'hexapode dépend principalement du choix des actionneurs. Cependant, de nombreuses améliorations sont possibles, soit par un choix astucieux des matériaux de fabrication, soit en utilisant des mécanismes plus sophistiqués. En outre, comme le montrent les robots hexapodes construits au cours des dernières années (Tab. 1.1), les pattes d'un robot ont souvent les mêmes dimensions et les mêmes formes. Alors que chez les insectes, les membres ont des tailles différentes, permettant, non seulement de marcher en propulsant au mieux le corps, mais aussi de manipuler des objets. Seulement quelques robots respectent la morphologie de l'animal servant de modèle au design, comme le *MantisBot* [38, 39] ou bien le *Drosophibot* [25, 26]. Cependant, les avantages de leurs morphologie bio-mimétique, n'ont pas fait l'objet d'études détaillées.

Le corps

Bien que la structure des pattes du robot a tendance à ressembler de plus en plus à celle des animaux, les corps des robot hexapodes restent très éloignés de leurs homologues animales. Comme le montrent les robots de la Tab. 1.1, seulement quelques hexapodes possèdent un corps constitué de plusieurs segments : la tête, le thorax (lui-même subdivisé en plusieurs segments) et l'abdomen. Cela est le cas d'*HECTOR* [43, 44, 45] ou *MatisBot* [38, 39]. Cependant, les atouts d'une telle morphologie n'ont pas été le sujet de ces études robotiques. Mais d'autres machines mobiles, ont mis en évidence un avantage dans le cas précis où l'hexapode devait franchir des obstacles de grande hauteur [178], ou réaliser des virages brusques [44]. Ainsi, la réduction du corps d'un robot à une unique pièce solide n'est que le résultat des tendances actuelles à construire des robots naviguant uniquement sur terrain plat ou légèrement incliné, et ne rencontrant pas d'obstacles plus hauts que la hauteur de leurs pattes. De plus, l'actionnement d'un thorax composé de plusieurs segments et l'ajout d'une tête et d'un abdomen induiraient une augmentation de la masse du robot, donc une augmentation de la consommation énergétique. Bien qu'il soit possible de réaliser des structures passives, sans motorisation afin de réduire sa consommation énergétique, ces types de solution sont pour l'heure peu envisageables sur terrain accidenté. D'un autre côté, afin de pouvoir se mouvoir efficacement dans un environnement accidenté, les avantages de la morphologie animale devraient être exploitées. Par exemple, les *cercopoidea* utilisent leur méta-thorax pour stocker de l'énergie élastique générant une forte propulsion au niveau des pattes [158]. Prochainement, d'autres aspects des corps des insectes, applicables aux robots, pourront être mis en évidence, notamment par l'utilisation des microtomographies à rayons X [114, 159, 179]. Concer-

1. Les particularités de la mécanique hexapodes

• 1.3. Les compromis du design d'un robot hexapode

nant les corps des robots actuels, plusieurs géométries sont utilisées. Soit le robot a un corps symétrique, comme les corps circulaires ou hexagonaux, soit des corps allongés, rectangulaires. Les robots symétriques ont l'avantage de pouvoir se déplacer d'une manière omnidirectionnelle. Ils n'ont pas d'avant ni d'arrière, ce qui facilite les rotations [65]. En ce qui concerne les robots possédant un corps rectangulaire, ils ont besoin de connaître leur orientation à chaque instant et réaliser une trajectoire plus complexe afin de tourner. Ce type de robots a, cependant, l'avantage d'avoir les fixations des pattes plus éloignées les unes des autres, permettant de faire des pas plus longs et d'avoir une vitesse de marche plus élevée.

Choisir le design du corps du robot, c'est aussi choisir la taille de l'hexapode. Cette décision a une conséquence considérable sur les matériaux utilisés dans la construction du robot, les actionneurs à utiliser, donc sur les performances du prototype construit. De plus, pour un robot inspiré d'insectes, conçu afin de valider des hypothèses établies par les biologistes sur la locomotion, la navigation ou la fonction des organes sensoriels, il est important de connaître les effets engendrés par le changement d'échelle. Puisque l'échelle du robot, va influencer la cinématique de l'hexapode, et la mécanique des matériaux [180]. On peut donc se poser les questions suivantes : comment la taille influence-t-elle les performances? Est-ce qu'un comportement observé sur un insecte faisant que quelques millimètres, peut-il être reproduit sur un robot de plusieurs dizaines de centimètres? Du point de vue des matériaux, plus le robot sera de grande envergure, plus les segments le constituant seront longs, plus les déformations internes au robot seront grandes (proportionnelles au cube de la longueur) [181]. Certaines déformations internes peuvent être souhaitées, par exemple pour exploiter l'élasticité au cours de la marche. Mais généralement, afin de prévenir la rupture des pièces, la largeur et l'épaisseur des segments des pattes et du corps doivent être augmentées. Ceci résulte en une augmentation conséquente de la masse du robot et de son inertie.

Grandeur [unité SI]	Facteur d'échelle
Longueur [m]	α
Masse [kg]	α^3
Temps [s]	$\sqrt{\alpha}$
Fréquence [Hz]	$1/\sqrt{\alpha}$
Vitesse [m/s]	$\sqrt{\alpha}$
Puissance [$kg \cdot m^2/s$]	$\sqrt{\alpha^7}$
Raideur [N/m]	α^2
Amortissement [kg/s]	$\sqrt{\alpha^5}$

TABLEAU 1.2. – Tableau des relations allométriques. La première section présente les grandeurs élémentaires, la seconde section présente les grandeurs composées.

Afin de résumer l'ensemble des effets résultant d'un changement d'échelle, des relations (Tab 1.2) ont été établies, basées sur les lois de la mécanique [182, 183, 184]. Ces relations peuvent être séparées en deux groupes. Le premier groupe est constitué

1. Les particularités de la mécanique hexapodes

• 1.3. Les compromis du design d'un robot hexapode

de relations concernant des grandeurs élémentaires, telles que la masse ou le temps. Le second groupe, les relations composées à partir de ces grandeurs élémentaires, comme la vitesse ou la puissance. Ainsi, si l'on désire construire un robot de grande envergure, à partir d'un robot plus petit déjà existant, ces équations prédisent les caractéristiques de celui-ci. Si, par exemple, le nouveau robot sera 30 fois plus grand, il aura une masse 27000 fois plus lourde, une vitesse 6 fois plus grande, une fréquence de marche 6 fois plus faible. Ces relations peuvent aussi être utilisées afin de comparer un robot à son homologue animal, en appliquant le facteur d'échelle approprié [184]. On peut ainsi remarquer qu'un robot de petite taille, proche de celle de l'insecte, aura une structure légère, de fines pattes, et marchera à une fréquence élevée. À l'opposé, pour un robot dont la taille sera très éloignée de l'insecte, on aura une structure lourde et de faibles fréquences de marche, due à l'accroissement de l'inertie. De plus, des moteurs plus puissants et plus lourds seront donc nécessaires, engendrant une augmentation du coût de fabrication du robot. Ceci justifie la tendance actuelle à construire des robots hexapodes de taille relativement faible allant jusqu'à 1 mètre d'envergure et une masse jusqu'à 10 kg. Il est cependant important de remarquer que les moteurs électriques de puissance élevée ont souvent un rendement meilleur que ceux de faible puissance [185]. Si on prend l'exemple d'un moteur à commutation graphite de 1,5 W, son rendement serait de 44 %, alors que un moteur similaire de 200 W aurait un rendement de 94 % (deux fois plus).

Ainsi, on peut dire que pour observer des phénomènes identiques sur un insecte et un robot, les deux individus doivent avoir les mêmes dimensions. Si cela n'est pas le cas, un facteur d'échelle doit être appliqué et les variations des diverses grandeurs physiques doivent être prises en compte. Pour rester le plus près des caractéristiques de l'animal, on doit donc s'efforcer de construire des robots à l'échelle la plus proche de l'animal. Cependant, de nombreuses limites technologiques rendent cette tâche difficile. Par exemple, les technologies actuelles d'impression 3D ont une précision moyennant les $0,4 \pm 0,2 \text{ mm}$ [186], ce qui rend impossible de faire des assemblages mécaniques de haute précision. Les batteries, qui sont essentielles aux robots mobiles autonomes, sont aussi un frein au développement d'hexapodes miniatures. Par exemple les batteries au lithium, très fréquemment utilisées en robotique et dans le modélisme, ont une faible densité énergétique de 150 Wh/kg [187]. Durant les prochaines années, elles devraient être remplacées par de nouvelles technologies, comme les sources d'énergies bio-inspirées (basées sur l'oxydation du sucre par des enzymes) ayant des densités énergétiques deux fois plus grandes (298 Wh/kg [187]). Ces nouvelles sources d'énergies, sont une condition nécessaire à la construction de robots hexapodes miniatures similaires aux insectes [188].

1.3.2. Le nombre de degrés de liberté

Le nombre de DDL est l'une des décisions majeures à prendre lors du design d'un robot hexapode. En augmentant ce nombre, le robot pourrait réaliser des mouvements plus complexes comme, par exemple, contrôler l'orientation du point de contact de sa patte avec le sol. Cependant, cela aurait un impact sur les caractéristiques du robot, comme la masse, son prix, et une réduction d'autonomie. Un hexapode possédant six

1. Les particularités de la mécanique hexapodes

• 1.3. Les compromis du design d'un robot hexapode

pattes, en passant de trois DDL par patte à quatre, cela induirait l'augmentation du nombre d'actionneurs de 18 à 24. En prenant l'exemple d'un servomoteur Dynamixel AX-18A de 55 g, cela résulterait en une augmentation de masse de 330 g et du prix de fabrication de 780 €. Au cours des vingt dernières années, les robots hexapodes ont été construits avec un à cinq DDL par patte :

1. Avec un unique DDL par patte, la manœuvrabilité du robot est grandement limitée. Le design mécanique est particulièrement important. Une structure simple assure la possibilité de marcher uniquement en ligne droite [189]. Si la longueur des pas est variable, des rotations dans le plan avec glissement seront possibles. Avec des pattes compliantes, il est possible d'effectuer des déplacements simples en terrain accidenté. Uniquement possible pour des robots équipés de *whegs* [59, 60, 42]. Quant aux robots à pattes ayant peu de DDL actionnés, ils peuvent aussi privilégier l'utilisation de mécanismes passifs [190, 191] ou de structures du type origami [170] afin d'améliorer leur manœuvrabilité. Ce choix de mécanisme peut être assimilé aux réflexes de coordination motrice chez les animaux, puisque certains mouvements de membres n'ont pas besoin d'être contrôlés précisément, car résultant de déplacements initiés par d'autres membres du corps.
2. Avec deux DDL par patte, on peut construire des robots hexapodes avec une structure mécanique simple à coût réduit [171]. Ce choix est un bon compromis entre consommation énergétique et mobilité. Cependant, ce type de robots est adapté pour marcher uniquement sur terrain plat, et la trajectoire de leurs pattes forme des arcs de cercle induisant des oscillations latérales du corps. Ces oscillations parasites, vont à leur tour engendrer des perturbations des capteurs présents sur des robot, donc générer des erreurs de mesures.
3. Le cas de trois DDL est le plus courant en robotique hexapode. Au total, un tel robot possède 18 DDL (voir Tab. 1.1). Dans cette configuration, la patte représente le modèle typique de patte d'insecte utilisé en biologie, à trois degrés de liberté [63]. Un robot équipé de telles pattes est capable d'adapter sa locomotion à différents types de terrains accidentés, plats ou inclinés. Les DDL lui permettent, par exemple, d'ajuster la longueur des pas ou encore la hauteur et l'inclinaison du corps.
4. Plus de trois DDL par patte, améliore d'avantage la manœuvrabilité du robot [48, 118]. Les actionneurs additionnels rendent la marche en terrain irrégulier plus facile à réaliser et augmentent la stabilité [34]. Contrairement aux robots à trois DDL, ces robots sont capables d'orienter les forces au niveau des points d'appui des pattes, améliorant ainsi l'adhérence au support. Plusieurs études démontrent cette capacité à gravir des pentes élevées de 43° [192] jusqu'à 50° [34, 193]. Malheureusement, le contrôle de ce type de robots est complexe, accompagné d'une masse et d'un prix élevée. Le grand nombre de moteurs engendre aussi une consommation d'énergie importante.

1. Les particularités de la mécanique hexapodes

• 1.3. Les compromis du design d'un robot hexapode

Pour résumer, nous pouvons dire que la tendance actuelle des 3 DDL par patte est justifiée. Ayant un bon compromis prix/performances et donnant la capacité aux robots de se déplacer aisément sur des terrains plats à faiblement inclinés, ces designs semblent être le choix optimal (l'annexe A illustre comment le nombre de DDL influence l'espace de travail d'une patte, c'est-à-dire les positions atteignables par celle-ci). D'un autre côté, les insectes possèdent un plus grand nombre de DDL par patte [160, 194, 195, 159], leur permettant une locomotion plus perfectionnée sur terrain accidenté ou incliné (des pentes jusqu'à 54° pour la fourmi du désert *Cataglyphis* [196]). Des modèles de robots plus proches des insectes ont ainsi vu le jour. Comme un design de patte robotisée de bousier, construit en 2018, basées sur des microtomographies à rayons X [114]. Ce type de pattes bio-mimétiques à quatre DDL, permettent à la fois la manipulation et le transport de charge, aptitudes présentes aussi chez l'insecte étudié. À l'opposé, il existe des robots hexapodes au design très éloigné des animaux. En 2017, un robot hexapode, appelé *Cassino Hexapode III*, a été construit. Ce robot possède des pattes à trois DDL hybrides, dont les extrémités sont équipées de roues omnidirectionnelles [197]. L'apparition de ce type de robots, joint la capacité des insectes à pattes de parcourir des terrains irréguliers, à la faible consommation énergétique et les grandes vitesses de déplacement apportés par les roues. Ainsi, joindre la bio-inspiration aux aspects du domaine de l'ingénierie permet de nos jours de tirer profit des deux concepts et obtenir des performances remarquables [198]. Ce type de design, qui compense les limites technologiques actuels des simples hexapodes, peut être par la suite utilisé pour des explorations en terrains extrêmes, comme la lune [199].

1.3.3. Le choix des actionneurs

Les robots hexapodes étant généralement constitués de six à trente-six DDL (voir Tab. 1.1), le choix des actionneurs est primordial. Les actionneurs sont souvent identiques pour chacun des DDL, les performances du robot dépendent donc majoritairement de ce choix. Un grand nombre de technologies existe, chacune ayant leurs propres avantages et inconvénients : les servomoteurs, les moteurs brushless ou les muscles artificiels

— Le servomoteur

Les servomoteurs sont des actionneurs ayant un boîtier compact, composés d'un moteur à courant continu, joint à plusieurs étages d'engrenages. Ce type d'actionneur représente une liaison pivot. Un circuit de commande est inclus dans le servomoteur, réalisant un asservissement de l'angle de l'axe de sortie. Les moteurs composants les servomoteurs sont dans la majorité de cas à balais, mais il existe aussi des servomoteurs sans balais, qui sont plus rares et avec un prix plus élevé. L'avantage des servomoteurs est leur simplicité d'utilisation. Le contrôle de la position est réalisé en envoyant la valeur de l'angle par transmission série ou par PWM (modulation de largeur d'impulsions, *Pulse Width Modulation* en anglais). Leur boîtier inclue souvent de nombreux points d'at-

1. Les particularités de la mécanique hexapodes

• 1.3. Les compromis du design d'un robot hexapode

tache, permettant de les incorporer très facilement au design des robots, ce qui est d'autant facilité par leur dimension compacte. Cependant, les servomoteurs présentent plusieurs inconvénients. L'inconvénient principal est leur grande masse et leur consommation d'énergie élevée. Cette consommation d'énergie engendre une élévation de température importante, qui limite leur fonctionnement. Par exemple, les servomoteurs Dynamixel AX-18A utilisés sur le robot AntBot [10, 27] ont une température limite de 70°C , au-dessus de laquelle le moteur ne fonctionne plus. Par ailleurs, les servomoteurs sont très éloignés du fonctionnement des muscles des êtres vivants. Les étages d'engrenages avec un rapport de réduction élevé, créent des articulations raides. Afin de rendre les servomoteurs plus proches de leur modèles biologiques, et simuler la compliance des muscles [127], il est possible d'utiliser des servomoteurs intelligents, fournissant au robot la valeur du couple moteur, de la vitesse ou de la température. Une autre façon de modifier la raideur est d'ajouter des ressorts en parallèle aux servomoteurs, ce qui forme les actionneurs à impédance variable (AIV) [200]. Ces actionneurs peuvent être de trois types : les AIV dont la raideur est fixée par le ressort qu'on précharge ; les AIV avec un système d'embrayage, permettant de changer de rapport de transmission ; les AIV avec des ressorts dont on modifie les propriétés physiques.

— Le moteur brushless

Un moteur brushless (Moteur à courant continu sans bague ni balais (brushless direct current) (BLDC)) ou moteur à courant continu sans bague ni balais, est une technologie proche des moteurs à courant continu à collecteur (Moteurs à courant continu à collecteur (direct current brushed) (DCB)) utilisés dans les servomoteurs. L'avantage est leur rendement énergétique, qui dépasse les 90% pour les moteurs les plus performants [185], alors que les DCB ont un rendement compris entre 50% et 80%. Le principal inconvénient est que les circuits de commande sont plus complexes que pour les DCB, plusieurs signaux de commande correctement synchronisés sont nécessaires [201]. Les moteurs BLDC ont un avenir prometteur dans la robotique à pattes bio-inspirées. Les récents développements, comme les moteurs de *Herbi robotics* [24] ou encore *Vertiq* [202] possèdent les avantages des servomoteurs conventionnels, comme le contrôle de vitesse et de position intégré, sans leurs inconvénients. Les étages d'engrenages au niveau de l'axe de sortie sont supprimés, ce qui allège la structure, et aide à implémenter plus facilement un comportement compliant. Leur puissance mécanique en sortie est très élevée, pouvant atteindre les 330 W pour le moteur 23 – 06 – 2200Kv de *Vertiq*. Ayant une masse de seulement 37,4 g, la puissance spécifique de cet actionneur atteint les 6 kW/kg, bien supérieure à la puissance spécifique des muscles chez les humains atteignant les 200W/kg [203]. Ce type d'actionneurs équipe déjà certains robots à pattes, comme le robot *TITAN-XIII* [117], un robot quadrupède ayant une puissance spécifique d'actionnement de 144,4 W/kg. Cette puissance spécifique est quatre fois plus élevée, que la puissance de la version précédente du robot *TITAN-VIII* [204] équipé de moteurs DCB (40 W/kg).

1. Les particularités de la mécanique hexapodes

• 1.3. Les compromis du design d'un robot hexapode

— Les muscles artificiels

L'efficacité énergétique de la locomotion animale résulte principalement de leurs muscles. Des muscles, dont la compliance aide à l'absorption des chocs et la restitution de l'énergie élastique au cours de la marche. Comme nous avons vu précédemment, les robots actuels simulent la compliance grâce à des algorithmes de contrôle sophistiqués [127], une compliance qui peut aussi être obtenue par l'utilisation de muscles artificiels.

Il existe différentes catégories de muscles artificiels pouvant reproduire les caractéristiques des muscles biologiques [205]. Les actionneurs conventionnels sont les moteurs hydrauliques, actionneurs piézoélectriques, les polymères à mémoire de forme [206], et les actionneurs à hydrogel [207]. L'un des actionneurs les plus utilisé en robotique mobile est l'actionneur piézoélectrique bimorphe [208, 209]. Ce muscle artificiel a la forme d'un film plastique semi-rigide comportant jusqu'à 23 couches de matériaux piézoélectriques et fibres de carbone [210]. Il peut être découpé sous la forme désirée et être ainsi adapté à beaucoup d'applications. On le rencontre aussi bien sur des robots volants, à pattes, aquatiques ou rampants [208]. Ayant une bande passante très large (certains robot-insectes volants peuvent réaliser des mouvements jusqu'à 230 Hz) et une puissance spécifique élevée (9,75 kW/kg), ils peuvent être utilisés sur des robots de toute taille. Les micro-robots hexapodes exploitent particulièrement cette technologie. Par exemple, le robot *HAMR-Jr* [183] utilise des pattes à actionneurs piézoélectriques, ce qui réduit sa taille à seulement 22,5 mm et sa masse à 320 mg. Malgré leur faible rendement (autour de 50 % [209]), ce type de technologie est très prometteur pour la robotique bio-inspirée. Elle permet de se rapprocher au plus près de la taille réelle des insectes, donc les imiter en négligeant les effets de changement d'échelle (Tab. 1.2).

D'autres actionneurs non-conventionnels existent, comme les muscles pneumatiques (*pneumatic artificial muscle*, PAM), les alliages à mémoire de forme (*shape memory alloys*, SMA), les polymères électroactifs (*electroactive polymers*, EAP). Parmi les technologies dernièrement développées il y a l'actionneur *HASEL* [211]. Ce dernier est composé d'une série de poches, faite à partir d'un film plastique fin et inextensible. Chaque poche contient un liquide diélectrique. Lorsqu'une différence de potentiel apparaît entre deux électrodes recouvrant une partie d'une poche, elles se rejoignent et font gonfler l'actionneur pour générer une force de traction. Le fonctionnement de cet actionneur ressemble ainsi à un muscle biologique, qui se contracte. De plus que la traction générée, pouvant atteindre les 300 kN/m² est semblable à celle générée par les muscles des vertébrés (350 kN/m² [203]). Les actionneurs *HASEL* peuvent être construits sous différentes formes et peuvent se contracter à des fréquences allant jusqu'à 126 Hz pour le *Quadrant donut HASEL*.

1.4. Conclusion

L'analyse de la génération de marche chez les insectes et leur implémentation sur les hexapodes actuels, met en évidence que, plus la méthode de contrôle est proche de la structure animale (contrôle bio-inspiré), plus le robot a besoin d'avoir une morphologie semblable à celle de l'animal imité. Il doit posséder les mêmes organes sensoriels et les mêmes dimensions. Dans le cas contraire, des ajustements doivent être faits pour compenser les différences entre les modèles. Cependant, construire un robot à la morphologie animale est complexe et nécessite un budget élevé. On peut prendre l'exemple des robots *HECTOR* [43] ou *LAURON V* [212], ayant une masse imposante (13 kg pour *HECTOR* et 24 kg pour *LAURON V*), reflétant la présence de nombreux organes sensoriels et la grande robustesse de leur structure. Bien que les constructeurs de ces robots ne partagent pas d'information sur le coût de ces machines, il peut être aisément estimé à plus de 10 k€. Ce type de robot, tout équipé, sont les rares hexapodes à utiliser un contrôle à base de patrons de coordination motrice préprogrammés, comme le *neuroWalkNet*.

L'utilisation d'oscillateurs CPG rajoute une couche d'abstraction au contrôle du robot, car ils ne nécessitent pas obligatoirement de retour d'état des capteurs. Ainsi, c'est le mode de commande est le plus utilisé sur les robots hexapodes bio-inspirés développés au cours de ces vingt dernières années [9]. La simplification du contrôle permet aussi de simplifier la structure du robot. La tendance actuelle dans le domaine de la robotique hexapode est de construire des robots à 18 DDL à base de servomoteurs. Ce type de design est simple à assembler et permet de réduire les prix de constructions en dessous des 3 k€.

En ce qui concerne les performances, le développement de nouveaux robots hexapodes bio-inspirés dépend donc fortement des progrès faits en matière d'actionnement. Bien qu'un large choix d'actionneurs soit déjà disponible, les robots hexapodes ont tendance à se limiter à l'utilisation des servomoteurs. Les études menées sur les robots ainsi construits se focalisent davantage sur d'autres aspects de la locomotion, tels que les modèles de navigation, et non pas sur les particularités de la structure mécanique animale. Pourtant, l'utilisation des servomoteurs diminue fortement les performances énergétiques de ces hexapodes à une valeur de résistance spécifique ϵ supérieure à 10. Très loin des performances des quadrupèdes ou des animaux à pattes, ayant une résistance spécifique en dessous de 5.

On en déduit que les biologistes ont besoin de robots plus simples et plus rapides à construire et à utiliser. Comme dans le cas du robot *AntBot*, l'utilisation de l'impression 3D permet une personnalisation et une réparation facile de la mécanique. Les futurs robots devraient aussi avoir des pattes plus intelligentes, intégrant un nombre de capteurs supérieur aux robots actuels et reproduisant la compliance des pattes d'insectes. Le chapitre 2 complète cette étude, en présentant les étapes de la conception et fabrication d'un robot bio-inspiré, mettant ainsi en évidence les questions qui peuvent se poser au cours de ce processus.

Dans ce chapitre, nous avons aussi vu plusieurs indicateurs de performance utilisés pour la robotique à pattes. Il n'y a pas de méthode universelle pour estimer ces performances, ils dépendent de la classe du robot. De plus, les conditions de mesure

1. Les particularités de la mécanique hexapodes

- *1.4. Conclusion*

de la résistance spécifique ϵ n'est pas standardisée ce qui rend difficile la comparaison des robots entre eux. Le CoT est aussi une valeur intéressante, qui a tendance à être mis en relation avec ϵ , mais rien n'indique que ces deux valeurs sont comparables. Dans le chapitre 3, nous allons approfondir l'étude sur les indicateurs de performances et proposer une nouvelle méthode pour comparer les robots à pattes.

2. Design et fabrication d'une nouvelle patte robotique bio-inspirée

Sommaire

2.1. Objectifs et contraintes du développement	52
2.2. La conception mécanique de la patte	54
2.2.1. L'échelle du robot	56
2.2.2. Le choix des matériaux	58
2.2.3. Le système moteur	68
2.2.4. Les organes sensoriels	70
2.3. Modélisation et commande de la patte	73
2.3.1. Modélisation d'un actionneur	74
2.3.2. Modélisation d'une patte d'hexapode	81
2.3.3. Génération de trajectoire	83
2.4. Conclusion	84

Le robot hexapode, est-ce juste un assemblage de moteurs ?

Le développement d'un nouveau robot hexapode peut d'un côté être considéré comme un processus trivial, résumé à un assemblage de moteurs. Cependant, afin de faire certains choix technologiques, surtout dans le cas des robots bio-inspirés, utilisés comme modèle animal, il est important de procéder au design du robot pas à pas, en prenant en compte les limites technologiques actuelles, contraignant le processus de conception du robot. Ceci permet par la suite, de mieux connaître les limites du modèle animal réalisé ainsi qu'estimer les limites du cadre d'utilisation du robot. Dans ce chapitre, nous allons voir les différentes étapes de conception d'un robot bio-inspiré de la fourmi du désert *Cataglyphis fortis*. Le but recherché est de créer un design répliquable facilement, sous forme de kit de construction (Fig 2.1). Plus particulièrement, les robots hexapodes actuels étant constitués de six pattes identiques les unes aux autres, la conception d'une unique patte *Pohod15Leg* sera étudiée. Ce processus comprend le choix du design mécanique, de la motorisation, de l'ensemble des capteurs, ainsi que la commande du système. Il est important de noter, que la procédure de fabrication d'un robot hexapode est une tâche faisant appel à tout un ensemble de disciplines : la mécanique, la science des matériaux, l'automatique, l'électronique et l'informatique. Chacun des points traités par ces disciplines est interdépendant, par conséquent,

2. Design et fabrication d'une nouvelle patte robotique bio-inspirée

• 2.1. Objectifs et contraintes du développement

le choix de l'ordre des tâches du procédé de fabrication dépend principalement du cahier des charges du robot. Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord discuter des critères du cahier des charges guidant le design de la patte bio-inspirée *Pohod15Leg*. Puis, nous allons voir les différentes étapes de sa conception, en commençant par le design mécanique et terminant par la commande des actionneurs et la génération de trajectoires. Une attention particulière sera portée sur le processus de fabrication.

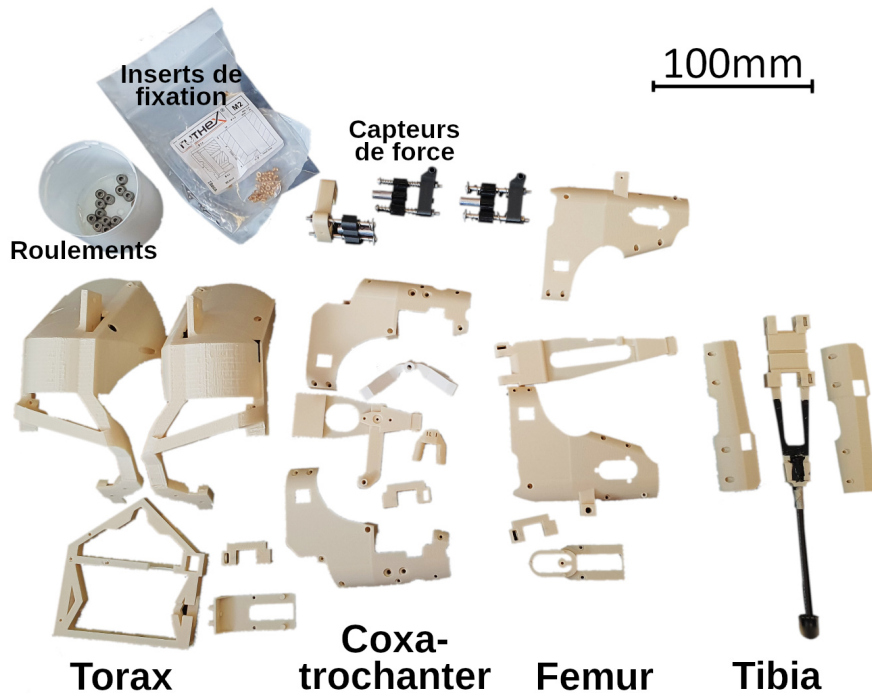


FIGURE 2.1. – Ensemble des pièces mécaniques composant la patte *Pohod15Leg*

2.1. Objectifs et contraintes du développement

La fabrication d'une patte innovante de robot hexapode s'inscrit dans un projet plus large de l'équipe Systèmes Bio-Inspirés à l'Institut des Sciences du Mouvement Étienne-Jules Marey, visant à construire un robot naviguant d'une manière autonome en milieu extérieur [10]. Une multitude de travaux menés au laboratoire [10, 213, 214], visent à s'inspirer d'un caractère spectaculaire de la fourmi du désert *Cataglyphis fortis*. L'originalité de cette espèce de fourmis, est l'utilisation d'un ensemble de méthodes de localisation, référencées vision, robustes aux perturbations extérieures, minimalistes et permettant ainsi une navigation autonome sur de grandes distances. Elle possède, par exemple, la capacité à interpréter la polarisation de la lumière provenant du ciel en tant que boussole [215], la guidant dans ses trajets journaliers. L'hexapode *Antbot* [10], inspiré de cette fourmi, a la capacité de parcourir une quinzaine de mètres et de revenir à son point de départ sans aucune intervention humaine [10]. Il a marqué une étape importante dans le domaine de la navigation visuelle autonome à pattes. Cette

2. Design et fabrication d'une nouvelle patte robotique bio-inspirée

• 2.1. Objectifs et contraintes du développement

sensibilité à la polarisation, au niveau de *l'aire dorsale marginale* [216], est aussi présente chez d'autres insectes, tels que des mouches *Drosophila melanogaster* [217] ou d'autres espèces de fourmis de diverses régions du globe comme l'Espagne ou l'Australie [218, 219]. De manière générale, les fourmis, sont des insectes extraordinaires, s'adaptant à leur milieu écologique. Comme les fourmis *Melissotarsus* [220], dont les pattes situées au milieu de leur corps sont tournées vers le haut, pour faciliter le déplacement dans les galeries creusées dans les arbres. Il existe près de 13000 espèces de fourmis, chacune d'elle présentant des particularités utiles à la robotique [221].

Ayant un large choix de morphologies, il est difficile de toutes les étudier afin de choisir le modèle le plus adapté pour la conception d'un robot hexapode. Il a donc été choisi de continuer à travailler sur la fourmi *Cataglyphis*, car bien connus suite aux travaux antérieures de l'équipe. De plus, cette espèce a une taille conséquente, plus de 1 cm de long [163], et peut se déplacer à des vitesses très élevées, jusqu'à 86 cm/s [222]. Ces deux caractéristiques sont les plus proches des grandeurs d'un robot par rapport à d'autres insectes comme les phasmes, ayant des mouvements plus lents (4 cm/s [223]). La fourmi *Cataglyphis*, ne présente aucune morphologie particulière au niveau du corps. Elles ont une structure de pattes d'insecte standard, semblable aux fourmis qu'on rencontre plus couramment en Europe, comme les *Barbarus*. Les informations manquantes sur l'espèce sont complémentées par les données d'autres animaux semblables, tels que les cafards ou les phasmes, qui sont sujets à de nombreuses études et partagent souvent les mêmes caractères et comportements concernant leur locomotion et la structure de leur corps. On pourra donc dire, qu'on ne cherche pas seulement à concevoir une patte de robot inspirée d'une fourmi, mais plutôt une patte d'insecte en général.

Critères de performance	Min	Max
Envergure	10 cm	70 cm
Masse	1 kg	3 kg
Vitesse	26 cm/s	
Charge minimale	700 g	
Critères de construction	Description	
Type de corps	monobloc	
Source d'énergie	batterie	
Technique de fabrication	impression 3D	
Type d'assemblage	démontable	
Prix max	3000 €	

TABLEAU 2.1. – Cahier des charges du robot hexapode à concevoir à des fins académiques et de publication en open source <https://github.com/IlyaBrod/Pohod15>.

En dehors des aspects biologiques, plusieurs contraintes ont été fixées en amont de la construction de la patte robotique. Comme l'illustre le cahier des charges Tab. 2.1, fixant le cadre du design, on cherche à construire un robot d'une envergure maximale de 70 cm. L'envergure correspond à la distance entre les extrémités des pattes les plus éloignées lorsque le robot est dans sa position de repos. Le robot doit être motorisé électriquement, car c'est une source d'énergie facile d'accès, et qui ne nécessite pas de précautions particulières contrairement aux systèmes hydrauliques et pneumatiques nécessitant des pompes de plusieurs kilos [224]. Le prix du robot doit être modéré, ainsi que la technique de fabrication doit être l'impression 3D. Ceci afin de rendre cette technologie accessible. Comme nous pouvons le constater avec la croissance de l'impression 3D au cours de ces dix dernières années [225], plus une technologie est accessible, plus elle évolue vite. L'apparition d'imprimantes 3D à monter soi-même (du type *RepRap* [226]), ont eu un impact colossal sur le prototypage rapide réalisé dans les laboratoires de recherche ainsi que pour le grand public. De plus, imprimer une patte de robot augmente sa durée de vie. En cas de rupture, il est toujours possible d'imprimer une nouvelle pièce (Fig. 2.1), voire de l'améliorer en seulement quelques heures. Dans le cas de l'usinage manuel de pièces métalliques, un travail équivalent nécessiterait de mobiliser une main d'œuvre importante pendant plusieurs jours.

Comme le décrit le cahier des charges (Tab. 2.1), le robot désiré est composé d'un corps monobloc, ce qui signifie que l'ensemble des pattes est attaché à une seule pièce. Bien que les insectes aient un thorax composé de plusieurs segments, le but du prototype est tout d'abord d'étudier le design des pattes des robots. Ainsi, afin de comparer les performances du robot résultant à ses concurrents, il est important que le design du corps soit identique. Par ailleurs, le robot doit être démontable, ce qui nécessite de concevoir des pattes composées de nombreuses pièces. Cette contrainte facilite tout d'abord la réparation du robot, mais aussi, le place dans la catégorie des robots composés de plusieurs corps. On ne cherche donc pas à construire un robot de type origami [170, 171] avec des liaisons souples, mais un robot avec une structure rigide, conventionnelle.

2.2. La conception mécanique de la patte

Dans cette partie, nous allons nous intéresser aux différentes étapes de conception d'une patte d'hexapode bio-inspirée (Fig. 2.2). L'idée n'est pas de seulement décrire les étapes d'assemblage d'un prototype fonctionnel, mais de discuter des différents compromis à faire lors de la conception, ainsi que des limites technologiques existantes.

2. Design et fabrication d'une nouvelle patte robotique bio-inspirée

• 2.2. La conception mécanique de la patte

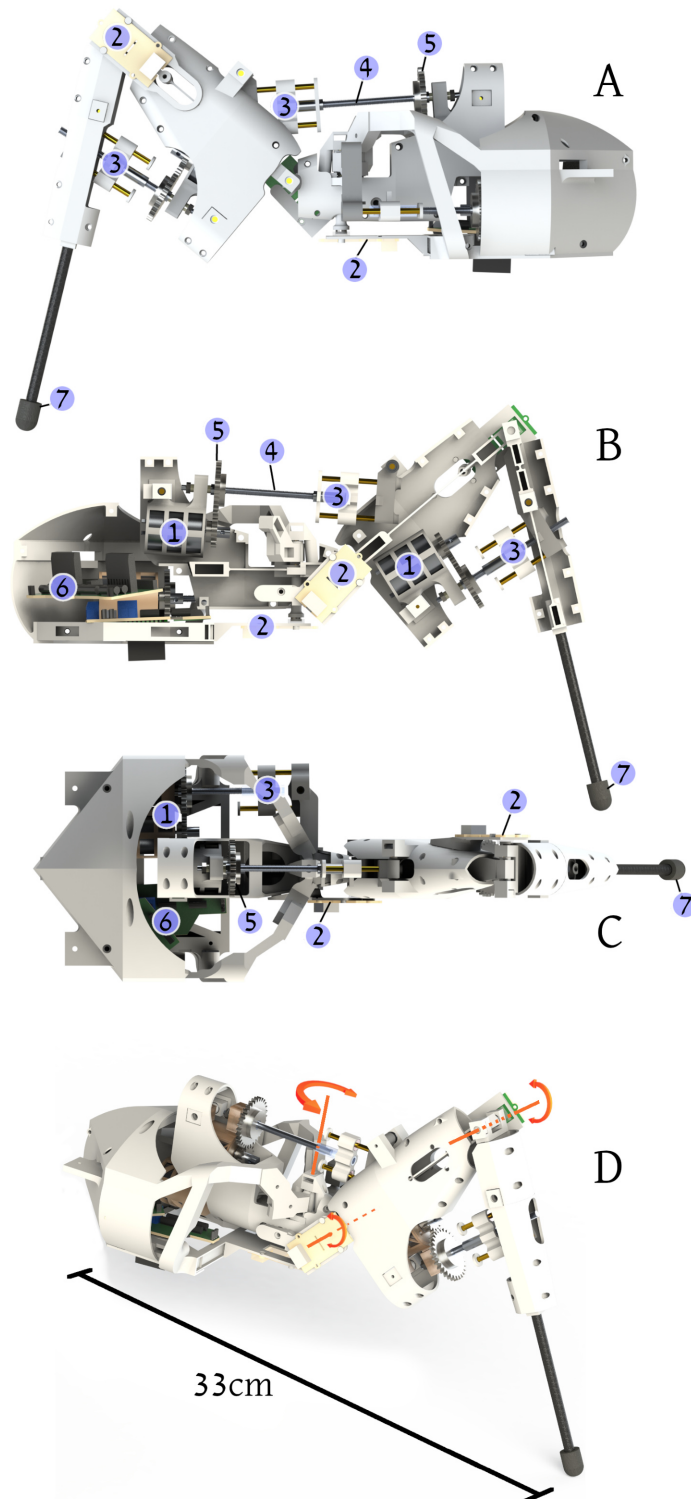


FIGURE 2.2. – Vues CAO de la patte bio-inspirée *Pohod15Leg*. (A) Vue de gauche. (B) Vue de droite en coupe dans le plan médian. (C) Vue du dessus. (D) Vue en perspective avec les degrés de liberté en orange. ① Moteur CC ② Capteur angulaire ③ Capteur de force ④ Vis sans fin ⑤ Roue dentée droite ⑥ Circuit de commande ⑦ Bout de patte en silicone.

2. Design et fabrication d'une nouvelle patte robotique bio-inspirée

• 2.2. La conception mécanique de la patte

Les étapes de la conception sont présentées Fig. 2.3. Elles ont été choisies en fonction du cahier des charges. Ainsi, dans notre cas, c'est le choix de l'échelle du robot qui est la première étape de la conception. En effet, l'objectif visé est de pouvoir comparer les performances du robot résultant aux robots déjà existants de même catégorie. Ainsi, les dimensions sont la priorité de la conception. Néanmoins, lors du design d'un robot hexapode, il est tout à fait possible de procéder aux étapes dans le sens inverse. On peut partir des performances désirées pour en déduire la structure mécanique du robot.

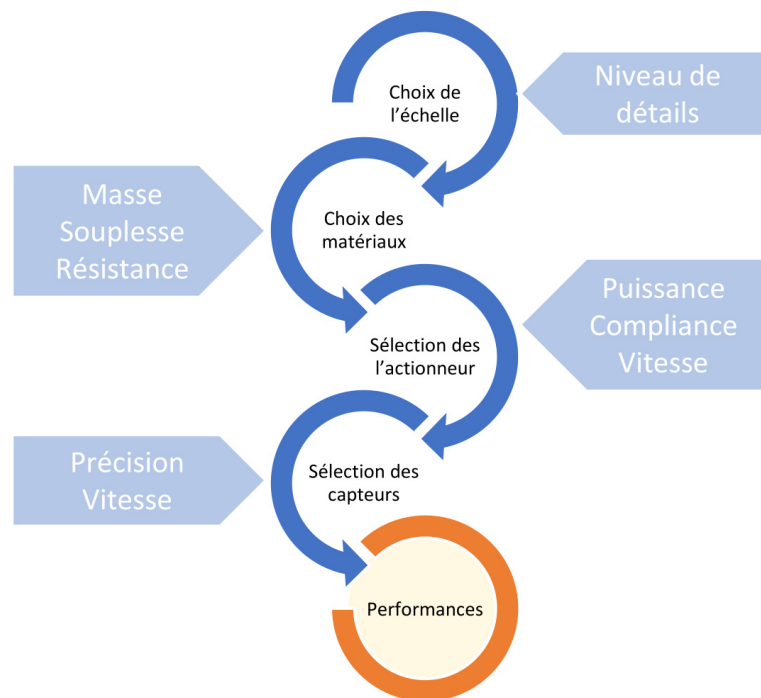


FIGURE 2.3. – Étapes de fabrication d'un robot hexapode.

2.2.1. L'échelle du robot

La première étape de la conception de l'hexapode est le choix de sa dimension (Tab. 2.1). Travailler à grande échelle, permet de mettre en évidence plus facilement les détails de la morphologie. Cela permet aussi d'intégrer une motorisation plus encombrante avec une plus large gamme de choix. Par exemple, dans le cas où l'on souhaiterait implémenter des muscles artificiels [227], il est impératif de travailler avec des robots d'au moins de l'ordre du décimètre, car de nos jours ces technologies n'ont pas encore été miniaturisées [205]. De l'autre côté, travailler à une échelle réduite, centimétrique, permet de se rapprocher de l'échelle de l'animal. C'est donc le but recherché, car certains comportements peuvent être seulement utiles à une échelle particulière. Prenons l'exemple du coût énergétique du transport (CoT). Dans le cas des insectes, le CoT atteint des valeurs élevées (de l'ordre de $160 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ pour les fourmis [157]).

2. Design et fabrication d'une nouvelle patte robotique bio-inspirée

• 2.2. La conception mécanique de la patte

Cependant, cette perte d'énergie élevée ne les freine pas à parcourir plusieurs centaines de mètres [228], autant que les autres animaux ayant un CoT bien inférieur ($31 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ pour le rat [135, 229]). Ils ont donc appris, à leur échelle et selon l'espèce [230], à s'adapter pour optimiser au maximum leur locomotion. Comme en variant la longueur de leurs pas [231] et leur vitesse [222] en fonction du terrain. La locomotion est soumise à des contraintes de l'environnement, des forces extérieures, définies à l'échelle de l'animal. De même que pour les insectes, l'être humain n'adopte pas les mêmes optimisations de marche qu'un quadrupède, tel que le cheval [67]. Néanmoins, fabriquer des modèles de robots réduits est complexe. Cela nécessite des technologies précises à l'usinage de pièces, ce qui peut entraîner une augmentation du coût de fabrication. Ceci est le cas des robots fourmis *BionicANT* développés par Festo [41], faisant seulement 15 cm de long. Leur design compact a été rendu possible grâce à une nouvelle technique de réalisation de circuits électroniques. Une méthode, qui consiste à déposer des pistes directement sur le corps du robot, ne nécessitant pas de surface de support additionnel, donc réduisant l'encombrement.

Dans ce projet, le modèle biologique choisi pour l'hexapode est la fourmi *Cataglyphis*. Ainsi, définir l'échelle de construction du robot, sous-entend, que chaque segment de patte doit respecter, au facteur d'échelle près, la morphologie de cette espèce de fourmi. Nous avons choisi de construire un modèle de robot 30 fois plus grand que la fourmi [163]. Une échelle similaire à la majorité des hexapodes actuels (voir Tab. 1.1). La dimension du thorax mesurée sur la fourmi, de 4,2 mm [163], est donc équivalente à un corps de 135 mm. Le tableau 2.2 donne les relations entre les segments des pattes de la fourmi avec la patte du robot.

Segment	R1 [mm]	R2 [mm]	R3 [mm]	Pohod15Leg [mm] (valeur réelle)
Coxa-trochanter	1	0,8	1,3	24 (27)
Fémur	2,7	3,4	4,2	102 (117)
Tibia	3,9	5	6,9	180 (206)
Tarse	0,9	1	1,4	-

TABLEAU 2.2. – Table des relations d'échelle entre la patte d'une fourmi *Cataglyphis fortis* ouvrière [163] (mesures réalisées sur un seul individu) et de la patte *Pohod15Leg*. R1 est la patte avant droite, R2 la patte du milieu et R3 la patte arrière. La patte du robot est calculée à partir de R2, avec un facteur d'échelle 1 :30. Le tibia du robot est égal à la somme du tibia et du tarse de la fourmi, afin de compenser la perte de hauteur du corps. Entre parenthèses, les valeurs réelles utilisées pour confectionner le robot.

Il est important de remarquer, que Tab. 2.2 indique les dimensions cibles des segments de la patte du robot, ainsi que les dimensions réelles. En effet, malgré un choix d'échelle initial, une marge d'erreur sur la longueur des segments doit être envisageable. Il y a un compromis à faire, entre l'échelle désirée et l'échelle minimale nécessaire. Dans notre cas, l'échelle réelle de la patte de 1 : 35. Cet écart favorise l'insertion correcte des actionneurs et des capteurs encombrants.

2. Design et fabrication d'une nouvelle patte robotique bio-inspirée

• 2.2. La conception mécanique de la patte

En ce qui concerne l'allométrie au sein d'une même espèce de fourmi, on peut remarquer qu'une grande variété de morphologies existe [164]. La dimension des segments des pattes dépend de leur sexe, de leur âge, ou de leur fonction (ouvrière, reine, soldat) [232, 163]. Vis-à-vis du niveau des détails désiré, le choix de l'individu est arbitraire. Nous avons choisi une fourmi *Cataglyphis fortis* ouvrière [163]. Ces fourmis possèdent des pattes longues, ce qui est pratique pour un robot équipé de capteurs volumineux. Le robot évitera donc la collision de son corps avec le terrain, surtout lorsqu'il est irrégulier. De plus, pour un même individu, les pattes avant, du milieu ou arrière ont aussi des dimensions différentes (Tab 2.2). Afin de construire un robot proche de l'animal modèle, il faut en théorie construire trois paires de pattes différentes (exemple *Drosophibot* [25, 26]). Dans le cadre de ce projet, ayant pour but de construire une patte unique, c'est la patte du milieu *R2* qui a été choisie. Elle possède une longueur moyenne entre la patte avant et arrière, et est réservée uniquement à la marche. Chez les insectes, les pattes avant peuvent être utilisées pour manipuler des objets [114]), rechercher un chemin [233] et les pattes arrières sont plutôt dédiées à la propulsion lors de la marche sur un terrain incliné [234].

En résumé, dans le but de comparer les performances d'une patte bio-inspirée aux pattes conventionnelles des autres robots hexapodes, nous conservons une échelle typique de 1 : 30 (voir Fig. 1.8). Pour les mêmes raisons, la patte construite a trois degrés de liberté, ainsi que les segments de la coxa-trochanter et tibia-tarse fusionnés.

2.2.2. Le choix des matériaux

La seconde étape de la conception de notre patte bio-inspirée, est le choix des matériaux utilisés pour la construction de la structure mécanique. Cette étape consiste aussi à définir la forme de l'armature des segments constituant la patte, car elle dépend des propriétés des matériaux utilisés.

L'armature de la patte

Les technologies de microtomographie à rayons X étant des techniques récentes d'étude de la morphologie des insectes [114, 159, 179], on ne dispose pas encore de données exploitables offrant la possibilité de reproduire à l'identique les détails de la patte des fourmis. Cependant, les dernières études des microtomographies de fourmis *Messor barbarus*, ont révélées la chaîne cinématique complexe de leurs pattes [159]. Ces données, permettent de définir l'amplitude articulaire que doivent avoir les liaisons de la patte du robot (Tab. 2.3), une amplitude déterminée par sa structure mécanique.

Le tableau 2.3 présente plusieurs valeurs d'amplitude pour les articulations d'une fourmi. Tout d'abord, nous avons les valeurs autorisées par l'exosquelette de l'insecte (valeurs *R1*, *R2* et *R3*), puis, sont indiquées les amplitudes réellement exploitées par la fourmi au cours de la marche (*R2_{marche}*). Ce seront ces valeurs-là qui seront la cible de notre design. Comme le décrit le Tab. 2.3, l'armature du robot choisie permettra des mouvements plus amples que ceux nécessaires à la marche d'une fourmi, sauf pour l'articulation *Trochanter-fémur (TrF)*. Bien que la structure mécanique choisie tolère des mouvements de 90° des articulations *TrF* et *FTi*, l'amplitude indiquée pour

2. Design et fabrication d'une nouvelle patte robotique bio-inspirée

• 2.2. La conception mécanique de la patte

Liaison	$R1$ [deg]	$R2$ [deg]	$R3$ [deg]	$R2_{marche}$ [deg]	Pohod15Leg [deg]
ThC	80	100	105	26	68
CTr	180	120	130	31	-
TrF	130	180	120	53	43
FTi	160	165	190	74	77

TABLEAU 2.3. – Amplitudes des articulations d'une patte de fourmi en flexion. Données extraites de ARROYAVE-TOBON, DRAPIN, KANIEWSKI et al. [159], 2022. $R1$ est la patte avant droite, $R2$ la patte du milieu et $R3$ la patte arrière. ThC : thorax-coxa, CTr : coxa-trochanter, TrF : trochanter-fémur, FTi : fémur-tibia. $R2_{marche}$ représente les angles extrêmes de la patte du milieu lors d'un cycle de marche.

la patte *Pohod15Leg* tient compte des limites de la motorisation. Ainsi, plus on avance dans les étapes du design (Fig. 2.3), plus il y a de facteurs limitants. Dans notre cas, cette limite angulaire doit être compensée par le contrôle de la patte, en ajustant la trajectoire lors de la marche.

La morphologie des fourmis ne se limite pas seulement à un seul degré de liberté par articulation. L'exosquelette des *Messor barbarus* autorise des mouvements selon les trois axes de rotation [159], ce qui n'est pas le cas de la motorisation des robots actuels possédant que des liaisons pivot. Une possibilité serait de remplacer les pivots à base de roulements par des liaisons souples (exemple de prototype Fig. 2.4A). Ainsi, des mouvements additionnels sont possibles passivement, sans rajout de d'actionneurs additionnels. Cependant, l'utilisation de liaisons souples en polymères, imprimées en 3D, n'est pas recommandée [235]. Après une utilisation répétée, de telles pièces présentent du fluage et une relaxation des contraintes (modification des propriétés mécaniques). De plus, peu d'informations sur leur durée de vie sont disponibles. Par conséquent, dans le design choisi, l'armature possède des articulations à base de roulements à billes et d'axes en laiton.

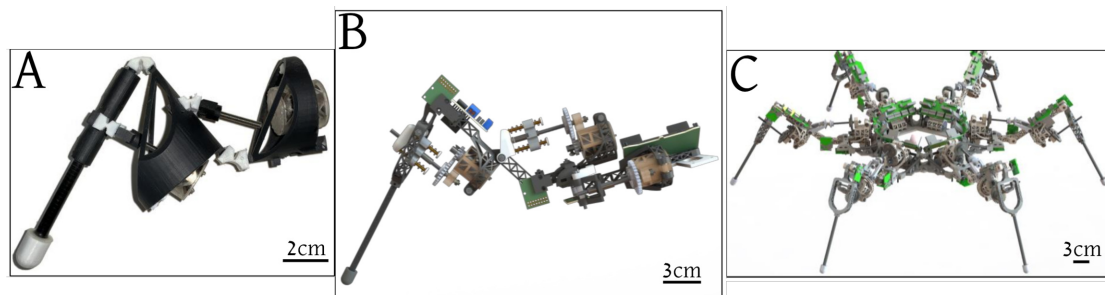


FIGURE 2.4. – Différentes armatures de pattes de robot. (A) Photographie d'une patte avec des liaisons souples. Ces liaisons correspondent aux pièces blanche. (B) Patte avec une armature en maille. (C) Modèle 3D d'un robot hexapode construit à partir de pattes à armature en maille.

2. Design et fabrication d'une nouvelle patte robotique bio-inspirée

• 2.2. La conception mécanique de la patte

Définir l'armature de la patte, consiste également à définir l'agencement des segments. La morphologie des pattes d'insectes possède une géométrie en zig-zag (Fig. 1.8). Cet agencement particulier réduit l'effort nécessaire au déplacement et par conséquent la consommation énergétique de la marche [70]. Afin de visualiser l'influence de l'angle entre le thorax et la coxa sur les performances du robot, nous avons réalisé une simulation du mouvement de patte [236]. Cette simulation estime la consommation énergétique du robot complet (Fig. 2.5) (les détails de la méthode sont présentés dans le chapitre 3 et en annexe C).

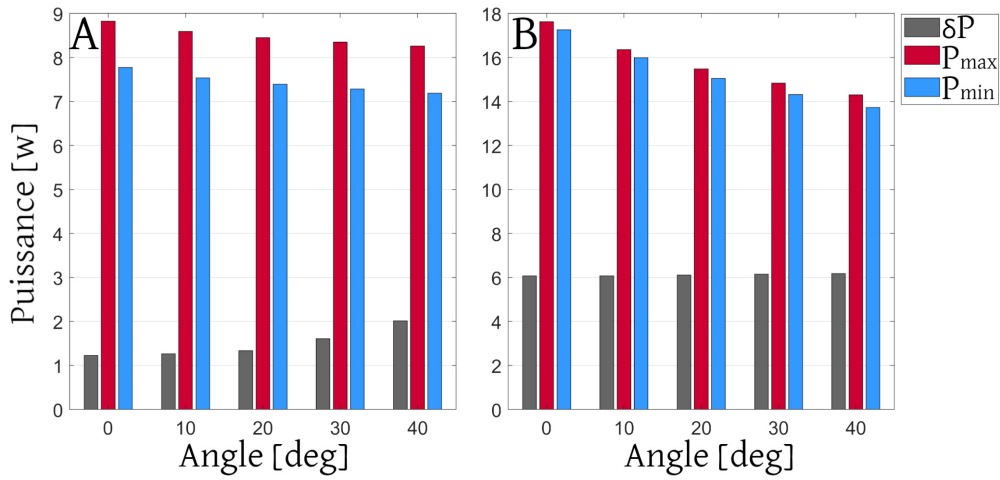


FIGURE 2.5. – Comparaison du profil énergétique d'un robot hexapode sous différentes inclinaisons de pattes entre le thorax et la coxa. δP est la différence des puissances consommées entre les trois moteurs des pattes. P_{max} est la puissance consommée maximale. P_{min} est la puissance consommée minimale. (A) Cas d'un rapport cyclique de β égal à 0,5. (B) Cas d'un rapport cyclique de β égal à 0,7.

La figure 2.5 décrit la variation de trois indicateurs énergétiques en fonction de l'angle d'inclinaison des pattes d'un robot hexapode. Le premier indicateur est δP (Eq. 2.1). Cette valeur représente la répartition de la charge entre les trois moteurs de la patte du robot. Plus δP est petit, plus la charge entre les moteurs est équilibrée. Plus δP est grand, plus grand est le déséquilibre entre les moteurs. C'est-à-dire, que l'un des moteurs est plus mobilisé que les autres.

$$\delta P = |P_1 - P_2| + |P_1 - P_3| + |P_2 - P_3| \quad (2.1)$$

Dans le cas d'un rapport cyclique β égal à 0,5, plus l'angle d'inclinaison de la patte est grand, plus les moteurs sont déséquilibrés. Cependant, dans le cas d'un rapport cyclique plus grand (β égal à 0,7), pour l'ensemble des angles, la sollicitation des moteurs sur un cycle de marche est constante. Si maintenant, on regarde la puissance mécanique maximale P_{max} et minimale P_{min} nécessaires à la marche, leurs valeurs décroissent avec l'augmentation de l'angle des pattes. Pour β égal à 0,5, on a une diminution de 0,6 W. Pour une β de 0,7, la diminution est de 3,3 W. On

peut ainsi dire, que la morphologie des insectes favorise la réduction de l'énergie mécanique nécessaire à la marche en dépit de l'équilibre des efforts entre les muscles. Cette particularité est souvent ignorée chez les robots hexapodes actuels (Tab. 1.1), qui possèdent très fréquemment des pattes horizontales. Étant un caractère facile à implémenter sur un robot, le prototype *Pohod15Leg* reprend le zig-zag, par un rajout d'une inclinaison de 35° entre le thorax et la coxa, ce qui correspond à une inclinaison proche de celle des insectes [158, 237, 159].

Description des matériaux

Choisir les matériaux de construction pour la patte de robot signifie aussi, choisir le design de son squelette. Comme nous avons vu précédemment, le cahier des charges (Tab. 2.1) requiert l'utilisation de l'impression 3D lors de la conception, afin de faciliter la réparation, la réplique et la modification du robot. L'impression 3D regroupe plusieurs procédés de fabrication de pièces pouvant utiliser une large gamme de matériaux. Avant de se plonger davantage dans les spécificités des matériaux imprimables en 3D, il est important de faire un bilan du vocabulaire utilisé pour décrire les propriétés physiques de la matière. La figure 2.6, représente le résultat d'un essai de traction, pour un matériau quelconque.

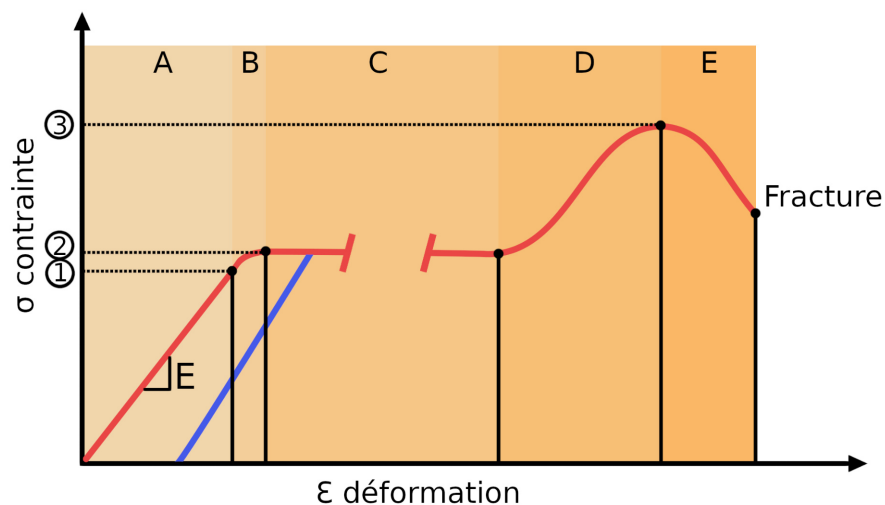


FIGURE 2.6. – Courbe typique d'un essai de traction [181]. (A) Région linéaire. (A & B) Région élastique. (C) Région parfaitement plastique. (D) Région de durcissement. (E) Région de rétrécissement de la section. ① Limite de linéarité. ② Limite d'élasticité. ③ Résistance maximale à la contrainte. E Module de Young. En bleu est représenté l'effet d'écrouissage.

La courbe Fig. 2.6 représente l'élongation du matériau testé, lorsqu'il est soumis à une contrainte de traction progressivement croissante. Par exemple, une tige en acier que l'on étire. Tout d'abord, le matériau se trouve dans la zone linéaire (zone A).

2. Design et fabrication d'une nouvelle patte robotique bio-inspirée

• 2.2. La conception mécanique de la patte

On définit alors le module de Young E , décrivant la relation proportionnelle entre la déformation de la tige et la contrainte. En augmentant la contrainte, le matériau commencera à se déformer non-linéairement (zone B). L'ensemble de ces deux régions forme alors la région élastique. Tant que les déformations restent dans ces limites, la pièce mécanique gardera ses propriétés physiques et pourra revenir à son état initial. En sortant de la région élastique, on atteint ainsi la limite d'élasticité (*Yield stress*). À partir de ce point, on entre dans la région plastique (zone C), où une large déformation irréversible survient sous une faible augmentation de la contrainte. En augmentant davantage la traction, le matériau durcit (zone D) jusqu'à atteindre sa résistance maximale à la contrainte ③, suite à laquelle la pièce mécanique se fracture.

À partir du profil de la courbe d'essai en traction (Fig 2.6), plusieurs caractéristiques du matériau peuvent être définies [238] :

— Raideur

La raideur correspond à la capacité du matériau à plus ou moins se déformer en restant dans la région linéaire. Elle est donc définie par le module de Young E . Par exemple, les matériaux tels que le caoutchouc ont une raideur faible ($E = 1 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-2} \text{ GPa}$ [239]). Ils se déforment beaucoup sous une faible contrainte. Une raideur moyenne peut être associées aux os humains ($E = 15 \text{ GPa}$ [240]). Les métaux tels que l'aluminium ($E = 72 \text{ GPa}$ [238]), les alliages d'acier ($E = 207 \text{ GPa}$ [238]), ont une raideur élevée. Ils se déforment peu sous une forte contrainte mécanique.

— Résistance ou rigidité

La résistance d'un matériau reflète sa capacité à faire face à une contrainte élevée. Elle est définie par sa résistance maximale ③. Un exemple de matériau résistant sont les fibres de carbones, pouvant atteindre des valeurs de résistance maximale de 276 MPa (83 MPa pour l'aluminium 1100-0).

— Dureté

Plus un matériau est dur, plus il a une grande capacité à absorber de l'énergie. Cette caractéristique est reflétée par l'aire sous la courbe de l'essai en traction (Fig. 2.6).

— Élasticité

Un matériau élastique est capable d'absorber de l'énergie en restant dans la région élastique et ainsi subir de larges déformations tout en gardant ses propriétés d'origine. L'élasticité est décrite par l'aire sous la courbe, contenue dans la région élastique (Fig. 2.6A).

— Ductilité

La ductilité est la capacité du matériau à avoir une large déformation sans se rompre. Plus un matériau est ductile, plus la courbe d'essai en traction sera longue (Fig. 2.6). La ductilité est souvent donnée en pourcentage, comme défor-

2. Design et fabrication d'une nouvelle patte robotique bio-inspirée

• 2.2. La conception mécanique de la patte

mation relative par rapport à la longueur initiale de la pièce.

— Fragilité

Les matériaux fragiles ont une très faible capacité à résister à de fortes contraintes ou à se déformer. Contrairement aux matériaux ductiles comme les métaux, les matériaux fragiles, par exemple, le verre, ont tendance à se fracturer dès la fin de la région élastique (Fig. 2.6B).

Le choix des matériaux

Idéalement, pour avoir une structure la plus bio-mimétique possible, il faudrait utiliser des matières se rapprochant de la cuticule des fourmis. La cuticule correspond à la paroi externe des insectes, formant un exosquelette composé de trois couches : l'épicuticule, l'exocuticule et l'endocuticule [158]. Différents types de cuticules existent. Elles peuvent être rigides et dures, souples et élastiques. Chaque cuticule a une fonction différente en fonction de leurs propriétés mécaniques et de leur localisation dans le corps. Dans le cas de la mouche, la résiline des cuticules souples a un module de Young compris entre 1 *kPa* et 50 *MPa*, et dans les cuticules dures de 1 *GPa* à 20 *GPa* [241]. Certaines cuticules sont composées de chitine, avec un module de Young supérieur à 150 *GPa* et une densité de 1,3 *g/cm*³ [241, 158]. Les caractéristiques mécaniques sont donc très variées, de plus, elles sont différentes selon l'âge et l'espèce de l'individu. Par exemple, les fourmis ouvrières *Acromyrmex echinator* possèdent une armure de calcite riche en magnésium enveloppant leur exosquelette [242]. Ce renforcement augmente leur le taux de survie aux attaques des autres colonies de fourmis. Des matériaux synthétiques, semblables à la cuticule ont déjà été développés. Par exemple, le *Chitosan-Fibroin*, est un matériau multi-couche, à base de chitine (polymère extrait de crustacés). Il possède une résistance similaire à l'aluminium mais est deux fois plus léger. Les méthodes de fabrication restent, néanmoins, compliquées et chères par rapport à l'impression 3D (environ 60 fois plus cher) pour laquelle une large palette de matériaux et de techniques sont disponibles.

Actuellement, trois méthodes d'impression 3D sont fréquemment utilisées pour le prototypage rapide : le dépôt de fil fondu (DFF), l'impression par stéréolithographie (SLA) et le frittage sélectif par laser (FSL). Dans le cadre de ce projet, pour chacune de ces deux méthodes d'impression, des prototypes des pièces composantes la patte *Pohod15Leg* ont été réalisés.

— Dépôt de fil fondu (DFF)

La technologie d'impression par Dépôt de fil fondu (DFF), développées depuis les années 1988 [243], consiste à déposer de la matière fondue sur un plateau, couche par couche, pour former la pièce désirée [244]. La vitesse de fabrication de cette méthode est relativement rapide par rapport à d'autres technologies. Dans le cas du prototypage rapide à faible coût, les imprimantes telles que l'*Ultimaker S5* [245] ou la *STREAM 30 Ultra* [246], ont une vitesse maximale d'impression théorique allant jusqu'à 300 *mm/s*. À cette vitesse, la fabrication

2. Design et fabrication d'une nouvelle patte robotique bio-inspirée

• 2.2. La conception mécanique de la patte

d'une pièce est généralement comprise entre 1 et 24 heures. Par exemple, les pièces de la patte *Pohod15Leg* (Fig. 2.1), ont été réalisées par DFF. L'impression, incluant la maintenance de la machine et la finition manuelle des pièces, correspond à un temps total de production d'une semaine.

Dans le cas de l'impression DFF, un large choix de matériaux existe avec plus de 280 matières différentes pour l'imprimante *Ultimaker S5* [245]. Parmi ces matériaux, trois sont particulièrement appréciés dans le domaine de l'ingénierie (annexe D1-10) : l'acide polylactique (PLA), l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS) et le copolymère (CPE). En plus du choix des matériaux, les logiciels contrôlant ces imprimantes permettent de modifier la structure interne de la pièce. Par exemple, le remplissage du volume peut être partiel (typiquement à 20 %), ce qui allège la structure finale. Cependant, les nombreuses possibilités offertes par les paramètres d'impression rendent impossibles la simulation par méthode des éléments finis intégrés dans les logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO) [247].

En ce qui concerne la précision de l'impression, elle est fortement impactée par la matière utilisée et le type de buses d'extrusion installée sur l'imprimante. De plus, ce type de machines ne possède que très peu de capteurs d'état, la calibration manuelle a donc un grand impact sur la qualité des pièces imprimées. En moyenne, l'erreur sur les côtes est de l'ordre de $0,4 \pm 0,2 \text{ mm}$ [186].

Cette technologie étant très flexible, elle présente tout de même des défauts. Par exemple, la fabrication d'une pièce par dépôt de matière, qui se refroidit progressivement, peut entraîner un détachement des couches après un certain temps d'utilisation du robot construit. Un autre problème est l'état de surface. En fonction de l'orientation des composants dans l'imprimante, les surfaces peuvent être lisses ou rugueuses et avoir des propriétés mécaniques différentes (annexe D6) [247], un phénomène difficilement prévisible par le concepteur. Cependant, les récents travaux dans le domaine de l'impression DFF visent à pallier ces problèmes. Par exemple, BRION et PATTINSON [248] ont mis en place une méthode de détection des défauts d'impression, grâce à un traitement d'image fait par un réseau de neurones. Une fois les défauts détectés, le logiciel de l'imprimante corrige les paramètres en temps réel.

— Stéréolithographie (SLA)

L'impression Stéréolithographie (SLA) est une technologie datant des années 1984 [249]. Cette technique consiste à polymériser une résine liquide grâce à un laser ultraviolet [244]. En focalisant le laser sur la surface d'impression, s'élevant au cours du processus, on construit une pièce couche par couche. Contrairement à l'impression DFF, cette technique produit des pièces pleines, homogènes, isotropes et avec des surfaces lisses. L'assemblage de structures complexes est donc aisé. Cette particularité est l'avantage principal de cette technique. De plus, l'homogénéité des pièces rend possible les simulations dans les logiciels de CAO.

Les imprimantes SLA, tel que la *Form 2* [250] peuvent utiliser un large choix de matériaux dont les caractéristiques physiques sont très différentes des matériaux

2. Design et fabrication d'une nouvelle patte robotique bio-inspirée

• 2.2. La conception mécanique de la patte

DFF (annexe D11-13). Il existe des résines résistantes aux flammes, résistantes aux chimies agressives, voire même des résines pour l'application dentaire. En fonction des matériaux, la précision d'impression peut être similaire à la technologie DFF ($0,4 \pm 0,2 \text{ mm}$), ou supérieure $0,20 \pm 0,15 \text{ mm}$.

Le processus d'impression par SLA se décompose en trois étapes : l'impression, le bain nettoyant et le durcissement. En effet, la pièce sortante de l'imprimante reste encore souple. Il est donc important, une fois nettoyée, de renforcer sa structure en la plaçant dans un four à ultraviolets. Le temps et la température de ce traitement dépend des matériaux utilisés et a un impact significatif sur les propriétés mécaniques de la pièce. Les documentations techniques fournies par les fabricants, ont tendance à indiquer une valeur indicative pour un couple température-temps de durcissement donné (voir annexe D13).

Le premier désavantage de cette méthode est le temps de fabrication. Pour fabriquer une patte *Pohod15Leg*, entièrement imprimée en résine, il faut deux semaines de production. C'est donc deux fois plus, que pour la technologie DFF. D'autre part, les pièces imprimées étant pleines, elles possèdent une masse élevée. Afin de garder une masse équivalente à la technologie DFF, il est nécessaire de créer une structure maillée (voir patte Fig. 2.4B-C), que l'on doit recouvrir de résine époxy afin de réduire sa fragilité. Un dernier désavantage majeur de l'utilisation des résines est la durée de vie des pièces. Étant donné que leur durcissement est réalisé par traitement ultraviolet, l'exposition à la lumière du jour détériore les pièces. Ainsi, plus une impression est ancienne, plus elle est fragile et finit par se fracturer naturellement.

— Frittage sélectif par laser (FSL)

La troisième technologie d'impression 3D est le frittage sélectif par laser (Frittage sélectif par laser (FSL)). Datant des années 1989 [251], cette technique consiste à fusionner des matériaux (polymères, résines, métaux) présents dans un réservoir sous forme de poudre, pour former la pièce solide [244].

L'impression par FSL est une méthode regroupant les avantages de l'impression SLA sans en garder les inconvénients. Seulement deux étapes de fabrication sont nécessaires : l'impression et le nettoyage, d'où un gain de temps total dans la production des prototypes. De même que pour l'impression résine, les pièces fabriquées sont pleines, homogènes et isotropes. De nombreux matériaux avec des caractéristiques supérieures aux matériaux DFF existent (annexe D14-16). Par exemple, le *PA 12* est un plastique de densité égale à $0,95 \text{ g/cm}^3$, plus léger que l'ensemble des plastiques SLA et DFF dont la densité est typiquement égale $1,3 \text{ g/cm}^3$. Une autre matière intéressante est le *PA-GF*. Ce plastique intègre des particules d'aluminium, ce qui le rend plus raide, restreignant la déformation des pièces sous une forte contrainte. Le module de Young d'un tel matériau est égal à 3800 MPa , contre 2800 MPa pour des résines SLA standards.

Malgré tout, la technologie FSL reste peu accessible. Le processus de fabrication nécessite un environnement confiné pour éviter la dispersion de la poudre toxique. Ainsi, l'usage de telles techniques est pour l'instant réservé aux entreprises spécialisées, comme *Materialize* [252], contactée dans le cadre de ce

2. Design et fabrication d'une nouvelle patte robotique bio-inspirée

• 2.2. La conception mécanique de la patte

projet. Un autre inconvénient du FSL est l'état des surfaces. Sans post-traitement, les pièces sont rugueuses car elles sont issues de la fusion de grains de matière. Cette caractéristique peut engendrer de la friction non-désirée dans certains mécanismes glissants et ainsi réduire le rendement d'un robot.

Actuellement, dans la catégorie des hexapodes bio-inspirés à énergie électrique, d'une envergure allant jusqu'à 70 cm et une masse maximale de 3 kg, l'ensemble des pièces sont fabriquées par impression DFF (voir les robots Tab. 1.1). Malgré les nombreux défauts de cette technologie, elle reste de nos jours la plus accessible et la moins coûteuse. Par exemple, la matière la plus utilisée en robotique est le PLA, ayant un prix autour de 47 €/kg [253]. Ce prix est deux fois plus bas que les résines ou poudres standards, avec des prix autour de 116 €/kg [254, 255]. L'utilisation de l'impression DFF est le choix à faire dans le cadre du développement d'un robot bio-inspiré accessible à faible coût. Ce sera donc la technique utilisée dans le cadre de ce projet pour la construction de la patte *Pohod15Leg* (voir Fig. 2.2). L'ensemble de la structure a été imprimé sur l'imprimante *Volumic STREAM30 ULTRA* avec comme matière la *Volumic ULTRA* (annexe D9).

Il est important de remarquer que, quel que soit le matériau sélectionné, les propriétés mécaniques restent en dessous des caractéristiques de la cuticule des insectes, d'une raideur de 150 GPa et d'une densité égale à $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^3$, mille fois inférieure à la densité des matériaux 3D [241]. Afin de garantir une résistance maximale et une masse minimale de la patte *Pohod15Leg*, nous avons choisi une structure semblable à un exosquelette (Fig. 2.2). Cette approche consiste à avoir une armature d'un grand volume creux, limitant les déformations des segments constituant la patte. On peut prendre l'exemple d'un fémur, soumis à une charge de 200 g à son extrémité. Avec une patte conventionnelle, à armature centrale (Fig. 2.4B), on aurait une déformation théorique du bout du segment jusqu'à treize fois supérieure à celle pour une patte à exosquelette d'une masse équivalente (annexe E).

L'utilisation des impressions SLA et FSL reste pertinente pour quelques éléments du design. Par exemple, la liaison entre le thorax et la coxa de la patte (Fig. 2.2) a été réalisée par FSL avec la matière *PA-GF* (annexe D16). Les expériences menées sur la patte ont montré, que ce composant est l'élément principal qui supporte les chocs au moment de la marche. De plus, comme les autres pièces imprimées en 3D ont tendance à se déformer légèrement, la contrainte exercée sur cette articulation change de direction au cours du temps. La matière *PA-DF* est parfaitement adaptée à ce type d'application, capable de résister à des contraintes allant jusqu'à 51 MPa. Son module de Young de 3200 MPa réduit la déformation de la patte au niveau de la base pour avoir une cinématique proche de la trajectoire désirée. Bien que le matériau *Volumic ULTRA* utilisé pour le reste de la patte ait une résistance supérieure (égale à 61 MPa), l'homogénéité de la pièce est une caractéristique à prendre en compte. Malgré les propriétés physiques des matériaux fournies par les constructeurs, une pièce imprimée par DFF n'atteindra jamais ces valeurs. Des écarts jusqu'à 10 MPa de la résistance peuvent être observés [244]. Le détachement entre les couches est la première raison de rupture d'une pièce.

2. Design et fabrication d'une nouvelle patte robotique bio-inspirée

• 2.2. La conception mécanique de la patte

La figure 2.7 représente les courbes d'essai de traction de différents matériaux pour l'impression par DFF. Ces courbes ont été générées par la méthode de Ramberg-Osgood [256, 257], qui permet d'estimer la courbe d'essai de traction à partir de seulement trois paramètres. En général, les informations techniques fournies par les fabricants ne sont pas suffisantes pour déterminer la résistance maximale des matériaux (annexe D). Cette valeur a donc été approchée par la contrainte maximale d'un essai en flexion.

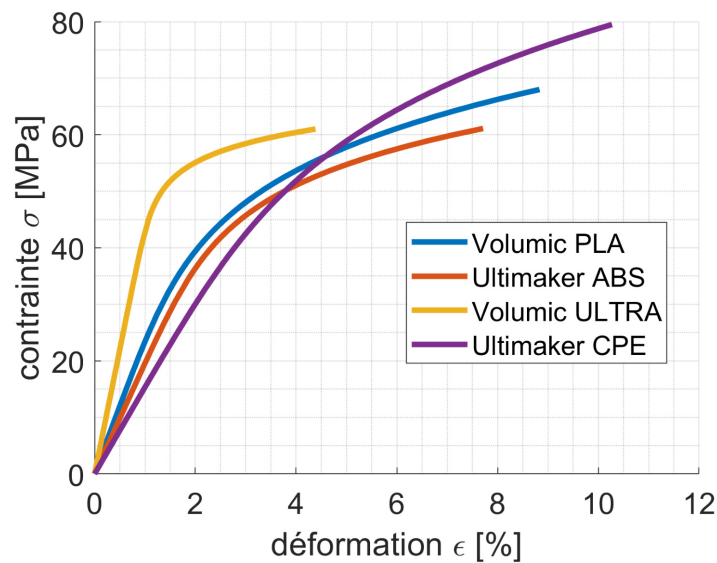


FIGURE 2.7. – Courbes d'essai de traction des matériaux 3D DFF usuels.

Les courbes présentées Fig. 2.7 justifient le choix du matériau utilisé *Volumic ULTRA* pour la construction du robot. Bien que cette matière ait une résistance maximale inférieure au CPE ou à l'ABS (différence de 19 MPa et 7 MPa, respectivement), c'est celle qui est la plus rigide et la moins ductile. Ces deux propriétés sont importantes afin de garantir un contrôle de trajectoire précis et une grande résistance aux chocs du robot. Plus généralement, nous constatons que la différence majeure entre les matériaux utilisés pour l'impression 3D est leur ductilité. Choisir un matériau consiste donc à choisir la déformation maximale souhaitée pour notre application. On peut résumer le choix du matériau aux étapes du diagramme Fig. 2.8.

2. Design et fabrication d'une nouvelle patte robotique bio-inspirée

• 2.2. La conception mécanique de la patte

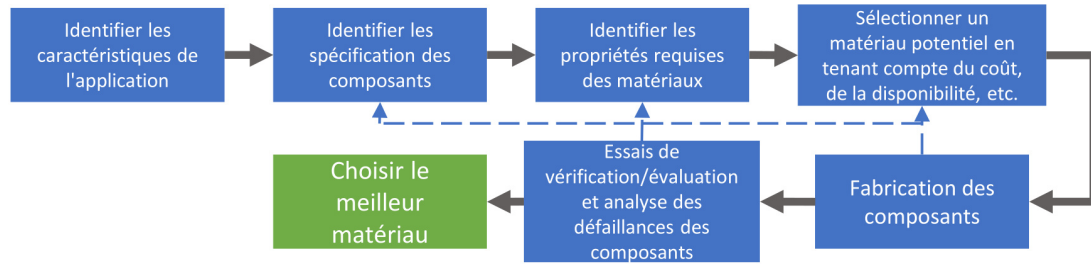


FIGURE 2.8. – Diagramme des étapes de sélection d'un matériau de fabrication. Adapté de JUVINALL et MARSHEK [238]

En-dehors des contraintes de coût, de résistance et de ductilité, une autre propriété requise est la résistance aux températures élevées. En effet, les hexapodes bio-inspirés actuels, tel que *AntBot* [10], doivent endurer des températures jusqu'à 70°C , causées : soit par l'échauffement des moteurs au cours de la marche, soit par l'air ambiant. Bien que les fabricants des matériaux imprimables en 3D indiquent des résistances aux températures élevées, les tests des composants imprimés ont démontrés des différences. Par exemple, d'après le constructeur, le PLA résiste à des températures jusqu'à 180°C . Les essais menés sur les pièces imprimées, montrent qu'à partir de 60°C la pièce se déforme et ne tient plus en place dans l'assemblage de la patte. Il est préférable de s'intéresser à la température de fléchissement sous charge, qui indique la température à partir de laquelle le matériau se déforme, et non la résistance à la température fournie. Dans notre cas, la structure mécanique du prototype de patte bio-inspiré possède des supports moteurs en résine à haute résistance thermique (*FormLab High Temp Resin*, voir annexe D13). Cette résine possède une température de fléchissement sous la charge de $0,45\text{ MPa}$ égale à 120°C , deux fois supérieure aux autres matériaux standards.

2.2.3. Le système moteur

Description générale de l'actionneur

La troisième étape de la fabrication d'un robot, est la sélection d'un actionneur (Fig. 2.3). La majorité des robots hexapodes conventionnels (Tab. 1.1) possèdent un système de motorisation à base de servomoteurs. Pourtant, ces actionneurs ont plusieurs défauts, qui limitent les performances des hexapodes, surtout si l'on cherche à parcourir des longues distances en milieu extérieur. La motorisation du nouveau prototype de patte doit donc pallier le plus grand nombre de problèmes connus.

La solution choisie pour l'ensemble des trois articulations de la patte est l'actionnement par trois moteurs à courant continu à collecteur (voir Fig. 2.2). Ces moteurs ① sont rattachés à un mécanisme vis sans fin - écrou ④ avec un étage de réduction ⑤. Les deux roues dentées multiplient le couple des moteurs par deux afin d'atteindre un couple maximal de $11\text{ N}\cdot\text{m}$, trois fois supérieur au couple des servomoteurs Dynamixel AX-18A équipant les robots conventionnels. En ce qui concerne la vitesse, la liaison hélicoïdale ④ d'un pas de $0,7\text{ mm}$ réduit fortement la vitesse de rota-

2. Design et fabrication d'une nouvelle patte robotique bio-inspirée

• 2.2. La conception mécanique de la patte

tion du moteur. La vitesse à vide des moteurs MABUCHI RK-370CC-14230 étant de 20700 tr/min , la vitesse angulaire maximale d'une articulation de patte est estimée à 56 tr/min (annexe G). Avec cette vitesse de rotation, le robot peut marcher jusqu'à 94 cm/s (estimé à partir du temps d'un aller-retour d'une patte *Pohod15Leg* idéale), validant le critère de vitesse du cahier des charges (Tab. 2.1). Plus particulièrement, le design du mécanisme a été réalisé grâce à un logiciel spécialement développé à cet effet (Fig. 2.9). Il permet d'optimiser manuellement les paramètres définissant l'actionneur (pas de vis, longueur, largeur, hauteur) afin de respecter l'ensemble des critères du cahier des charges.

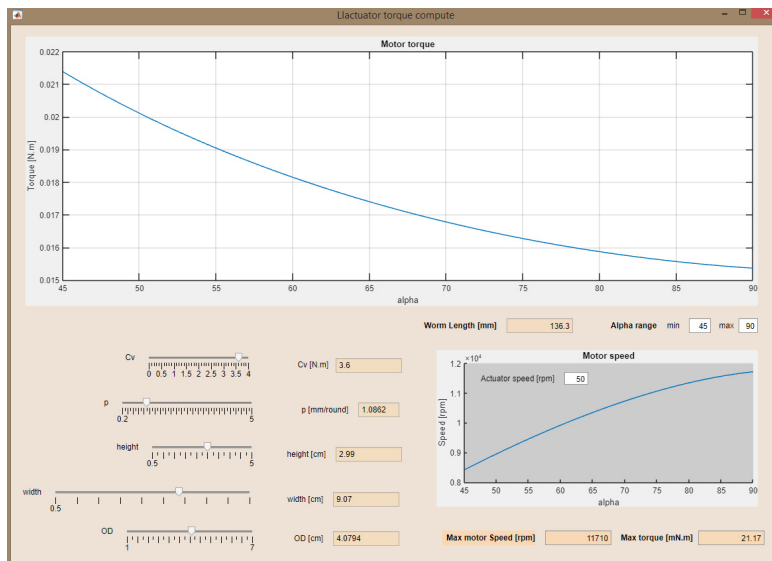


FIGURE 2.9. – Logiciel de dimensionnement de l'actionneur irréversible. Disponible sur Github <https://github.com/IlyaBrod/Pohod15>

Le choix des moteurs peut paraître surprenant. Comme nous avons vu au chapitre 1, les moteurs à collecteur ont un rendement en dessous de 80 % pour les modèles les plus performants [185]. Les moteurs brushless semblent donc être plus appropriés du point de vue des performances énergétiques, ayant un rendement supérieur à 90 %. Le choix des moteurs à collecteur a été retenu pour simplifier la fabrication des circuits de commande et pour maintenir le prix de construction en dessous de la limite des 3000 € imposée par le cahier des charges (Tab. 2.1). Le budget final nécessaire à la construction du robot est égal à 1984 € (voir annexe F). Dans le cas où on aurait utilisé des moteurs brushless *23 06 2200Kv* de *Vertiq*, ce budget s'élèverait à 4276 €.

Dans l'ensemble, cet assemblage constitue un mécanisme semblable aux servomoteurs mais d'une envergure plus large, non enfermée dans un boîtier compact. On améliore ainsi la circulation d'air autour d'éléments rotatifs pour réduire les échauffements produits. Avec ce design, si le robot marche dans un environnement dont les températures atteignent les 40°C , les échauffements seront moindres par rapport aux servomoteurs. L'utilisation de seulement deux roues dentées dans le mécanisme apporte un autre avantage, qui est la résistance aux chocs. Les servomoteurs sont

sensibles aux vibrations. Ils intègrent un plus grand nombre d'étages de réduction, avec des modules très petits (inférieurs à 1) pour garantir une taille réduite en dessous de 1 *cm*. Ils ont donc des dents très fines et fragiles. Dans notre cas, l'utilisation d'un module de 1 définit des roues dentées de grande dimension (un engrenage avec un diamètre extérieur de 17 *mm* et un second de 32 *mm*). Il peut donc supporter des chocs plus importants. En ce qui concerne les matériaux, les imprimantes 3D actuelles ne permettent pas d'obtenir un résultat convenable au niveau de la finition de la denture. Par conséquent, la patte intègre des engrenages moulés en delrin, disponibles dans le commerce. En plus des pièces imprimées, des tiges en carbone ont été rajoutées pour renforcer le tibia.

L'irréversibilité de la motorisation

En plus des problèmes thermiques, les servomoteurs sont des actionneurs à faible rendement énergétique. Leur conception est telle qu'ils consomment continûment de l'énergie même en gardant une position statique. Par exemple *AntBot* [10] (Tab. 1.1), consomme à l'arrêt jusqu'à 1,7 A, un courant équivalent à la consommation d'un moteur en marche à puissance maximale. Les animaux ont aussi une consommation constante d'énergie (énergie basale) [258] utilisée pour faire fonctionner les organes vitaux. Afin de réduire cette perte énergétique, surtout dans les muscles, certains êtres vivants se sont adaptés [259]. Par exemple, des structures en pantographe qu'on retrouve dans la morphologie des ailes ou dans le bec des oiseaux, réduisant la consommation énergétique jusqu'à 12,3 %. Les mammifères, comme les humains ou les chevaux, ont aussi des mécanismes particuliers : l'articulation du genou. Cette articulation, du fait de l'agencement des ligaments, est capable de se bloquer, permettant ainsi de rester debout sans consommer d'énergie. C'est cette dernière particularité qui a été exploitée dans le système de motorisation de notre prototype de patte. L'utilisation d'une liaison vis sans fin - écrou rend l'actionneur irréversible (détails annexe H). Par conséquent, une fois que les articulations ont atteint la position désirée, elles se bloquent et la consommation énergétique devient nulle. Le robot peut alors consacrer l'ensemble de ses ressources à la tâche demandée, comme la réalisation d'une série de mesures avec un capteur visuel, puis repartir sans avoir perdu en autonomie.

2.2.4. Les organes sensoriels

La dernière étape de fabrication du robot hexapode, est le choix des capteurs proprioceptifs (Fig. 2.3). Ce choix est primordial, car ce sont les capteurs qui donnent la capacité au robot de comprendre son environnement et d'adapter son comportement aux obstacles rencontrés. En robotique conventionnelle, trois groupes distincts de capteurs sont habituellement implémentés sur les hexapodes [260] :

— Mesure de force en bout de patte

La mesure de l'effort en bout de patte peut être réalisée avec un capteur tactile, un capteur de pression, un capteur de couple/force tri-dimensionnel [261] ou un capteur de force compliant à base d'un ressort [48, 22]. L'ajout d'un capteur en bout de patte est simple à réaliser, car cela ne nécessite aucune modification

2. Design et fabrication d'une nouvelle patte robotique bio-inspirée

• 2.2. La conception mécanique de la patte

du corps du robot. Cette solution est donc la plus fréquente en robotique [260]. Le coût de ce type de technologie dépend de la précision du capteur et de son encombrement. Récemment, un capteur de bout de patte à faible coût a été développé [261], mesurant le couple et la force de contact avec le sol. Ce capteur a une valeur de 130 €, presque sept fois moins cher que d'autres capteurs similaires. La mesure de force en bout de patte fournit plusieurs données afin de décrire l'environnement entourant le robot. La mesure de la force de contact indique quelle patte est en appui avec le sol et quelle est la pente du terrain. Avec ces mesures, le robot peut adapter son patron de locomotion et ajuster la planification de sa trajectoire [262].

— Mesure du couple des actionneurs

La mesure du couple des actionneurs est réalisée par la mesure du courant consommé par les moteurs [54, 46, 37, 34] ou en ajoutant un capteur par-dessus la liaison [263, 52]. Ce type de mesure simplifie le design du robot et allège le bout de patte, car elle est directement intégrée dans l'actionneur. La difficulté avec ce type de capteur est l'estimation des forces d'interaction entre l'environnement et le robot. L'estimation est réalisée à partir du modèle mathématique du robot, qui doit donc être le plus précis possible et prendre en compte les propriétés des matériaux utilisés, surtout s'ils sont peu rigides.

— Mesure de la déformation des pattes

La mesure de la déformation des pattes exploite la raideur des segments. Généralement, une faible raideur est considérée comme un désavantage, puisque des pattes raides rendent la marche plus stable. Cependant, les pattes compliantes absorbent mieux l'énergie au moment du contact avec le sol. Le principe de ces capteurs, est de mesurer la déformation d'un segment de la patte (par exemple, le fémur) grâce à une jauge de contrainte [264, 262]. En connaissant les propriétés mécaniques de la patte, il est possible de calculer les efforts extérieurs exercés sur celle-ci. Dans le cas des pattes de type *whegs*, ne possédant aucun capteur, cette solution est la plus adaptée [169, 55, 56].

Le choix du type de capteur est fait en fonction du cahier des charges. Si aucune modification des segments de la patte ne doit avoir lieu, une mesure du couple au niveau des actionneurs est préférable. Si une légère modification est possible au niveau du tarse, les capteurs en bout de patte peuvent assurer une optimisation de la marche sur des terrains accidentés. Dans le cas où le robot posséderait des pattes compliantes, la mesure de leur déformation est suffisante, et il n'y aura pas de nécessité à ajouter de capteurs supplémentaires.

Pour avoir une approche plus bio-mimétique lors du choix des capteurs, il est nécessaire d'étudier les organes sensoriels des êtres vivants. De manière générale, les insectes possèdent trois groupes de mécanorécepteurs utiles à la locomotion [160] (Fig 2.10A). Le premier groupe détecte les mouvements de la patte. L'un d'eux est l'*organe chordotonal*, un ensemble d'une centaine de cellules sensorielles attachées entre deux membres distinctes (par exemple la cuticule et un tendon). L'étirement

2. Design et fabrication d'une nouvelle patte robotique bio-inspirée

• 2.2. La conception mécanique de la patte

de ces cellules au cours de la marche fournit une information sur la position des deux membres rattachés. Le second groupe d'organes sensoriels est responsable de la mesure des efforts extérieurs exercés sur la patte, présent sous forme de poils ou d'épines. Ces poils se penchent dans une direction unique lors d'un contact et signalent ainsi la présence d'un obstacle. Le troisième groupe d'organes sensoriels fournit l'information sur les efforts internes à la patte. Ces mécanorécepteurs sont appelés des *sensilles campaniformes*. Ils sont situés à des endroits stratégiques de la patte [265]. Dans le cas des cafards, 74 % des sensilles sont localisées au niveau du trochanter, puis 11 % à la liaison entre le fémur et le tibia (Fig 2.10B). Il a été montré que ces deux principaux groupes sont responsables de la gestion de la charge et de la propulsion des insectes [266]. Ces mécanorécepteurs mesurent aussi la force de contact avec le sol, et peuvent être utile pour détecter une perte de friction et donc un glissement des pattes [267].

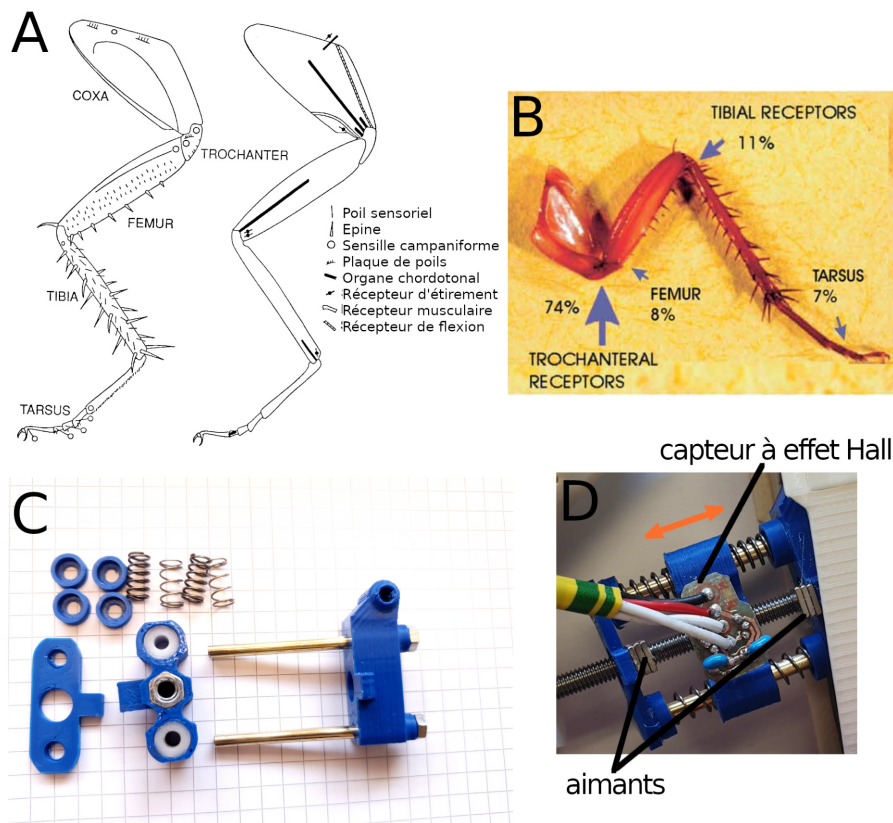


FIGURE 2.10. – (A) Schéma des organes sensoriels chez les insectes et le robot *Pohod15*. Adapté de DELCOMYN, NELSON et COCATRE-ZILGIEN [160]. (B) Localisation des *sensilles campaniformes* chez le cafard. Adapté de ZILL, SCHMITZ et BÜSCHGES [265]. (C) Pièces composantes le capteur de force de la patte *Pohod15Leg*. (D) Capteur de force de la patte *Pohod15Leg* assemblé. La pièce centrale, glissant sur les deux axes en laiton est équipée de deux capteurs à effet Hall. Deux aimants, utiles à la détection de force, sont collés sur les parties latérales du capteur.

2. Design et fabrication d'une nouvelle patte robotique bio-inspirée

• 2.3. Modélisation et commande de la patte

On constate que les types de capteurs implémentés sur les hexapodes actuels sont très éloignés des organes sensoriels des insectes. Aussi bien du point de vue de leur structure que de leur localisation. La mesure de la déformation des pattes compliantes est la méthode qui se rapproche le plus de la nature, car les *sensilles campaniformes* sont des mécanorecepteurs intégrés à la cuticule et sensibles à sa déformation. De récents travaux de ZYHOWSKI, ZILL et SZCZECINSKI [268] (2023) présentent un premier aperçu des avantages que peuvent apporter les capteurs bio-inspirés pour la robotique hexapode. En localisant des jauges de contrainte à l'emplacement des sensilles, on peut améliorer la coordination inter-membre et intra-membre pour l'adapter à des terrains complexes, sans augmenter la complexité de calcul du robot.

Sur la patte *Pohod15Leg*, deux organes sensoriels ont été reproduits (Fig. 2.2). Tout d'abord, des capteurs angulaires ont été mis en place au niveau de chaque articulation (②). Chaque capteur représente un *organe chordotonal*, donnant une information sur la position de l'articulation. Le second type de capteur reproduit la fonction des *sensilles campaniformes* (Fig. 2.10C-D et Fig. 2.2 ③). Il se rajoute par-dessus la liaison vis sans fin - écrou de l'actionneur et elle est constituée d'une partie centrale mobile, glissante sur deux axes et contrainte par des ressorts. Le dimensionnement des ressorts est détaillé en annexe I. En mesurant le déplacement de la partie mobile grâce à un capteur à effet Hall et connaissant la raideur des ressorts, nous pouvons estimer la force exercée au niveau des articulations de la patte. La mesure de l'effort n'est pas réalisée en bout de patte, ni au niveau du moteur, mais bien à l'intérieur de chaque articulation. De plus, l'ajout de ressorts rompt l'irréversibilité de l'actionneur de la patte, et donc rajoute un caractère compliant.

2.3. Modélisation et commande de la patte

Une fois le design mécanique du robot défini avec les performances souhaitées, la commande du robot doit être créée. Dans notre cas, la patte *Pohod15Leg* est contrôlée par le microcontrôleur STM32F411RE (code disponible sur GitHub <https://github.com/IlyaBrod/Pohod15>), qui récupère les données de chaque capteur avec une période d'échantillonnage T_e de 3 ms. Cette mesure est utilisée par le système de contrôle, qui, à son tour, génère le signal de commande des moteurs. Le circuit électronique utilisé pour le contrôle des moteurs est donné en annexe K. De manière générale, le contrôle de la patte se décompose en deux couches logicielles : la première, asservie en position chaque moteur individuellement ; la seconde, est responsable des calculs de la cinématique inverse et de la génération de chemin suivi par la patte. On peut donc dire, que nous avons adopté une approche par l'ingénierie du contrôle (voir chapitre 1, Fig. 1.5). C'est la méthode la plus rapide à mettre en œuvre et qui permet de résoudre plus facilement les erreurs.

2.3.1. Modélisation d'un actionneur

Le modèle mécanique

La première étape de l'élaboration de la commande des actionneurs irréversibles est la modélisation de leur mécanique. Le schéma cinématique Fig 2.11 présente la structure d'un actionneur.

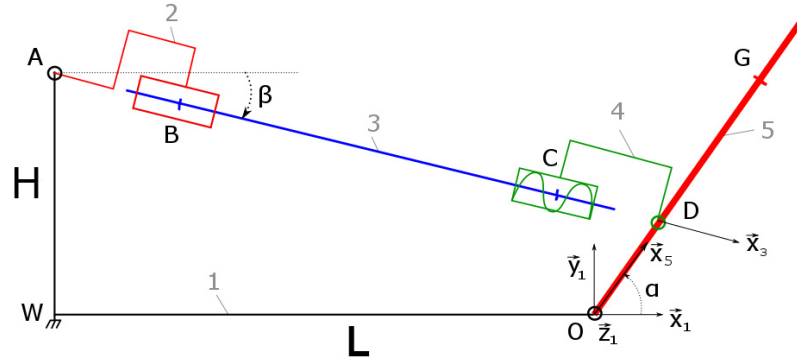


FIGURE 2.11. – Schéma cinématique d'un actionneur irréversible. (H) Hauteur. (L) La longueur. (1) La segment antérieur de la patte. (2) Support moteur. (3) Vis sans fin. (4) Écrou. (5) Segment postérieur de la patte.

L'ensemble de l'actionneur, peut être représenté comme un pivot au point O, autour de l'axe \vec{z} , donc la position angulaire est représentée par l'angle α . À partir de la description cinématique de l'actionneur nous déduisons les relations définissant la dynamique de l'articulation :

1. Le couple moteur C_m

$$C_m = \frac{-p \cdot C_v}{2\pi \cdot OD \cdot \sin(\beta - \alpha)} \quad (2.2)$$

Avec C_v le couple exercé sur le segment postérieur de la patte au point O. Nous déduisons de l'Eq. 2.2, que le moteur choisis (annexe G) donne la possibilité à l'actionneur de produire un couple constant d'une valeur allant jusqu'à $11 \text{ N}\cdot\text{m}$, trois fois plus grand qu'un servomoteur Dynamixel AX-18A (voir Fig. 2.12A).

2. La relation entre l'angle β et α

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{OD \cdot \sin(\alpha) - H}{OD \cdot \cos(\alpha) + W} \right) \quad (2.3)$$

3. La distance entre la base et le bras de levier

$$\vec{AD} = \sqrt{H^2 + W^2 + OD^2 + 2 \cdot OD \cdot (W \cdot \cos(\alpha) - H \cdot \sin(\alpha))} \cdot \vec{x}_3 \quad (2.4)$$

La valeur du vecteur $\|\vec{AD}\|$ est utilisée pour déterminer la longueur maximale de la vis sans fin pour un angle maximal de l'actionneur désiré. Le résultat doit aussi prendre en compte l'encombrement de ces vis, afin d'éviter la collision avec les autres éléments de la patte. Dans notre prototype, les dimensions des vis des liaisons ThC, CTr et FTi sont 50 mm, 72 mm et 60 mm, respectivement. La distance $\|\vec{AD}\|$ ne comprend pas seulement la longueur de la vis sans fin, mais aussi la longueur du capteur et du support moteur (51 mm, 54 mm et 23 mm, respectivement).

4. La position du moteur θ

$$\theta = \vec{AD} \cdot 2\pi / P \quad (2.5)$$

$$\theta = \frac{2\pi}{P} \sqrt{H^2 + W^2 + OD^2 + 2 \cdot OD \cdot (W \cdot \cos(\alpha) - H \cdot \sin(\alpha))} \cdot \vec{x}_3 \quad (2.6)$$

$$(2.7)$$

Avec P le pas de la vis sans fin (0,7 mm).

Comme l'illustre la courbe Fig. 2.12B, représentant la position du moteur θ en fonction de l'angle α de l'actionneur, on peut procéder à une linéarisation. L'estimation de l'angle moteur par une fonction affine se résume à l'Eq. 2.8.

$$\theta_{approx}(\alpha) = -264,9 \cdot \alpha + 7,631 \cdot 10^4 \quad (2.8)$$

5. La vitesse du moteur

$$\vec{\omega} = \frac{2\pi}{P} \cdot \frac{\dot{\alpha} \cdot OD \cdot (W \cdot \sin(\alpha) + H \cdot \cos(\alpha))}{\sqrt{H^2 + W^2 + OD^2 + 2 \cdot OD \cdot (W \cdot \cos(\alpha) - H \cdot \sin(\alpha))}} \cdot \vec{x}_3 \quad (2.9)$$

La relation Eq. 2.9 relie la vitesse de l'angle de l'actionneur α à la vitesse du moteur. La vitesse angulaire à vide des moteurs MABUCHI RK-370CC-14230 étant de 20700 tr/min, la valeur maximale théorique d'une articulation de patte s'élève à 56 tr/min (voir Fig. 2.12A).

2. Design et fabrication d'une nouvelle patte robotique bio-inspirée

• 2.3. Modélisation et commande de la patte

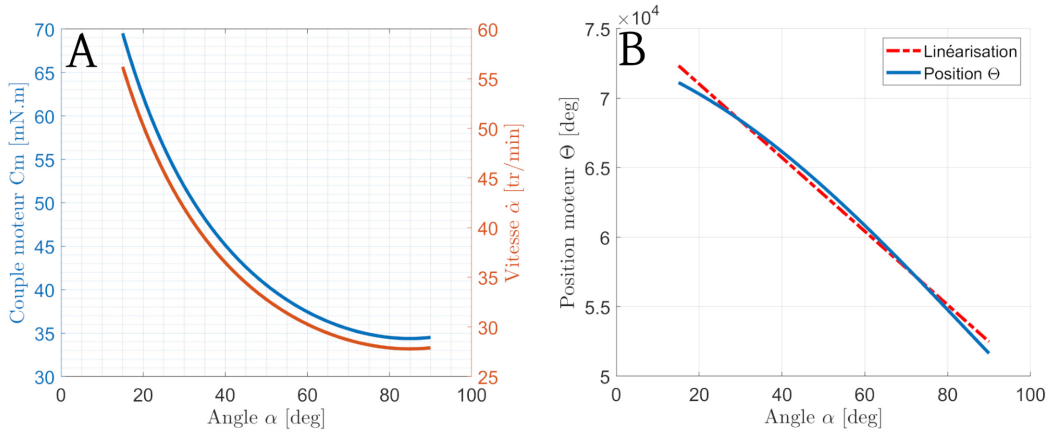


FIGURE 2.12. – Couple, vitesse et position d'un actionneur irréversible. (A-gauche) Couple moteur C_m , lorsque le couple externe C_v appliqué à l'actionneur est égal à $11 \text{ N}\cdot\text{m}$. (A-droite) Vitesse de l'actionneur. Cas où la vitesse de rotation du moteur est constante et égale à 17460 tr/min (vitesse optimale de fonctionnement). (B) Position angulaire du moteur en fonction de l'angle de l'actionneur. Dans l'ensemble des cas présentés les valeurs caractéristiques de l'actionneur sont : $H : 44 \text{ mm}$, $W : 100 \text{ mm}$, $OD : 35 \text{ mm}$, $P : 0,7 \text{ mm}$.

Les détails des calculs de ces équations sont disponibles en annexe J.

Le modèle numérique

Afin de choisir le meilleur algorithme de contrôle des moteurs, il faut tout d'abord définir son modèle numérique sous forme de schéma bloc. La figure 2.13 représente le schéma bloc du système de commande de l'actionneur irréversible.

L'actionneur est commandé en position. Ainsi, la consigne donnée par l'utilisateur α_0 correspond à la position angulaire désirée α . Par la suite, le signal rentre dans la boucle de correction, où la mesure du capteur angulaire est comparée avec la consigne. L'erreur angulaire ϵ est transmise au correcteur, qui, à son tour, calcule la commande du moteur C . Le moteur est modélisé par un système linéaire du second ordre usuel [269], paramétré par ses caractéristiques internes comme sa résistance R , l'inductance L , l'inertie de l'axe J , la constante de couple K_e , le couple résistant C_r et le rapport de réduction G (Fig. 2.13B).

2. Design et fabrication d'une nouvelle patte robotique bio-inspirée

• 2.3. Modélisation et commande de la patte

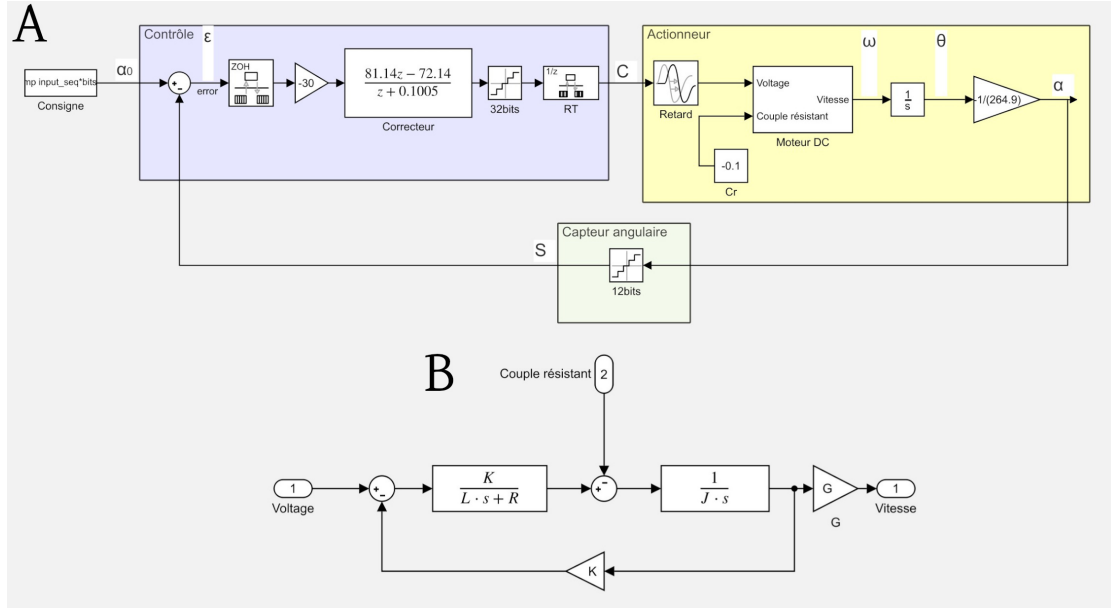


FIGURE 2.13. – Schéma bloc du système de commande de l'actionneur. (A) Boucle d'asservissement en position. (B) Schéma bloc du moteur à courant continu.

Les frottements visqueux sont négligés par rapport aux autres valeurs. L'ensemble de ces caractéristiques internes ont été mesurées expérimentalement, car dans le cas des moteurs à faible coût, les données du constructeur sont souvent incomplètes (voir annexe L). Un gain constant est présent en sortie du moteur, d'une valeur de $-1/264,9$. Ce gain représente la relation entre la position du moteur θ et l'angle de l'actionneur α que nous avons linéarisé (Eq. 2.8). Il est important de remarquer, que dans ce modèle nous n'avons pas représenté le capteur de force. En effet, la première étape du projet est de mettre en place une commande simple, qui pourra par la suite être améliorée (par exemple, en ajoutant un bloc ressort-amortisseur). Dans le cas de la Fig. 2.13, on considère que le capteur est absent. Ainsi, l'actionneur se résume par la fonction de transfert Eq. 2.11.

$$Sys(s) = \frac{G \cdot (K_e - C_r \cdot (L \cdot s + R))}{(L \cdot s + R) \cdot J \cdot s + K \cdot (K_e - C_r \cdot (L \cdot s + R))} \cdot \frac{-1}{264,9} \quad (2.10)$$

$$Sys(s) = \frac{-2.151 \cdot s - 5970}{s^3 + 2773 \cdot s^2 + 3,574 \cdot 10^4 \cdot s} \quad (2.11)$$

Avec s , la variable de Laplace.

Un second modèle numérique a été construit par identification en boucle fermée. Le but est de vérifier l'exactitude du modèle précédemment défini et de trouver une éventuelle simplification de la fonction de transfert de l'actionneur. L'identification consiste à enregistrer la réponse du système α en boucle fermée à une commande C connue. Dans notre cas, nous utilisons un correcteur proportionnel ($P = 30$). Ensuite,

2. Design et fabrication d'une nouvelle patte robotique bio-inspirée

• 2.3. Modélisation et commande de la patte

grâce à l'outil d'identification de *Matlab*®, nous obtenons la fonction de transfert de l'actionneur $T_i(s)$ à partir des données expérimentales (Eq. 2.13), avec une erreur quadratique moyenne normalisée (EQMN) de 8 %.

$$T_i(s) = \frac{Kp}{s \cdot (1 + 2 \cdot \zeta \cdot T_w \cdot s + (T_w \cdot s)^2)} \cdot \exp(-T_d \cdot s) \quad (2.12)$$

$$Kp = 63,8652 \quad T_w = 6,6804 \cdot 10^{-4} \quad \zeta = 0,17151 \quad T_d = 0,11287 \quad (2.13)$$

Avec s , la variable de Laplace.

En observant Fig. 2.14, on peut comparer les deux modèles définis lorsque l'actionneur est soumis à une série d'échelons (différents de la commande utilisée pour l'identification). La figure 2.14A, présente la réponse à un échelon en boucle fermée, avec un correcteur proportionnel. Dans cette situation, le modèle identifié $T_i(s)$ est plus précis, avec une EQMN de 23 % (par rapport à la valeur mesurée sur l'actionneur réel), contre 44 % pour le modèle simulé $Sys(s)$. Dans le cas d'une réponse à une série d'échelons (Fig. 2.14B), le modèle simulé est plus précis, avec une EQMN de 1 %, contre 55 % pour le modèle identifié. Cependant, du point de vue du temps de montée, c'est le modèle identifié $T_i(s)$, qui est le plus proche de la mesure. C'est donc le modèle $T_i(s)$ qui sera utilisé pour l'élaboration de la commande.

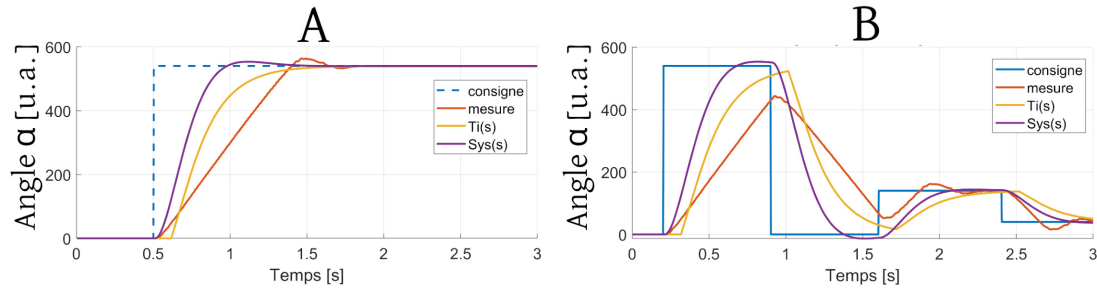


FIGURE 2.14. – Comparaison des modèles numériques de l'actionneur. (A) Réponse en boucle fermée à un échelon, avec une correction proportionnelle ($P = 30$). (B) Réponse en boucle fermée à une séquence d'échelons, avec une correction proportionnelle ($P = 30$).

L'élaboration de la commande

À partir du modèle construit, nous pouvons procéder à l'élaboration de la commande, pour laquelle un grand choix de méthodes est disponible. Pour une approche bio-inspirée, le choix d'une commande d'admittance est le plus adapté [123]. Elle consiste à imposer au système un comportement semblable à une masse rattachée à un ressort avec un amortisseur. Ainsi, la raideur de la patte entière peut être ajustée pour amortir la marche du robot ou restituer l'énergie élastique pour optimiser la consommation énergétique [270]. Pour un système mécanique complexe, il est aussi

2. Design et fabrication d'une nouvelle patte robotique bio-inspirée

• 2.3. Modélisation et commande de la patte

intéressant d'implémenter une commande robuste. Étant donné que les prototypes de robots peuvent avoir des imperfections du design, ou des non linéarités, il est important que le système de commande supporte les variations paramétriques de la fonction du transfert. Par exemple, il existe des méthodes dites robustes, utilisées pour le réglage d'un contrôleur proportionnel, intégral, dérivé (PID) [271]. D'autres procédés d'asservissements existent, comme la commande robuste d'ordre non-entier (CRONE) [272, 273], permettant de modeler la réponse fréquentielle du correcteur pour faire face aux incertitudes. Dans le cas des actionneurs de la patte *Pohod15Leg*, nous allons voir l'implémentation d'un correcteur à avance de phase [269]. Ce type d'asservissement est utilisé dans la majorité des servomoteurs, d'où le choix de cette correction. En effet, si l'on désire vérifier les performances de la structure mécanique et non de la commande, il est important de garder le maximum de similitudes avec le système de référence : le servomoteur. La fonction de transfert du correcteur à avance de phase est définie suivant l'Eq. 2.14.

$$T_c(s) = K \cdot \frac{\alpha \cdot \tau \cdot s + 1}{\tau \cdot s + 1} \quad \text{avec } \alpha > 1 \quad (2.14)$$

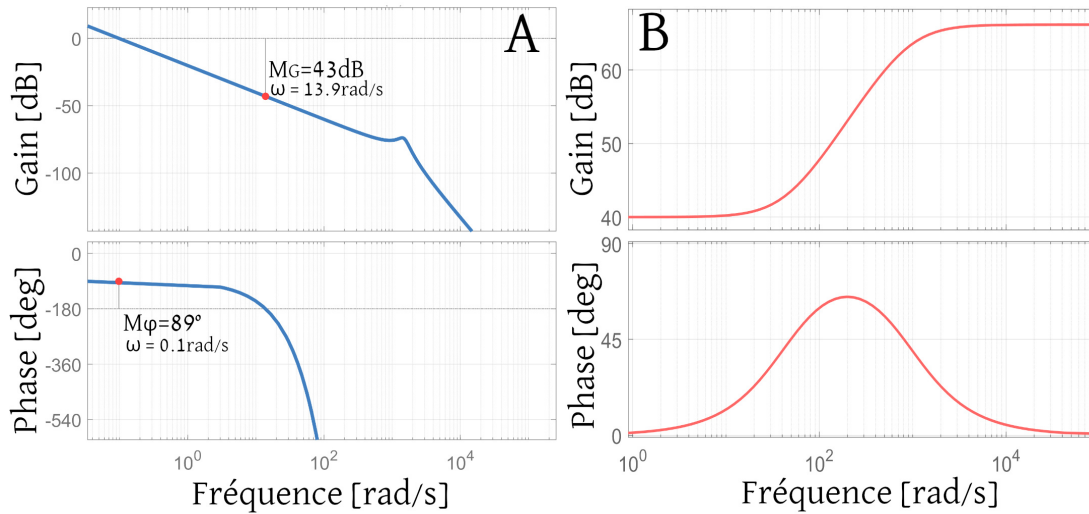


FIGURE 2.15. – Diagramme de bode de l'actionneur. (A) Diagramme de Bode de l'actionneur $T_i(s)$. (B) Diagramme de Bode du correcteur PD $T_c(s)$.

En observant le diagramme de Bode du système Fig. 2.15A, l'actionneur a une marge de gain de 43 dB et une marge de phase de 89°. On désire stabiliser le système et améliorer sa rapidité. Comme la fonction de transfert du moteur admet déjà un intégrateur assurant une erreur de position nulle (Eq. 2.11), l'ajout d'un dérivateur dans les hautes fréquences aide à gagner en marge de stabilité et en rapidité avec un faible influence sur la précision. Grâce au correcteur avance de phase, nous allons chercher à rajouter une phase ϕ_{max} de 65° à la fréquence ω_{max} de 200 rad/s. Le choix des paramètres du correcteur se fait selon l'Eq. 2.15.

2. Design et fabrication d'une nouvelle patte robotique bio-inspirée

• 2.3. Modélisation et commande de la patte

$$\alpha = \frac{1 + \sin(\phi_{max})}{1 - \sin(\phi_{max})} = 20,3465 \quad (2.15)$$

$$\tau = \frac{1}{\omega_{max} \cdot \sqrt{\alpha}} = 11 \cdot 10^{-4} \quad (2.16)$$

$$K = 100 \quad (2.17)$$

Après avoir modélisé le correcteur avance de phase (Fig. 2.15B), on peut étudier son effet en boucle fermée. La figure 2.16, présente la réponse du système avec un correcteur proportionnel et celle avec correcteur avance de phase. On observe que le correcteur à avance de phase (PD) a un temps de réponse plus rapide (0,52 s pour le correcteur PD et 0,9 s pour le correcteur proportionnel P). Nous avons donc réussi à améliorer la rapidité du système. De plus, grâce à ce nouveau correcteur, le rejet de perturbation est aussi optimisé, avec un temps de réponse impulsionnelle de seulement 0,1 s, contre 1,18 s pour le correcteur proportionnel (annexe M).

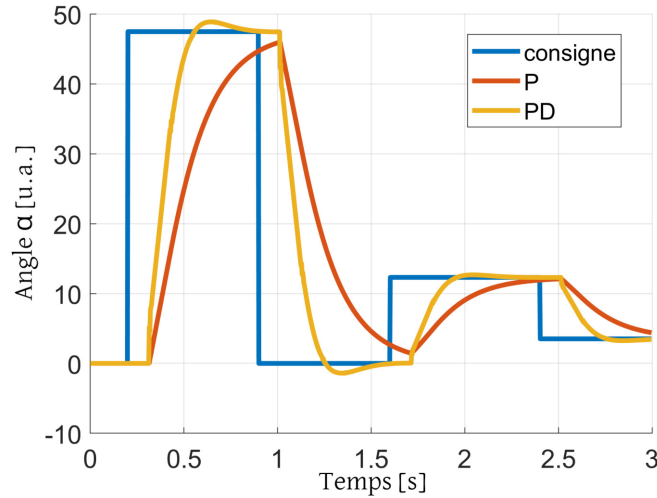


FIGURE 2.16. – Réponse temporelle du correcteur avance de phase (PD). Comparaison à un correcteur proportionnel ($P = 30$).

Une fois le modèle du correcteur défini, il a été implémenté sur le microcontrôleur par la méthode de discrétisation de Tustin (Eq. 2.18). Afin de réduire le temps de calcul par deux, il est possible de réaliser l'asservissement en utilisant la forme canonique décrite Fig. 2.17 [274]. Le programme de cette implémentation est donné en annexe N.

$$T_c(z) = \frac{922,1 \cdot z - 807,1}{z + 0,1501} \quad (2.18)$$

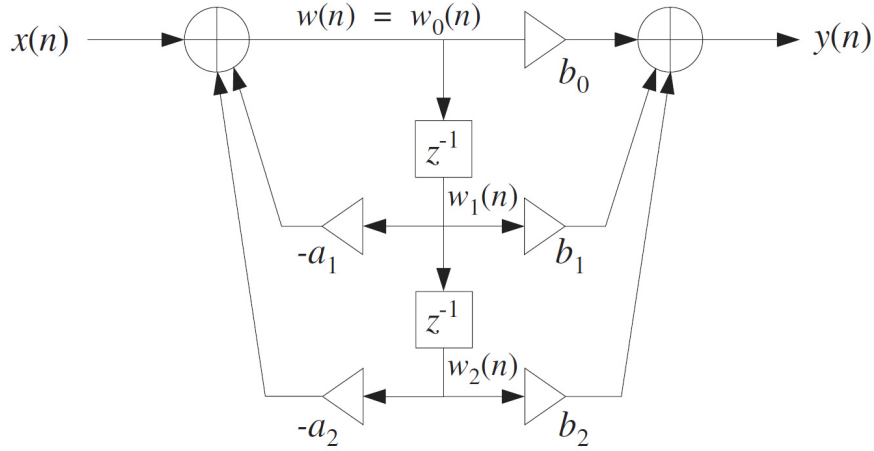


FIGURE 2.17. – Forme canonique d'un filtre IIR de second ordre. Adapté de ORFANIDIS [274]. Les b_i sont les coefficients du numérateur de la fonction de transfert et les a_i les coefficients au dénominateur. $x(n)$ est l'entrée du système, $y(n)$ est la sortie.

2.3.2. Modélisation d'une patte d'hexapode

La modélisation d'une patte d'un hexapode est réalisée en plusieurs étapes. Tout d'abord un modèle mathématique doit être construit pour relier les positions angulaires des moteurs à la position du bout de patte, ce qu'on appelle la cinématique inverse. Puis, une trajectoire de bout de patte est définie, afin de générer la marche du robot. À cette étape, on considère les actionneurs irréversibles comme des boîtes noires, en les représentant sous forme de liaisons pivot. Un modèle simplifié de la patte du robot est représenté Fig. 2.18A.

Modèle cinématique

La définition du modèle géométrique d'une patte de robot, commence par la construction de la table de Denavit-Hartenberg (DH) (Fig. 2.18B) [113]. Cette table regroupe les caractéristiques de chaque segment composant la patte : le type de liaison, le décalage spatial et angulaire par rapport à l'articulation précédente.

2. Design et fabrication d'une nouvelle patte robotique bio-inspirée

• 2.3. Modélisation et commande de la patte

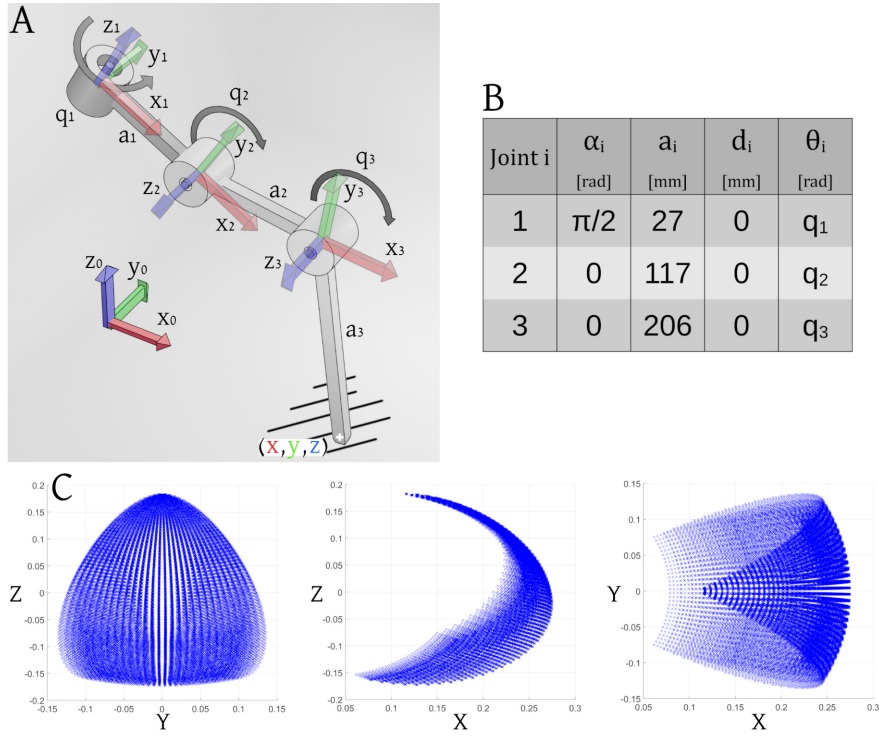


FIGURE 2.18. – Modèle géométrique de la patte *Pohod15Leg*. (A) Modèle simplifié de la patte *Pohod15Leg*. q_i sont les positions angulaires de chaque articulation. (B) Table de Denavit-Hartenberg définissant la patte. (C) Espace de travail de la patte du robot hexapode.

La définition de la table DH, consiste aussi à définir les repères du robot. Le schéma cinématique Fig. 2.18A donne l'orientation des axes de chaque articulation. À partir du schéma cinématique, nous pouvons définir les matrices de transformation, reliant les paramètres angulaires de chaque articulation à la position du repère d'origine, c'est le modèle cinématique direct. La cinématique inverse peut être calculée soit analytiquement, soit approchée numériquement. Dans le cas d'une patte de robot à trois degrés de liberté, il est préférable de faire un calcul analytique, afin de simplifier la commande de la patte. Le calcul de la cinématique inverse est présenté Eq. 2.23.

Soit un point $P(X,Y,Z)$ à atteindre avec l'extrémité du tibia, alors on peut définir X_p et L_i :

$$X_p = \sqrt{X^2 + Y^2} - a_1 \quad (2.19)$$

$$L_i = \sqrt{Z^2 + X_p^2} \quad (2.20)$$

On obtient ainsi l'angle de chaque articulation :

$$q_3 = \text{atan2}(Y, X) \quad (2.21)$$

$$q_2 = \text{acos}\left(\frac{a_2^2 + L_i^2 - a_3^2}{2 \cdot a_2 \cdot L_i}\right) + \text{asin}\left(\frac{Z}{L_i}\right) \quad (2.22)$$

$$q_1 = -(\pi - \text{acos}\left(\frac{a_2^2 + a_3^2 - L_i^2}{2 \cdot a_3 \cdot a_2}\right)) \quad (2.23)$$

Connaissant les limites angulaires de chaque articulation (Tab. 2.3), nous pouvons déduire par cinématique inverse l'espace de travail de la patte (Fig. 2.18C), c'est-à-dire les zones accessibles. Ainsi, la trajectoire de la patte au cours de la marche doit uniquement être comprise dans cet espace.

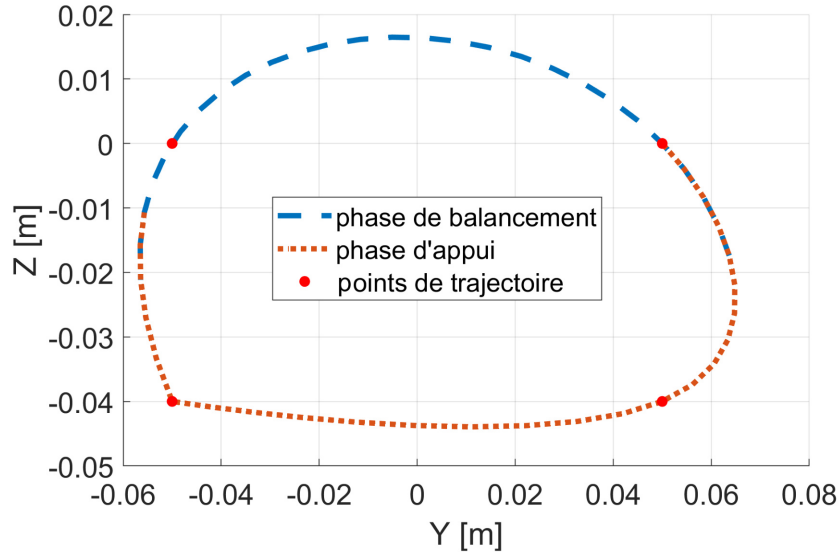
2.3.3. Génération de trajectoire

Une fois le modèle cinématique de la patte défini, nous devons définir la trajectoire de la patte générant la marche du robot. La trajectoire est représentée par une succession de points de l'espace, chacun associé à une valeur temporelle. Dans le cadre d'une approche bio-inspirée, nous pouvons nous demander s'il est réaliste d'implémenter directement une séquence de points issus d'enregistrement d'insectes par capture de mouvements. Cette question sera discutée plus en détails dans le chapitre 3. À ce stade, nous cherchons à définir une trajectoire basique, construite à partir d'une séquence de points (Tab. 2.4) définis arbitrairement, simulant la phase d'appui et de balancement d'une patte.

X	1	1	1	1	1	1
Y	-0,5	-0,5	0,5	0,5	-0,5	-0,5
Z	1	1	1	0	0	1
Temps	0	0,1	0,3	0,5	0,85	1

TAB. 2.4. – Table des points définissant la trajectoire normalisée d'une patte.

Il est important de remarquer que les points Tab. 2.4 sont normalisés. De cette manière, on peut appliquer un facteur d'échelle quelconque en fonction des paramètres définissant la marche : la longueur des pas, la hauteur, et l'envergure de la patte (distance selon l'axe \vec{x}).

FIGURE 2.19. – Trajectoire définie pour la patte *Pohod15Leg*.

Les points principaux définissant la trajectoire sont interpolés par la méthode de spline quadratique [275] afin de garantir la continuité de la position, de la vitesse et de l'accélération et éviter les à-coups lors du mouvement de la patte du robot. La trajectoire ainsi définie est présentée Fig. 2.19.

2.4. Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre, les différentes étapes de la construction d'une patte de robot hexapode bio-inspiré. Bien que l'étude soit limitée à une patte unique, nous pouvons constater que de nombreuses questions surviennent lors de ce processus.

L'échelle du robot a un rôle significatif dans le design, ainsi que sur les performances du prototype construit. De nos jours, il est préférable de construire des robots de grande taille (d'une envergure minimale de 50 *cm*) afin d'avoir un large choix d'actionneurs et de systèmes sensoriels. Plus la taille du robot est réduite, plus ce choix est limité, ce qui oblige à s'orienter vers des technologies complexes. Nous avons donc choisi de construire un prototype de patte de taille moyenne (33 *cm* d'envergure), similaire aux pattes de la majorité des hexapodes actuels.

Les techniques de fabrication de robots par impression 3D, est le choix le plus adapté pour la construction de prototypes à faible coût et à longue durée de vie. Le futur développement de nouveaux matériaux bio-inspirés imprimables en 3D, semblables à la cuticule d'insecte, pourrait avoir un impact majeur sur le développement de robots hexapodes adaptés à la navigation en milieu accidenté. En attendant la naissance de ces technologies, une possibilité serait d'utiliser une large palette de matériaux avec des propriétés mécaniques différentes, afin d'optimiser la morphologie des robots. Là encore, une limite technique survient, car les imprimantes actuelles sont majoritairement limitées à l'utilisation que de deux matériaux simultanément. De

manière générale, malgré la facilité de fabrication des pièces, l'impression 3D reste une procédure expérimentale, ouverte à un grand nombre d'optimisations. Il est important de noter, qu'il existe aussi de nombreux travaux de recherche dans le domaine de l'impression métal [225]. Ces technologies pourraient offrir une plus grande rigidité aux robots et affiner leur structure mécanique.

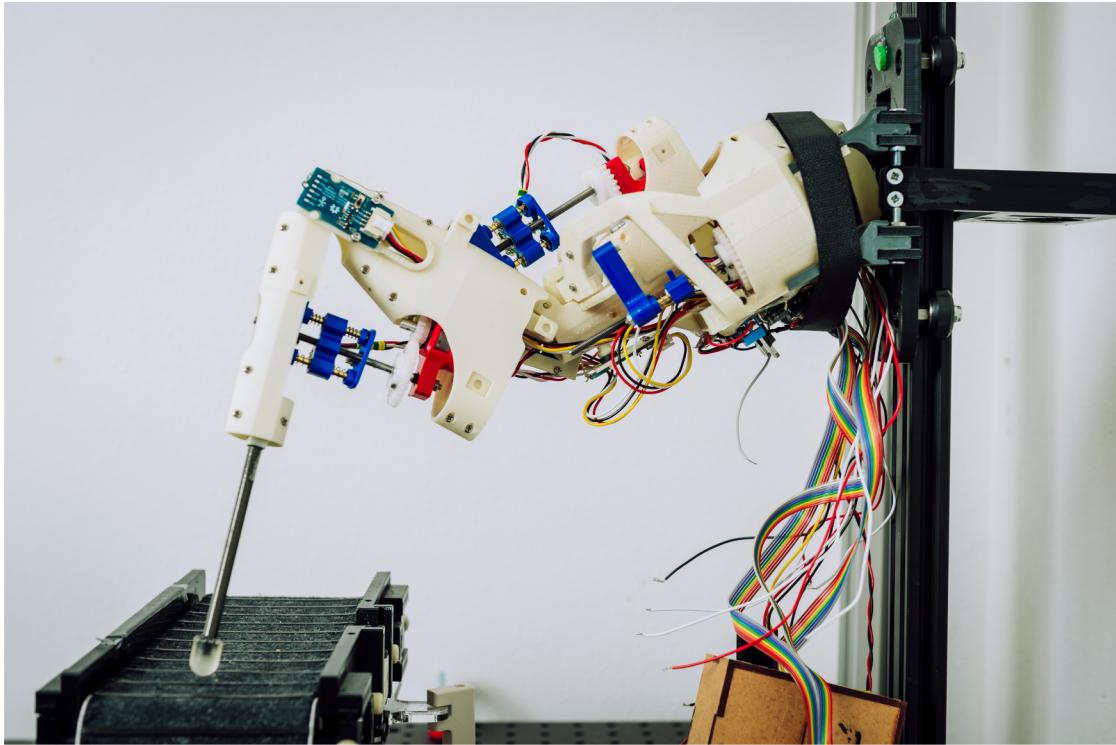


FIGURE 2.20. – Photographie de la patte bio-inspirée *Pohod15Leg*. ©Cyril FRESILLON, ISM, CNRS Photothèque.

Le fil directeur du processus de fabrication d'un robot hexapode bio-inspiré a été la patte *Pohod15Leg* (Fig. 2.20). Ce prototype vise à mettre en évidence les nombreuses possibilités offertes par une patte non basée sur des servomoteurs, tout en trouvant une solution à leurs défauts. Contrairement aux robots conventionnels, la similitude de cette patte avec celle des insectes, ne se limite pas à l'apparence générale. L'armature en exosquelette, garantie une rigidité accrue, faisant face aux défauts des matériaux imprimables en 3D. La liaison irréversible, semblable aux articulations de certains mammifères [259], offre une économie d'énergie non négligeable lorsque l'hexapode garde une position statique. En outre, la mise en place de capteurs de force au niveau des régions des *sensilles campaniformes* procure une information supplémentaire sur les forces intra-membres, essentielle dans le cas où un contrôle bio-inspiré serait implémenté sur le robot [268].

Le prototype actuel de patte pèse 420 g, ce qui conduirait à la construction d'un hexapode d'au moins 2,5 kg. Toutefois, cette patte représente un prototype de base, dont le design de grande envergure peut recevoir de nombreuses améliorations. Par

exemple, l'amélioration des circuits de commande des moteurs, l'ajout de moteurs brushless ou de muscles artificiels (tel que le muscle HASEL [211]) pourrait alléger la structure et la rendre plus performante énergiquement.

Après avoir construit un prototype de patte, la question des performances survient. Est-ce que le nouveau design est plus performant que les modèles à servomoteurs existants? Quelles seront les performances énergétiques du robot complet basé sur le prototype de patte bio-inspiré? Sont-elles similaires à ceux de l'insecte imité? Malheureusement, aucune procédure de mesure normalisée n'existe afin d'évaluer la marche d'une patte de robot et réponse à questions. Par conséquent, le chapitre 3 présente un nouveau banc de test, dénommé *MiMiC-Ant*, permettant d'évaluer les performances d'un robot hexapode à partir d'essais réalisés sur une unique patte.

3. Évaluation des performances d'un robot hexapode

Sommaire

3.1. La mesure des performances d'un hexapode	89
3.1.1. Identification des critères de marche	89
3.1.2. Les techniques de mesure des performances	92
3.2. Le banc de test <i>MiMiC-Ant</i>	94
3.2.1. Structure du banc	95
3.2.2. Les scénarios de mesure	96
3.2.3. Calcul de la puissance consommée	98
3.2.4. Expérimentation sur le robot complet	100
3.3. Évaluation des performances	101
3.3.1. Analyse des caractéristiques générales	101
3.3.2. Analyse du coût du transport	105
3.4. Conclusion	115

Qu'est-ce qu'un robot hexapode performant ?

Afin de définir les performances d'un robot hexapode, il est préférable de s'intéresser à un sujet plus commun, qui est l'étude des performances de l'Homme dans le domaine des sciences du sport. Une performance est définie comme étant le résultat obtenu par un athlète dans le cadre d'une activité sportive [276]. Ainsi, elle doit toujours être associée à une tâche spécifique. Comparer la performance d'un nageur à celle d'un cycliste n'a pas de sens, tant qu'ils ne réalisent pas la même activité. Dans le cas d'une même activité, on peut définir un indicateur de performance, mesurable expérimentalement (par des outils vidéo, des capteurs, ou bien l'analyse du mouvement via les systèmes de *motion capture*). Il reflète le degré de réussite et la capacité maximale à effectuer la tâche. Pour les sprinters, un indicateur peut, par exemple, correspondre à la distance maximale parcourue en dix secondes [277].

Dans le domaine de la robotique, les missions qui sont généralement attribuées aux hexapodes consistent à explorer des milieux inconnus et accidentés. Par exemple, explorer une ville ayant subi un tremblement de terre. Cependant, actuellement, on n'a encore jamais vu de robots hexapodes réaliser des vraies interventions. Leurs performances ne sont pas suffisantes pour ce type de tâches par rapport aux solutions alternatives comme les robots à roues [198]. Toutefois, définir un indicateur de performance semble être plus complexe dans le cas d'une mission d'exploration, que pour une simple activité d'évaluation (marcher à plat, par exemple).

De même que dans les sciences du sport, la première étape consisterait à étudier la tâche à réaliser pour faire le bilan des critères de réussite. Cette étude est réalisée dans la première partie de ce chapitre. Une fois que les indicateurs seront trouvés, il sera nécessaire de mettre en place une procédure de mesure par voie expérimentale. La seconde partie du chapitre est ainsi consacrée à la présentation de notre banc de test, dénommé *MiMiC-Ant*, permettant l'étude des performances des robots hexapodes. Dans la troisième partie, les caractéristiques mesurées des robots hexapodes seront discutées pour identifier les éventuelles pistes d'amélioration de leurs performances.

Tout au long de ce chapitre, nous allons prendre l'exemple d'un robot hexapode conventionnel *AntBot* [10] (Fig. 3.1), équipé de servomoteurs Dynamixel-AX18A. Ce type d'hexapode est fréquemment utilisé pour tester des algorithmes de contrôle bio-inspirés ou des méthodes de navigation [9]. Il est donc nécessaire de vérifier si ce robot convient à la réalisation de ces tâches. La patte d'un tel hexapode sera nommée *AXLeg*. De plus, des comparaisons aux performances d'un robot hexapode bio-inspiré muni des pattes *Pohod15Leg* sera aussi réalisée.

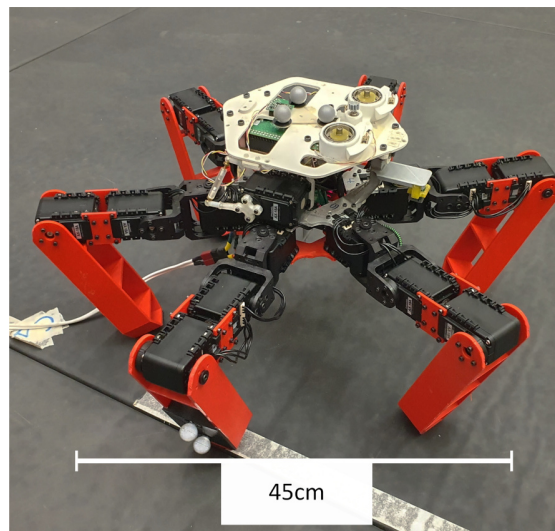


FIGURE 3.1. – Photographie du robot bio-inspiré *AntBot* [10, 27], pouvant naviguer d'un manière autonome grâce aux techniques de navigation des fourmis du désert *Cataglyphis fortis*.

3.1. La mesure des performances d'un hexapode

3.1.1. Identification des critères de marche

La mission d'exploration, généralement attribuée aux hexapodes, peut être décomposée en trois étapes [30, 118, 20, 10]. Tout d'abord, le robot doit parcourir, d'une manière autonome, une certaine distance dans un milieu inconnu. Après avoir atteint la cible, l'hexapode peut accomplir sa tâche, ce qui correspond à la seconde étape de sa mission. La dernière étape, consiste à revenir à son point de départ, soit en passant par le chemin déjà exploré, soit en suivant une toute autre voie. Tout au long de son chemin, un robot hexapode doit faire appel à de nombreuses capacités définissant sa résistance aux perturbations extérieures. Ces perturbations peuvent être physiques, telles que les collisions avec des obstacles ou les irrégularités du terrain; sensorielles, par exemple l'éblouissement d'un capteur par le soleil; énergétiques, telles que les fortes augmentations de température ambiante ou la perte d'autonomie. La réussite de la mission du robot est directement impactée par ces capacités. Par conséquent, définir les performances d'un robot hexapode, consiste à mesurer sa capacité à faire face aux perturbations extérieures. En plus des indicateurs de performance usuels, présentés dans le chapitre 1, nous pouvons établir un inventaire des indicateurs supplémentaires d'un hexapode, moins courants, décrivant son habilité à accomplir des missions d'exploration (Fig. 3.2).



FIGURE 3.2. – Diagramme des indicateurs de performance d'un hexapode dans le cadre d'une mission d'exploration. Les indicateurs sont indiqués en bleu. Les sections du cercle représentent les catégories de performances.

3. Évaluation des performances d'un robot hexapode

• 3.1. La mesure des performances d'un hexapode

— Les indicateurs de robustesse sensorielle

La robustesse sensorielle est une capacité uniquement dépendante des capteurs embarqués sur le robot. Un indicateur de performance associé à la robustesse sensorielle est la résolution du capteur. Par exemple, on peut s'intéresser aux boussoles célestes, utilisées par les robots mobiles pour déterminer le cap de navigation à partir d'une mesure de l'angle de polarisation de la lumière du ciel [214]. Dans ce cas, la robustesse sensorielle serait définie par la résolution du capteur. Dans le cas de l'hexapode *AntBot* [214, 10], la boussole céleste possède une erreur médiane de $0,39^\circ$ sous un ciel dégagé, $0,02^\circ$ sous un ciel changeant, et $0,59^\circ$ sous un ciel couvert. À partir de ces valeurs, on peut dire qu'*AntBot* est plus robuste, que le robot *Sahabot* [278, 214], dont les erreurs médianes respectives sont $3,51^\circ$, $7,18^\circ$ et $47,48^\circ$.

La robustesse sensorielle est aussi définie par la température maximale d'utilisation des capteurs. Dans le cas des capteurs angulaires AS5600 équipant la patte *Pohod15Leg*, la température maximale de fonctionnement est égale à 125°C , ce qui rend possible son utilisation dans des environnements exigeants.

— Les indicateurs de robustesse physique

La robustesse physique correspond à la capacité à faire face aux chocs et à adapter sa marche à la topographie du terrain. Cette capacité a fait l'objet de nombreuses études mises en application sur les robots à pattes [279, 69]. Des métriques, telle que la *marge de stabilité* (voir chapitre 1), sont utilisées pour garantir une marche stable des robots sur les terrains inclinés [148] ou pour adapter la position des pattes afin d'éviter des zones interdites sur le terrain [280]. En outre, dans la théorie du contrôle, il existe plusieurs méthodes d'évaluation de la stabilité d'un système soumis à des perturbations [269], qui peuvent être appliquées soit à l'étude d'un actionneur unique, soit au robot complet. Comme par exemple, le critère de Routh-Hurwitz ou encore l'étude de la stabilité des points d'équilibre au sens de Liapounov [281].

En plus des indicateurs de performance existants, il est possible de définir quelques métriques supplémentaires. La mesure de la force de propulsion maximale du robot (normale et tangentielle) reflète sa capacité à gravir des surfaces inclinées, ainsi que l'amplitude de sa force de traction. La robustesse physique est aussi représentée par la précision spatiale de la cinématique. On définit ainsi des indicateurs, comme l'erreur spatiale de la position des pattes par rapport à la trajectoire souhaitée, ainsi que l'erreur de vitesse de marche. Ces grandeurs permettent d'évaluer l'écart entre le système souhaité et la réalité terrain à l'échelle du robot complet.

— Les indicateurs de robustesse énergétique

La robustesse énergétique est tout d'abord représentée par l'autonomie du robot, qui définit son temps de fonctionnement, donc la distance maximale qu'il peut parcourir. L'optimisation énergétique est cruciale pour les robots possédant de nombreux DDL, comme les robots hexapodes. Une grande partie des études menées sur les robots à pattes visent à réduire cette consommation énergétique.

3. Évaluation des performances d'un robot hexapode

• 3.1. La mesure des performances d'un hexapode

Par exemple, l'optimisation peut être réalisée en choisissant des paramètres de marche adaptés au terrain (hauteur des pas, longueur des pas, rapport cyclique) [145, 282], ce qui réduit la consommation de 22% à 39%. Le choix de l'oscillateur CPG, responsable de la synchronisation des pattes du robot, a aussi une influence directe sur son autonomie [283]. En fonction du type de CPG choisi, le corps du robot oscille verticalement avec une amplitude plus ou moins grande. Plus l'amplitude est grande, plus les pertes énergétiques augmentent. Il est aussi possible d'adapter le type de patron de marche à la vitesse de déplacement de l'hexapode [284]. Par exemple, pour l'hexapode *HexaV4*, se déplacer au rythme métachronal en dessous 0,046 m/s, et en tripode alterné au-dessus de cette vitesse, réduit le coût énergétique de la marche entre 7,7% à 21%.

Pour évaluer l'impact des optimisations de la locomotion cités précédemment, on utilise généralement la résistance spécifique ϵ (Eq. 1.7). Cette grandeur décrit la capacité du robot à effectuer une marche économe en énergie. D'autres indicateurs sont plus rarement utilisés, comme la puissance consommée par le robot.

Également, la robustesse énergétique reflète la capacité du robot à prévenir la surchauffe des actionneurs, qui limite son temps d'utilisation et donc sa distance maximale des trajets. Par exemple, les robots à base de servomoteurs comme *AntBot* surchauffent au bout de 15 min de marche à vitesse modérée. Bien que ses batteries permettent d'effectuer un trajet plus long, sa distance de marche est réduite par la limite de température. Cette particularité des robots n'est que très rarement étudiée chez les hexapodes actuels [65]. Seulement des études traitant de l'influence de la température sur les moteurs ou les capteurs existent [285, 261]. Il est donc nécessaire de définir un indicateur de robustesse énergétique supplémentaire, qu'on appelle le degré d'élévation de température (Degré d'élévation de température (DET)). Il représente la vitesse à laquelle la température augmente jusqu'à atteindre sa valeur maximale, exprimée en degrés Celsius par minute. La mesure de cette grandeur est réalisée via une caméra thermique, qui relève la température du système étudié au cours du temps. Plus le DET est petit, moins la patte chauffe et plus l'autonomie du robot est grande. Cette valeur dépend non seulement des moteurs utilisés, mais aussi des paramètres définissant le patron de marche. Il est important de noter, que d'autres grandeurs plus courantes peuvent être utilisées pour définir la résistance à l'élévation de température du robot, comme la résistance et la capacité thermiques. Bien que l'identification de tels modèles physiques peut être réalisée par des méthodes non invasives (via une caméra thermique [286]), elles sont plus complexes à mettre en application que la méthode proposée mesurant le DET.

Dans la suite de ce chapitre, nous allons nous intéresser uniquement à la robustesse physique et énergétique, pour lesquelles il existe encore peu de méthodes expérimentales pour les évaluer. En effet, la robustesse sensorielle est un sujet largement couvert dans la littérature [287] et est inhérente à la technologie des capteurs choisis, plutôt qu'à la structure du robot.

3.1.2. Les techniques de mesure des performances

Afin d'estimer les performances d'un robot hexapode, il est nécessaire de définir un procédé expérimental adéquat. Dans le domaine de la biologie animale [265, 223], l'étude de l'Homme [288, 289] et celle des robots [290, 52], il existe une grande variété de bancs de test développés dans ce but.

En robotique, on distingue trois catégories de bancs de mesure. La première catégorie vise à identifier le modèle dynamique d'un robot [291, 292]. Par exemple, GARCIA, GALVEZ et SANTOS [292] ont utilisé un banc de test pour évaluer les paramètres du modèle d'une patte du robot *SILO4*, possédant une formulation complexe avec des non-linéarités (Fig. 3.3A). Ce banc de test consiste à simplement attacher la patte à un support fixe et à l'actionner pour couvrir l'ensemble de son espace de travail, tout en mesurant les données de ses capteurs. La seconde catégorie de bancs de test, vise à vérifier les performances d'un robot construit. Par exemple, dans les travaux de GOLDBERG, DOSHI, JAYARAM et al. [293], les auteurs ont construit un banc de test utilisant des caméras à haute vitesse, filmant jusqu'à 6688 images par seconde (Fig. 3.3B). Le développement d'un tel dispositif découle de la capacité du robot testé *HAMR-VI* à atteindre des fréquences du cycle de marche dépassant les 100 Hz. La troisième catégorie de bancs, sont ceux, qui permettent de mesurer les performances énergétiques d'un robot ou de trouver les paramètres de locomotion les plus adaptés [290, 294, 52]. von TWICKEL, HILD, SIEDEL et al. [52] ont construit un banc de test composé d'un tapis roulant passif intégrant un capteur de force (Fig. 3.3C). En disposant une patte de robot sur ce banc, ils ont vérifié que les performances du contrôleur neuronal du robot simulé, générant une marche fluide, correspondent à ceux du robot réel. D'autres bancs de test, comme celui développé par GUARDABRAZO et SANTOS [290] (Fig. 3.3D), consistent à prédire la puissance consommée par le robot en fonction des paramètres de locomotion, telles que la vitesse, la longueur des pas ou la charge transportée.

Du côté biologique, il existe aussi plusieurs bancs de tests utilisés pour l'étude de la marche des insectes. Leur but est de justifier les choix des paramètres définissant la locomotion choisis par les animaux [295, 67]. Par exemple, ZILL, SCHMITZ et BÜSCHGES [265] ont développé un banc de test pour visualiser l'influence du transport de charge sur la réponse neuronale des cafards (Fig. 3.3E). Pour cela, une plate-forme de marche a été équipée d'un aimant, dont la force d'attraction était modifiée par une bobine. Cette étude a notamment souligné l'importance des *sensilles campaniformes*. Des observations similaires ont été réalisés chez d'autres insectes. DALLMANN, DÜRR et SCHMITZ [223], ont utilisé des caméras de capture de mouvement et des capteurs de force pour comprendre l'organisation du contrôle de la posture chez les phasmes (Fig. 3.3F). D'autres insectes comme les fourmis, sont plus difficiles à étudier du fait de leur petite taille. Des dispositifs spécifiques doivent donc être développés. Par exemple, la cinématique des pattes d'une fourmi peut être mesurée par des caméras à haute fréquence et à haute précision (250 Hz et 30 $\mu\text{m}/\text{pixel}$), comme dans le dispositif de MERIENNE, LATIL, MORETTO et al. [296] (Fig. 3.3G). Afin d'étudier les fourmis, il est aussi possible d'effectuer des mesures sur un groupe de d'individus. Par exemple, la mesure du coût du transport de la fourmi est réalisée en étudiant la traversée d'une chambre respiratoire par plusieurs individus [157].

3. Évaluation des performances d'un robot hexapode

• 3.1. La mesure des performances d'un hexapode

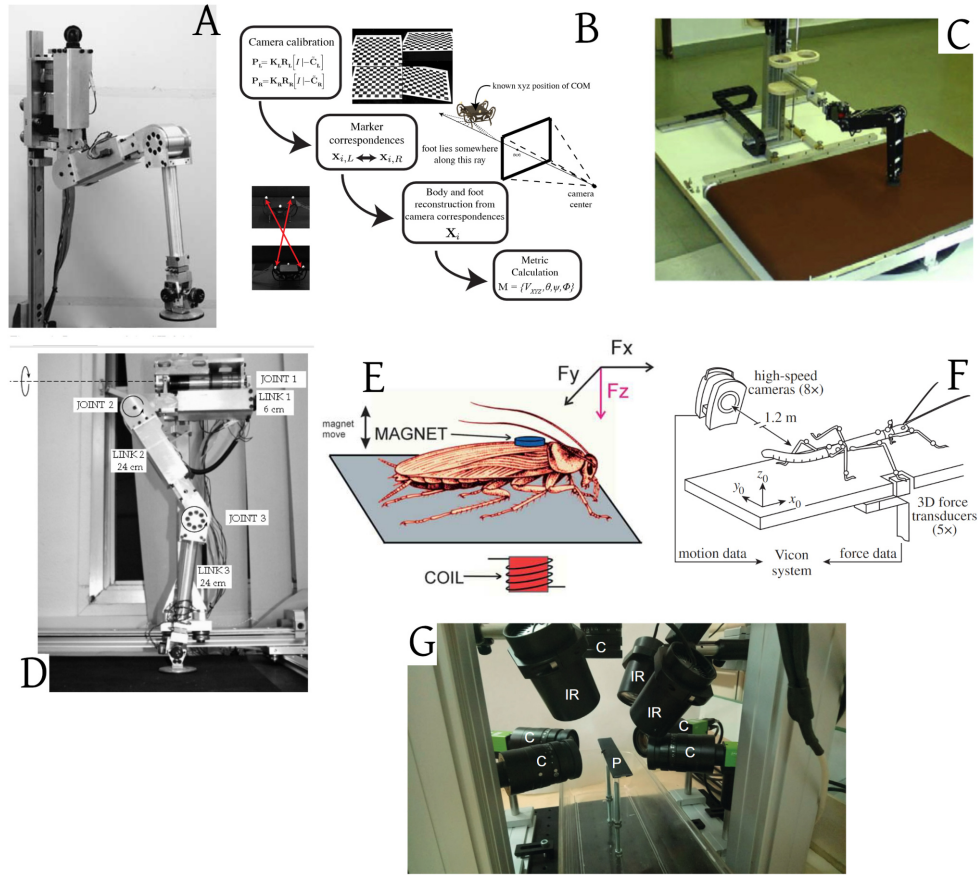


FIGURE 3.3. – Exemple de bancs de test utilisés pour l'étude des robots à pattes et des insectes. (A) Banc estimant le modèle dynamique d'une patte [292]. (B) Étude de la cinématique de marche d'un hexapode [293]. (C) Banc de test vérifiant le modèle du contrôle simulé [52]. (D) Estimation de la consommation électrique d'un bipode [290]. (E) Étude de l'influence de la charge sur le cafard [265]. (F) Mesure de la cinématique de marche d'un phasme. (G) Banc de test enregistrant la cinématique de marche d'une fourmi [297]. C : caméra, P : plate-forme de marche, IR : stroboscope infrarouge.

De manière générale, les bancs de test développés pour l'étude de la locomotion des insectes utilisent des données cinématiques obtenues par capture de mouvement et des données dynamiques obtenues par des capteurs de forces disposés au niveau du sol. En robotique, des mesures similaires sont réalisées, mais ne sont jamais intégrées au sein d'un même dispositif de mesure. Soit uniquement la trajectoire des pattes est mesurée, soit la force d'impact au sol. De plus, les bancs testant les performances des robots sont limités à l'étude d'une patte unique, et ne proposent pas de méthodes d'extrapolation des performances au robot complet. Ces études ne traitent pas non plus de l'autonomie des hexapodes. Pour ces raisons, nous avons décidé de construire un banc de test, dénommé *MiMiC-Ant*, regroupant les méthodes de mesures du monde animal et celles réalisés sur les robots.

3.2. Le banc de test *MiMiC-Ant*

Afin d'évaluer les performances des robots hexapodes, un banc de test dénommé *MiMiC-Ant* a été construit (Fig. 3.4A) [184, 298]. Il reprend les différentes méthodes de mesure des performances de la marche des insectes [265, 223] et les applique au domaine de la robotique à pattes. Plus particulièrement, nous avons développé un banc capable d'évaluer les indicateurs de performance d'un hexapode complet à partir de mesures réalisées sur une patte unique. En plus de fournir un cadre de travail standardisé pour la comparaison de plusieurs designs de robots, travailler sur une patte unique optimise le temps et le coût du développement de l'hexapode complet.

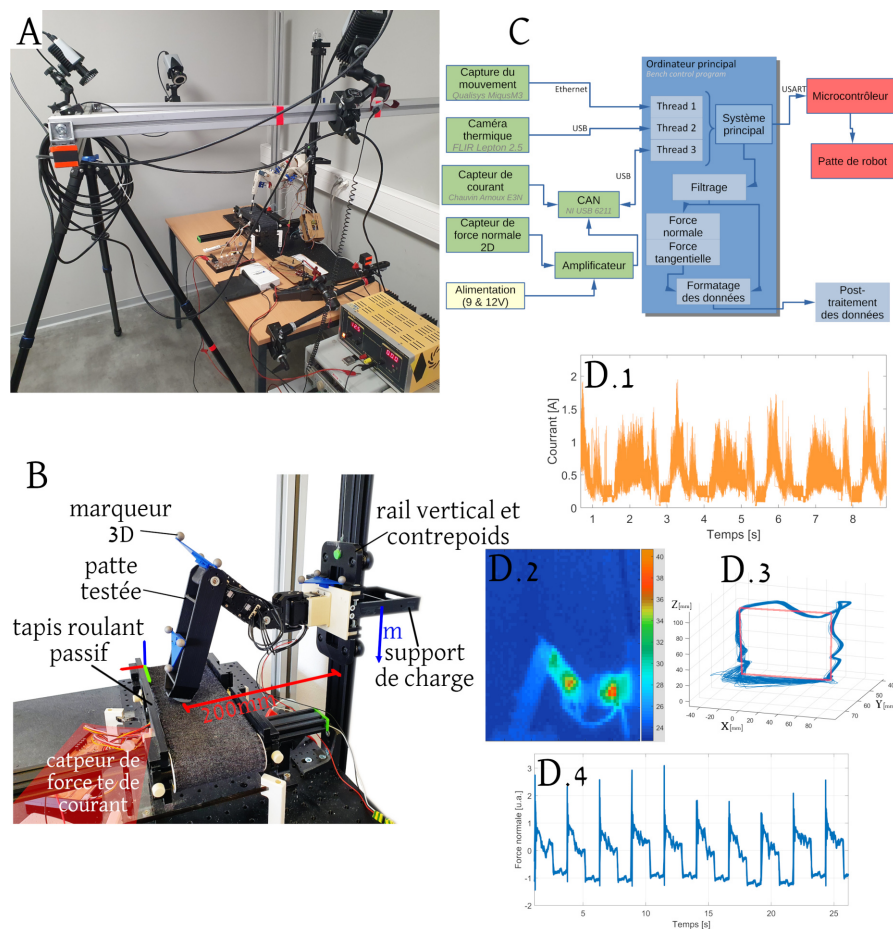


FIGURE 3.4. – Structure du banc de test *MiMiC-Ant*. (A) Photographie de l'ensemble du banc de test. (B). Diagramme structurel du banc. (C) Photographie de la zone expérimentale du banc. La patte *AXLeg* d'un robot hexapode conventionnelle (à base de servomoteurs) est installée pour procéder aux tests. (D) Exemple de données collectées par le banc de test. (D.1) Mesure du courant consommé par la patte. (D.2) Mesure de la cinématique de la patte. (D.3) Image thermique de la patte, après 8 *min* de marche sous une charge de 515 g. (D.4) Exemple de mesure de la force d'impact au niveau du tapis roulant.

3.2.1. Structure du banc

Le banc de test *MiMic-Ant* (Fig. 3.4A) est un dispositif de mesure composé d'une structure simulant l'environnement de marche, encerclée par un ensemble de trois caméras de capture de mouvement. Ce système de capture est basé sur des caméras Qualisys™ MicqusM3 [299]. Elles possèdent une résolution de 3 MP et une fréquence d'enregistrement allant jusqu'à 360 images par seconde. Une fois calibrées, la résolution spatiale des points est de 0,3 mm. Ce type de caméras est parfaitement adapté aux vitesses de marche des robots hexapodes actuels, limitée à 50 Hz pour les robots les plus rapides équipés de *whlegs* [42].

Avant chaque expérience, la patte testée est attachée à un rail vertical via un support prévu à cet effet (Fig. 3.4B). Il intègre un contrepoids, compensant la masse du système d'attache (annexe O). Le rail simule le mouvement vertical du corps du robot au cours de la marche. Il peut être muni d'une masse supplémentaire m , représentant une charge additionnelle transportée. Le mouvement horizontal étant bloqué, nous utilisons un tapis roulant passif (non motorisé), spécialement conçu pour cette application (vues additionnelles en annexe O). Le contact entre le robot et le sol est fait à travers un ruban en polyester, renforcé par du coton et des tiges plates de PLA. Cette caractéristique est essentielle pour pouvoir étirer le ruban entre deux roulements à billes garantissant un mouvement sans résistance, tout en évitant sa déformation sous le poids de la patte. L'avantage de ce banc de test, est qu'il permet de réaliser plusieurs sessions d'enregistrement pendant plusieurs jours, ce qui pourrait être fastidieux, si ce type de mesure était réalisé sur un robot complet. De plus, le type de patte testée n'est pas spécifique. Il est possible de tester une patte quelconque, tant qu'elle reste dans les dimensions maximales du banc (espace vertical 50 cm, largeur du tapis 94 mm, distance tapis-base inférieure à 50 cm, longueur du tapis 240 mm).

En ce qui concerne le système de mesure, l'ensemble des capteurs est synchronisée par l'ordinateur principal exécutant un programme Matlab® (Fig. 3.4C) (accessible sur GitHub <https://github.com/IlyaBrod/MiMiC-ANT-testbench>). Le diagramme des classes est disponible en annexe P. Le programme est responsable de la calibration, du contrôle et de l'enregistrement de l'ensemble des données du banc. Les mesures énergétiques sont réalisées par trois capteurs. La mesure du courant consommée au cours de la marche est faite par une pince ampèremétrique *Chauvin Arnoux E3N*. Cette mesure est associée à la valeur de la tension d'alimentation, enregistrée par le dispositif *NI-USB 6211*, permettant ainsi d'estimer la puissance consommée par la patte (Fig. 3.4D.1). L'ensemble du banc est supervisé par une caméra thermique *FLIR Lepton 2.5*. Avant l'expérience, elle contrôle la température de l'environnement et, pendant, elle enregistre l'élévation de température des composants de la patte. Cette mesure permet de détecter les éventuels défauts de conception ou d'identifier les actionneurs les plus sollicités (Fig. 3.4D.2). La mesure des grandeurs décrivant la robustesse physique est réalisée par le système de capture du mouvement. Il enregistre les mouvements des différents segments de la patte au cours de la marche (Fig. 3.4D.3). On peut ainsi estimer leurs caractéristiques cinématiques (vitesse, fréquence, position). Un capteur intégré au tapis roulant mesure la composante normale et tangentielle des forces de réaction du support. La composante normale est utilisée pour vérifier la stabilité du contrôle de la patte, l'amortissement des chocs (Fig. 3.4D.4).

La composante tangentielle, mesurée via un système de ressort horizontal rattaché au ruban, mesure la force maximale de propulsion.

3.2.2. Les scénarios de mesure

Un scénario correspond à une série de mesures réalisées suivant un protocole pré-programmé, calculant un ou plusieurs indicateurs de performances. Trois exemples de scénarios sont donnés Fig. 3.5. Avant l'exécution d'un scénario, les caractéristiques de la patte doivent être saisies dans le logiciel : la fréquence minimale et maximale de marche, la masse de la patte, la charge transportée et la durée de l'expérience. D'autres paramètres peuvent être aussi ajoutés, si le contrôleur de la patte testée le permet.

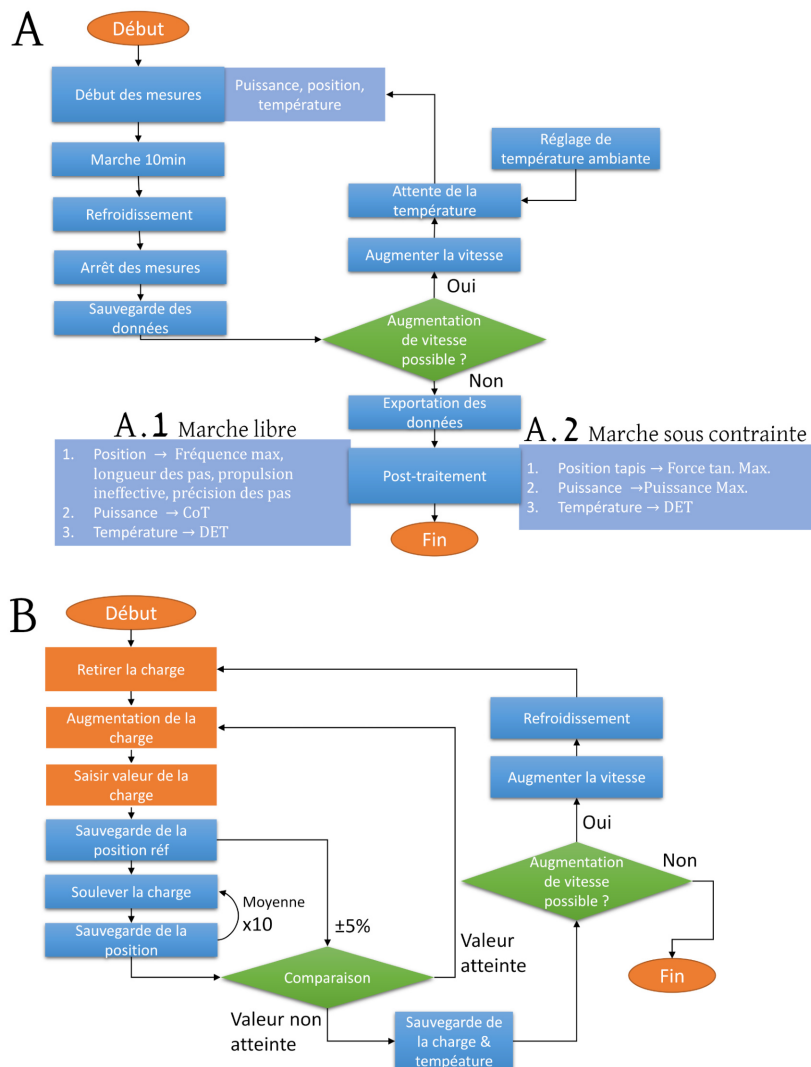


FIGURE 3.5. – Scénarios de mesure des indicateurs de performance. DET : Degré d'élévation de température. (A.1) Scénario de marche libre. (A.2) Scénario de marche sous contrainte. (B) Scénario de levage de charge.

3. Évaluation des performances d'un robot hexapode

• 3.2. Le banc de test MiMiC-Ant

Le scénario principal (Fig. 3.5A), correspond au cas de la marche libre et de la marche sous contrainte. Dans le cas de la marche libre du robot, il permet de déterminer les indicateurs telle que la vitesse maximale, la fréquence maximale, la longueur des pas, le coût du transport et le DET. Ce scénario de mesure peut être détaillé de la manière suivante :

1. Tout d'abord, la charge transportée est fixée au support prévu à cet effet. Nous avons utilisé des masses de 0 g, 95 g, 141 g, 187 g et 515 g. Ces valeurs de masses définissent la limite du modèle d'estimation. Une charge nulle correspond au cas où la patte supporte uniquement sa propre masse.
2. Une fois qu'une charge est présente, il est nécessaire de fixer manuellement le frein du rail (annexe O), qui détermine la position la plus basse que la patte peut atteindre verticalement. Le frein empêche la patte de tomber au sol pendant les phases de balancement. Sa position dépend du design de la patte, car le fléchissement induit par la charge varie en fonction des matériaux utilisés.
3. La température de l'environnement et du robot sont contrôlés. L'enregistrement commence, quand la température correspond à la valeur prédéfinie dans le système, dans notre cas $26^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Cette sécurité garantie que chaque expérience se déroule dans les mêmes conditions initiales. En effet, il a été montré que l'augmentation de température a entraîné l'augmentation du courant consommée par les moteurs [285] et induit une surchauffe.
4. La patte commence à marcher sur le tapis roulant passif à une fréquence prédéfinie. Dans notre cas, les fréquences sont choisies dans l'intervalle de 0 Hz à 2,7 Hz. La session d'enregistrement pour la fréquence nulle correspond au cas du robot statique. C'est-à-dire qu'on mesure l'énergie basale consommée par la patte. Du point de vue du contrôle, la patte réalise exactement la même trajectoire que le robot complet *AntBot* [10], avec des pas de 100 mm. Le rapport cyclique n'a aucune influence, car au cours du post-traitement des données, on sépare les phases de balancement des phases d'appui. Le rapport cyclique a été fixé à 0,5. Pendant la marche, la patte n'est pas fixée verticalement. Elle oscille de la même façon que le corps du robot complet. Ainsi, la mesure des caractéristiques énergétiques est accrue, par rapport au cas où on aurait bloqué la base de la patte.
5. Après 10 minutes de marche, la patte s'arrête. Une phase de refroidissement commence, initiée par l'interruption de l'alimentation des moteurs. Après 30 minutes d'arrêt (dans le cas d'un robot à servomoteurs), la température initiale de $26^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ est atteinte. L'interruption du système d'alimentation est primordiale, car pour certains robots, tels que ceux équipés de servomoteurs, la consommation d'énergie persiste à l'arrêt et les moteurs finissent par surchauffer.

6. Les étapes précédentes sont répétées, jusqu'à avoir effectué toutes les combinaisons de fréquences de marche et de charges transportées.

D'autres scénarios peuvent être réalisés avec le banc de test. Par exemple, le scénario de la marche sous contrainte (Fig. 3.5A.2). Dans ce cas de figure, le tapis roulant du banc est rattaché à un ressort interne (annexe O). La propulsion de la patte du robot n'est plus libre, mais contrainte par la force de rappel du ressort. En mesurant le déplacement du ruban de marche via un marqueur détecté par les caméras de capture de mouvement, on peut mesurer la composante tangentielle appliquée par la patte au niveau du sol, donc sa propulsion.

Le troisième scénario proposé est similaire aux tests d'effort musculaires réalisés par les athlètes, tel que le test de 1RM [277, 300]. L'objectif est de mesurer la charge maximale transportable par le robot. Pour cela, la patte doit réaliser un mouvement de levage sous charge. Une série de dix répétitions est réalisées pour chaque incrément de masse. On considère que la patte a soulevé avec succès une charge, si la position de sa base (suivie par le système de capture de mouvement), revient à sa position initiale avec une erreur maximale de 5 %.

3.2.3. Calcul de la puissance consommée

Afin d'estimer les performances énergétiques d'un hexapode, il est nécessaire d'évaluer sa puissance consommée P_{in} . Il peut sembler suffisant de multiplier la puissance mesurée d'une patte par six, pour avoir la valeur totale de l'hexapode. Cependant, nous avons vu au chapitre 1, que la locomotion d'un hexapode est définie par plusieurs paramètres, tels que la période de marche, le patron de locomotion choisi ou le rapport cyclique.

Après avoir accompli un scénario d'enregistrement sur le banc de test, la puissance consommée par une patte est divisée en deux phases : la phase de balancement et la phase de propulsion (Fig. 3.6A). Cette séparation est réalisée grâce au capteur de force intégré au tapis roulant et aux caméras de capture du mouvement. Ensuite, en utilisant la valeur de la masse transportée et la durée de chaque phase, on réalise un ajustement de surface (Fig. 3.6B-C). Nous obtenons deux fonctions à deux variables capables de prédire la puissance consommée par chaque phase selon une masse et une durée de phase donnée : $\overline{P_{stance}}(T_{stance}, masse)$ et $\overline{P_{swing}}(T_{swing}, masse)$. Avec T_{stance} la durée de la phase d'appui et T_{swing} la durée de la phase de balancement. Cette prédiction peut être faite pour tous les rapports cycliques désirées, car on se base sur la durée de chaque phase et non la vitesse de la patte.

3. Évaluation des performances d'un robot hexapode

• 3.2. Le banc de test MiMiC-Ant

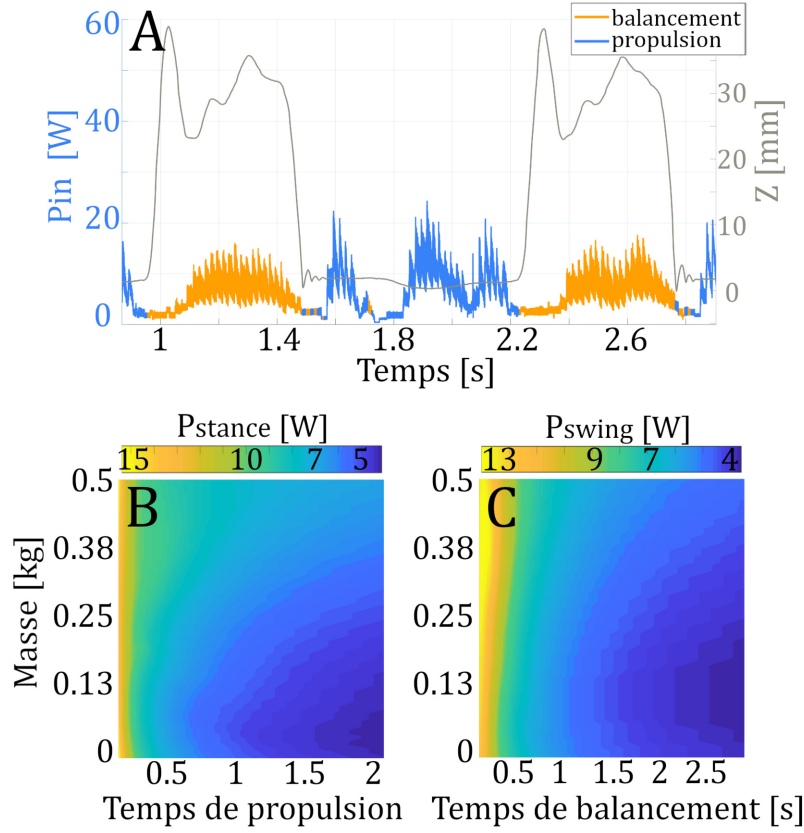


FIGURE 3.6. – (A) Puissance électrique instantanée consommée par la patte *AXLeg*. La courbe est divisée en phase de balancement et de propulsion. La fréquence de marche est égale à 0,8 Hz avec une charge transportée de 100 g. La position selon l'axe \vec{z} , correspond à la hauteur de la pointe de la patte. (B) Estimation de la puissance moyenne consommée au cours de la phase de propulsion $\overline{P_{stance}}(T_{swing}, masse)$. (C) Estimation de la puissance moyenne consommée au cours de la phase de balancement. $\overline{P_{swing}}(T_{stance}, masse)$. Avec T_{stance} la durée de la phase d'appui et T_{swing} la durée de la phase de balancement.

En réalisant des combinaisons entre la puissance de la phase de balancement et celle de la phase d'appui, nous pouvons estimer la puissance électrique moyenne consommée par le robot complet P_{in} (Eq. 3.1).

$$\overline{P_{in,T}} = \frac{6}{T} \cdot \left(\int_0^{\beta \cdot T} \overline{P_{stance}}(\beta \cdot T, m_{base}(t)) \cdot dt + \int_{\beta \cdot T}^T \overline{P_{swing}}((1-\beta) \cdot T, m_{base}(t)) \cdot dt \right) \quad (3.1)$$

Avec T la période d'un cycle de marche, T_{stance} et T_{swing} les durées de la phase d'appui et de balancement, respectivement, et β le rapport cyclique. La valeur $m_{base}(t)$ définit la masse supportée par la patte à chaque instant t (Eq. 3.2).

$$m_{base}(t) = \frac{m_{load} + (6 - L(t)) \cdot m_{patte}}{L(t)}, t \in [0, T] \quad (3.2)$$

3. Évaluation des performances d'un robot hexapode

• 3.2. Le banc de test MiMiC-Ant

Avec m_{load} la masse transportée, m_{patte} la masse d'une patte et $L(t)$ une fonction donnant le nombre de pattes supportant le poids du robot à chaque instant t (Eq. 3.3). Cette fonction dépend de la période T , du rapport cyclique β et de la phase relative $\theta_i \in [0, 1]$ ($i \in [1, 6]$), qui est définie par le patron de locomotion.

$$L(t) = \sum_{i=1}^6 (1 - (\text{sgn}(\sin(\frac{(t - \theta_i \cdot T) \cdot \pi}{T})) \cdot \text{sgn}(\sin(\frac{(t - (\theta_i + \beta) \cdot T) \cdot \pi}{T})) + 1)/2) \quad (3.3)$$

$L(t)$ peut être calculée de différentes manières, mais l'Eq. 3.3 définit $L(t)$ simplement comme une somme de six signaux carrés (un par patte) de largeur égale à β , déphasés proportionnellement à la phase relative θ_i (détails en annexe Q). Dans le cas de la marche en tripode alterné, à chaque instant $L(t)$ est égale à 3.

3.2.4. Expérimentation sur le robot complet

En plus des expériences menées sur la patte *AXLeg*, nous avons réalisé plusieurs enregistrements sur le robot complet *AntBot* [10], équipé de ce type de pattes. L'objectif était de vérifier la précision de l'évaluation des performances faite via le banc de test *MiMiC-Ant*. Le robot a réalisé plusieurs séquences de marche de dix pas sur un terrain plat, composé de tapis semi-rigides. À chaque nouvelle séquence, un des paramètres définissant la marche variait. Tout d'abord, la fréquence, de 0 Hz (robot immobile) à 3 Hz. La marche au-dessus de 3 Hz n'a pas été réalisée, pour éviter la collision entre les pattes du robot. Ensuite, la charge transportée a été modifiée, de 0 à 2 kg, par incrément de 500 g. En dernier, la longueur des pas a été modifiée (40 mm, 70 mm, 100 mm, et 120 mm). Pendant chaque enregistrement, les mouvements du corps et de la patte du milieu de l'hexapode ont été suivis grâce au système de capture de mouvement Vicon™. La consommation du courant a été enregistrée par une pince ampèremétrique. La puissance consommée P_{in} , estimée à partir de cette expérience, est représentée Fig. 3.7. En outre, ces mesures ont permis d'évaluer, par régression polynomiale, l'influence de la longueur des pas sur la puissance consommée par le robot P_{in} , dont l'influence sera étudiée plus tard dans ce chapitre.

Généralement, la précision des calculs de puissance des hexapodes (simulés ou réels) n'est pas un sujet discuté dans la littérature [150, 145]. Pour ce projet, nous avons choisi d'utiliser un banc de test au lieu d'une simulation numérique. L'avantage est de prendre en compte tous les défauts mécatroniques et les non-linéarités : le jeu mécanique, les pertes fer, les pertes Joule, la friction, la déformation des matériaux et les erreurs de trajectoire. Avec notre méthode, nous pouvons estimer la puissance consommée par le robot P_{in} avec une erreur moyenne de ± 6 W. En utilisant les données du constructeur des servomoteurs (*Dynamixel*), cette erreur serait deux fois plus grande (± 13 W). Bien que des modèles mathématiques précis peuvent être définis [301, 150, 290], le banc de test *MiMiC-Ant* offre une approche plus simple et flexible, tout en prenant en compte les effets thermiques souvent négligés.

3. Évaluation des performances d'un robot hexapode

• 3.3. Évaluation des performances

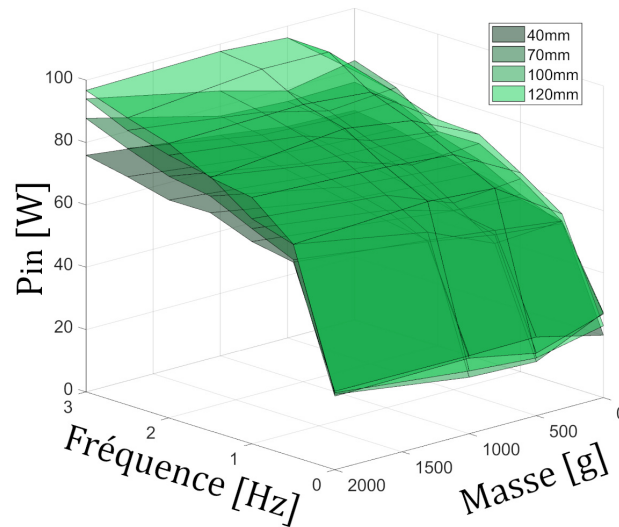


FIGURE 3.7. – Puissance consommée par *AntBot* [10] en fonction des paramètres de marche. Chaque surface correspond à une longueur de pas différente.

3.3. Évaluation des performances

3.3.1. Analyse des caractéristiques générales

L'un des objectifs du banc de test *MiMiC-Ant* est de réaliser une étude générale d'un robot, pour obtenir un aperçu de ses performances. Pour illustrer les possibilités offertes par le banc, nous avons mesuré les performances d'une patte conventionnelle à base de servomoteurs, appelée *AXLeg₁*. Cette patte a été dimensionnée à une échelle 58 plus grande qu'une patte de la fourmi *Messor Barbarus*.

Indicateur de performance	Fourmi	AXLeg ₁
Masse	8,92 mg (1,7 kg)	2 kg
Vitesse [cm/s]	0,4(3)	21
Fréquence [Hz]	0,7(0,09)	0,8 Hz
Longueur des pas [mm]	5,7(330)	265
Force norm. & tan. max.	90 μ N/21 μ N (176 N/42 N)	12 N/6 N

TABLEAU 3.1. – Tableau de comparaison des performances d'un hexapode équipé de pattes *AXLeg₁* (échelle 1 : 58) à son homologue, la fourmi *Messor Barbarus* [182, 302, 153, 234]. Les données manquantes sont extraites des informations disponibles chez d'autres espèces de fourmis. Les valeurs entre parenthèses représentent les grandeurs mises à l'échelle du robot (voir Tab. 1.2).

3. Évaluation des performances d'un robot hexapode

• 3.3. Évaluation des performances

En prenant en compte les facteurs d'échelle (Tab 1.2), il est possible de comparer les performances du robot hexapode à ceux de la fourmi, malgré la différence de taille [182]. En implémentant sur le robot une trajectoire des pattes identique à celle des pattes d'une fourmi, nous pouvons mettre en évidence les limites technologiques actuelles qui existent chez les hexapodes bio-inspirés (Fig. 3.8A-B).

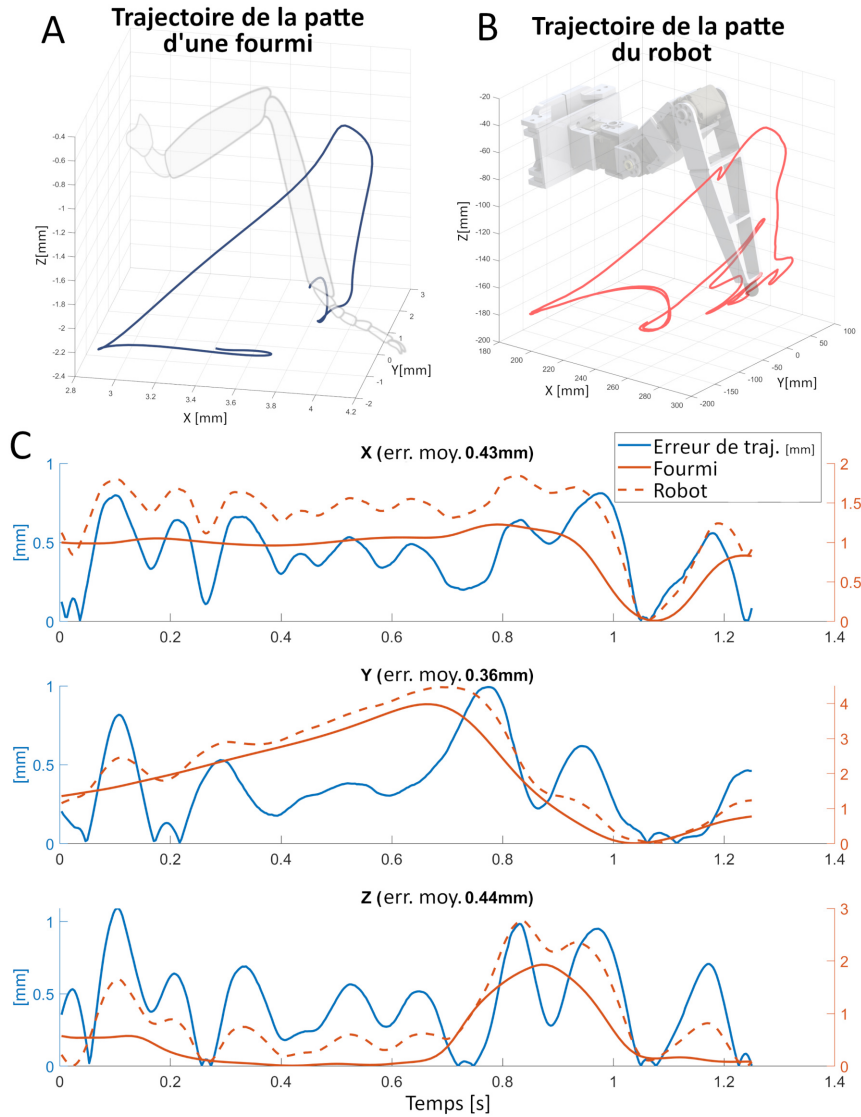


FIGURE 3.8. – Comparaison des trajectoires de pattes d'une fourmi et d'un robot. (A) Trajectoire de la patte d'une fourmi *Messor Barbarus* [159]. (B) Trajectoire de la patte d'un robot hexapode, suivant la trajectoire de la fourmi. (C) Comparaison des trajectoires. La trajectoire du robot a été mise à l'échelle de la fourmi.

Les indicateurs présentés par la Tab. 3.1 suggèrent que le robot peut dépasser les performances d'une fourmi se déplaçant à sa vitesse de marche spontanée. La vitesse (21 cm/s) et fréquence de marche (0,8 Hz) de la patte *AXLeg₁* sont nettement supé-

3. Évaluation des performances d'un robot hexapode

• 3.3. Évaluation des performances

rieures à celles de la fourmi (3 cm/s et 0,09 Hz). Cependant, cette observation n'est plus valable si on considère la vitesse maximale de déplacement. Bien que les servomoteurs de la patte peuvent développer des vitesses allant jusqu'à 38 cm/s , certaines espèces de fourmi sont capable d'atteindre 86 cm/s [222]. La fourmi surpasse aussi les robots en ce qui concerne la capacité à transporter des charges lourdes (force normale) et à générer une force de propulsion importante (force tangentielle). Cette différence est probablement causée par le manque de DDL de la patte, permettant d'optimiser l'orientation des efforts au niveau du sol. Comme nous pouvons voir avec la Fig. 3.8C, la trajectoire de la patte conserve sa continuité de vitesse et d'accélération, héritée de la trajectoire de la fourmi, malgré la mise à l'échelle. Par contre, si on regarde le comportement de la patte au moment du contact avec le sol, on constate que le robot est fortement perturbé. Cette perturbation est principalement causée par l'inertie de la patte du robot, nettement supérieure à celle de la fourmi et non prise en compte dans le contrôle car on copie directement la trajectoire de la fourmi. Implémenter le mouvement des pattes d'une fourmi directement sur le robot, sans avoir un contrôle adéquat n'a donc pas de sens. Les imperfections du design de la patte *AXLeg* ont aussi un rôle important. Le jeu mécanique, la raideur des segments de la patte et les effets thermiques perturbent la trajectoire réalisée. En résumé, nous pouvons dire qu'utiliser des hexapodes équipés de servomoteurs pour modéliser un animal n'est pas recommandé, car leurs performances sont insuffisantes. Cependant, tant qu'on reste dans une gamme de vitesse modérée et charge transportée faible, et si la dynamique des pattes n'est pas significative, il est possible d'utiliser ce type de robots pour valider des hypothèses du domaine de la biologie. À partir de ces observations, nous constatons que développer de nouveaux robots hexapodes, avec des technologies d'actionnement innovantes, est nécessaire pour construire des modèles biologiques réalistes.

En plus de donner la possibilité de comparer un robot à son homologue animal, le banc de test *MiMiC-Ant* permet de faire une comparaison entre plusieurs designs de pattes différents. En suivant le scénario de marche sans contrainte, nous avons comparé deux hexapodes équipés de pattes différentes. La première patte, appelée *AXLeg₂*, est une patte d'hexapode à base de servomoteurs. Le même type de pattes équipe le robot *Antbot*. Les performances de cette patte sont comparées dans le Tab. 3.2 à celles de la patte *Pohod15Leg*, présentée au chapitre 2.

3. Évaluation des performances d'un robot hexapode

• 3.3. Évaluation des performances

Indicateur de performance	AXLeg ₂	Pohod15Leg
Masse [kg]	1,9 kg	2,5 kg
Fréquence [Hz]	0,37	0,31
Longueur des pas [mm]	106	115
Vitesse [cm/s]	7,8	7,1
Précision des pas [mm]	±3	±1
Propulsion inefficace [293]	5 %	9 %
Puissance moy. [W]	28	81
Puissance moy. statique [W]	9	0
Résistance spécifique ϵ	19	47
Degré d'élévation de température (DET)	3,2°C/min	2,1°C/min

TABLEAU 3.2. – Tableau de comparaison des performances d'un hexapode équipé de pattes *AXLeg₂* et un équipé de pattes *Pohod15Leg*. Les indicateurs de performance ont été mesurés par le banc de test *MiMiC-Ant*. Un aperçu des données enregistrées par le banc est disponible en annexe R.

Le tableau 3.2 présente les caractéristiques qu'aurait un robot hexapode complet, équipé de l'une des deux pattes testées. Pour comparer deux designs de pattes, il est essentiel que la tâche réalisée soit identique. Par conséquent, les mesures ont été enregistrées dans le cas où les pattes ne transporteraient aucune charge supplémentaire et se déplaçaient avec une fréquence de marche similaire. Dans ce cas, les deux hexapodes supportent uniquement leur propre masse, qui se situe en dessous de 3 kg comme la majorité des hexapodes bio-inspirés actuels. On peut donc affirmer, que ces deux robots sont du même type, et par conséquent, il est pertinent de comparer leurs performances. Pour des raisons de sécurité, la vitesse de la patte *Pohod15Leg* a été réduite par trois. Ainsi, la fréquence adoptée est égale à 0,31 Hz pour la patte *Pohod15Leg* et 0,37 Hz pour la patte *AXLeg₂*. La différence de fréquence de 0,06 Hz est due aux limitations des systèmes de contrôle. En regardant les autres indicateurs de performance, nous pouvons constater que le système de contrôle des actionneurs a un fort impact sur la locomotion du robot, donc sur la robustesse physique (Fig. 3.2). Par exemple, malgré le fait que la longueur des pas imposée aux deux pattes soit égale à 100 mm, cette valeur n'est pas respectée. Surtout dans le cas de la patte *Pohod15Leg*, pour laquelle l'erreur de longueur atteint 15 mm. Les analyses cinématiques de la patte *AXLeg₂* ont montré, que le dépassement de la consigne de trajectoire est croissant avec l'augmentation de la fréquence de marche, ce qui fausse la valeur de la vitesse souhaitée. La précision spatiale de la cinématique peut être aussi évaluée par l'erreur de placement des pattes. Une erreur, qui est trois fois plus grande pour la patte *AXLeg₂*. Un autre indicateur à prendre en compte est la propulsion inefficace [293]. Cette grandeur est donnée sous forme de pourcentage. Elle correspond à la proportion de la trajectoire de la patte effectuée dans la direction inverse au mouvement. Ce phénomène est généralement causé par un défaut de la planification de la trajectoire et un mauvais amortissement de l'impact au sol. Dans le cas de la patte *Pohod15Leg*, la propulsion inefficace est 4% plus grande. On peut en déduire, que la présence de ressorts

3. Évaluation des performances d'un robot hexapode

• 3.3. Évaluation des performances

passifs dans le système d'actionnement n'améliore pas forcément la stabilité du robot. Un contrôle actif serait nécessaire, ajustant les positions articulaires en temps réel. En résumé, les indicateurs de robustesse physique présentés, mettent en évidence les avantages et les défauts des deux designs de pattes. Aucun modèle de patte ne semble surpasser l'autre, lorsqu'aucune charge n'est transportée. Mais contrairement aux pattes d'hexapodes conventionnelles, le design de la patte *Pohod15Leg* offre la possibilité d'apporter des modifications au système de contrôle, donc d'améliorer ses performances. De plus, une étude sous contrainte serait nécessaire, car les liaisons du type vis sans fin - écrou, sont généralement utilisées pour le transport de charge lourdes. On pourrait donc s'attendre à ce que les performances de la patte *Pohod15Leg* soient moins influencées par la charge que celles de la patte *AXLeg₂*.

Pour étudier la robustesse énergétique des hexapodes comparés, on peut s'intéresser à la puissance moyenne consommée pendant un cycle de marche. Plus la valeur de la puissance est grande, plus le robot dépense de l'énergie pour marcher. Dans notre cas, la patte *Pohod15Leg* a une consommation trois fois supérieure à la patte *AXLeg₂*. L'origine de cette consommation est le faible rendement de l'assemblage vis sans fin - écrou. Cependant l'avantage significatif de ce type de liaison est l'annulation de la puissance à l'état statique. Dans le cas d'un robot équipé de servomoteurs, cette puissance constitue un tiers de la puissance nécessaire à la marche, limitant ainsi son temps de mission. Cependant, comparer la puissance consommée par les actionneurs n'est pas suffisant, car il faut prendre en compte la vitesse de marche et la charge transportée. Il est plus judicieux de comparer la résistance spécifique ϵ (Eq. 1.7). La valeur calculée pour la patte *Pohod15Leg* de 47 est nettement supérieure à celle de la patte *AXLeg₂*, égale à 19. Son efficacité énergétique est donc moindre à la vitesse de marche de 7 cm/s et sous une charge nulle. Néanmoins, la valeur d' ϵ indiquée ne correspond pas au minimum absolu, qui est une valeur typiquement utilisée pour comparer les robots. Il se peut, qu'il existe une vitesse optimale, pour laquelle le robot muni de pattes *Pohod15Leg* surpasse les performances des robots conventionnels. Cependant, la résistance spécifique minimale ne représente pas nécessairement la valeur la plus significative pour décrire les performances d'un robot. Dans la section suivante de ce chapitre, nous proposons une nouvelle méthode alternative à la résistance spécifique, offrant une meilleure description des performances énergétiques. En restant dans la catégorie des indicateurs énergétiques, on peut s'intéresser à l'augmentation de la température. Le nouveau prototype de patte construit possède un DET de 2,1°C/min, alors que la patte conventionnelle a un DET de 3,2°C/min. Cet indicateur met en évidence l'avantage de la structure d'actionneur irréversible à grande envergure. Comme prévu, la refroidissement des moteurs est optimisé, et atteint au maximum 45°C, alors que la patte *AXLeg₂* surchauffe plus vite, et atteint des températures de plus de 50°C limitant l'autonomie du robot.

3.3.2. Analyse du coût du transport

Calcul de la puissance mécanique

Bien que la puissance consommée par un robot peut être utilisée pour estimer les performances énergétiques [290], ce n'est pas un indicateur approprié, car la

3. Évaluation des performances d'un robot hexapode

• 3.3. Évaluation des performances

vitesse de déplacement et la charge transportée doivent aussi être prise en compte. La résistance spécifique (Eq. 1.7) est donc plus appropriée pour évaluer la qualité de la consommation énergétique d'un robot. Cependant, cette valeur n'est en théorie pas comparable au CoT animal (Eq. 1.9).

De nouvelles métriques sont proposées [303], alternatives à la définition du CoT actuel, capable d'unifier ce concept à des individus de morphologie différente. Les avancées récentes en thermodynamique de HERBERT, OUERDANE, LECOEUR et al. [258], ont suggérés l'utilisation d'un ensemble réduit d'indicateurs énergétiques ($\{P_{out}, \eta, CoT/M, v\}$, présentés dans la section suivante), afin de décrire les performances d'une quelconque entité, pouvant être modélisée sous forme d'une machine thermique. C'est le cas des animaux et même des robots, car ils possèdent un flux d'énergie entrant, sortant et des pertes. Nous avons donc choisi d'explorer ce concept, qui pourrait faire le lien entre le coût du transport animal et la résistance spécifique des robots. L'idée principale est de reconsidérer le coût du transport, comme étant proportionnel au flux des pertes énergétiques (la puissance dissipée P_{loss}) [304]. On obtient ainsi une définition unique du CoT, calculable pour les êtres vivants et les robots (Eq. 3.4). Cependant, la mesure de ces indicateurs énergétiques n'a encore jamais été réalisée dans le domaine de la robotique. Dans ce but, nous avons donc développé un nouveau procédé expérimental.

$$CoT = \frac{P_{loss}}{v} \quad \text{avec } v, \text{ la vitesse du robot} \quad (3.4)$$

Pour appliquer cette nouvelle définition du CoT, et évaluer les indicateurs énergétiques suggérés par HERBERT, OUERDANE, LECOEUR et al. [258], il est nécessaire de calculer l'ensemble des flux d'énergie du robot. Dans un premier temps, les mesures du banc de test *MiMiC-Ant* permettent d'estimer la puissance consommée par le robot P_{in} . Afin d'identifier les deux autres flux d'énergie et calculer la puissance utile P_{out} (puissance mécanique produite) et la puissance perdue P_{loss} (Eq. 3.5), nous avons réalisé une simulation numérique de la patte *AXLeg*. L'ensemble de la procédure est résumé en annexe T.

$$P_{loss} = P_{in} - P_{out} \quad (3.5)$$

3. Évaluation des performances d'un robot hexapode

• 3.3. Évaluation des performances

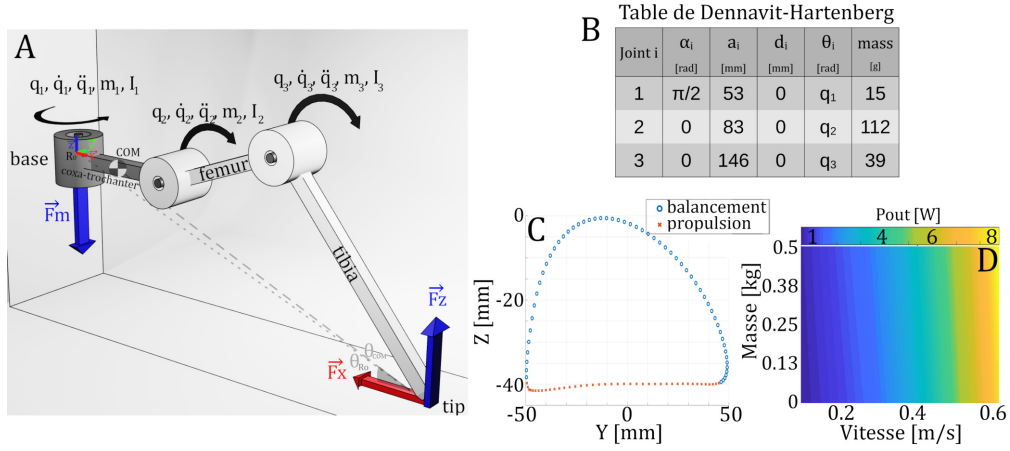


FIGURE 3.9. – Simulation d'une patte de robot. (A) Modèle simplifié de la patte d'un robot hexapode. $q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i$ sont les positions, vitesses et accélérations angulaires de chaque liaison i , respectivement. m_i la masse de chaque segment. I_i la matrice d'inertie de chaque segment. \vec{F}_x et \vec{F}_z sont les forces de réaction du support. \vec{F}_m représente le poids de la charge transportée. (B) Table de Denavit-Hartenberg définissant la chaîne cinématique de la patte *AXLeg*. (C) Trajectoire de patte utilisée pour la cinématique inverse. (D) Puissance mécanique moyenne simulée du robot complet.

L'avantage des simulation est d'avoir un environnement contrôlé. Ainsi, la puissance calculée P_{out} , correspond uniquement à la puissance mécanique utile au robot pour faire un mouvement de patte, se propulser et supporter la charge transportée. Bien que le mouvement des pattes peut être considéré comme une perte énergétique, nous supposons que c'est un mouvement essentiel à la marche. La simulation est basée sur un modèle simplifié de la patte du robot, composé de trois liaisons pivot, représentant chaque servomoteur (Fig. 3.9A). La chaîne cinématique de la patte a est définie sur Matlab® utilisant la l'outil *Robotics Toolbox*[113] et définie suivant le tableau DH Fig. 3.9B. La trajectoire suivie par la patte au cours de la simulation est représentée Fig. 3.9C. Elle est divisée en deux sections : la phase de balancement et la phase de propulsion. En effet, il est important de faire cette séparation, car seulement au cours de la phase de propulsion la force de réaction du support est appliquée en bout de patte (Eq. 3.6).

$$\vec{F}_z = (m_{patte} + m_{load}) \cdot g \cdot \vec{z} \quad \vec{F}_x = -(m_{patte} + m_{load}) \cdot g \cdot \frac{\cos(\theta_{COM})}{\sin(\theta_{R_0})} \cdot \vec{x} \quad (3.6)$$

où m_{patte} et m_{load} sont la masse de la patte et de la charge additionnelle transportée, g est la constante d'accélération de pesanteur, θ_{COM} est l'angle défini par l'axe \vec{x} , la pointe de la patte et le centre de masse COM (estimé à chaque position). Le cosinus de cet angle correspond à la distance verticale entre la pointe et le centre de masse. θ_{R_0} est l'angle entre l'axe \vec{x} , la pointe de la patte et la base de la patte (point de fixation

3. Évaluation des performances d'un robot hexapode

• 3.3. Évaluation des performances

au thorax). Le sinus de cet angle correspond à la distance horizontale entre la pointe et l'origine du repère R_0 (Fig. 3.9A). Le détail du calcul de ces deux forces est donné en annexe S. La troisième composante de la force de réaction du support selon l'axe \vec{F}_y est négligée. En effet, on suppose que le robot marche à une vitesse constante, ainsi les effets inertiels du corps n'affectent pas la dynamique de la marche. Ce phénomène est aussi pris en compte sur le banc de test, car la patte se déplace sur un tapis roulant sans contraintes, et sans glissements (le coefficient de friction statique entre la patte et le ruban du tapis μ_s a été mesuré égal à 0.8).

Une fois que le modèle de la patte a été défini (annexe S), la formulation de Lagrange-Euler [113] est utilisée pour calculer la puissance mécanique moyenne produite par la patte au cours d'un cycle de période T (Eq. 3.8).

$$\begin{bmatrix} \tau_1(t) \\ \tau_2(t) \\ \tau_3(t) \end{bmatrix} = M(q(t))\ddot{q}(t) + C(q(t), \dot{q}(t))\dot{q}(t) + G(q(t)) + J(q(t))^T f(t) \quad t \in [0, T] \quad (3.7)$$

$$\overline{P_{out,T}} = \frac{6}{T} \cdot \int_0^T \sum_{i=1}^3 |\tau_i(t) \cdot \dot{q}_i(t)| \cdot dt \quad (3.8)$$

avec τ_i , le couple produit par chaque articulation, $q(3 \times 1)$, $\dot{q}(3 \times 1)$, $\ddot{q}(3 \times 1)$ sont respectivement les positions angulaires, vitesses et accélération de chaque articulation, $M(3 \times 3)$ est la matrice d'inertie du robot, $C(3 \times 3)$ est le terme de Coriolis et la matrice des termes centrifuges, $G(3 \times 1)$ est la matrice des termes de gravité, $J(6 \times 3)$ est la matrice Jacobienne de la patte, $f(6 \times 1)$ est le torseur regroupant les forces et les couple appliqués en bout de patte (forces de réaction du support), g est la constante d'accélération de pesanteur, et T la période des cycles de marche du robot. Les valeurs numériques des matrices définissant le système sont disponibles en annexe S.

La simulation a été réalisée pour des vitesses de marche allant de 0,1 m/s à 0,6 m/s et des charges de 0 à 500 g. Le résultat de la simulation est présenté Fig. 3.9D.

Une autre possibilité aurait été d'utiliser les données du capteur de force intégré au tapis roulant afin d'estimer la force mécanique produite par la patte. Bien qu'une technique de calibration 2D à été développée (annexe U-V), permettant d'atteindre une erreur quadratique moyenne de 3,59 % (RMS) pour la mesure de la masse, une précision semblable aux tapis sensoriels utilisées pour l'étude de l'Homme (4,3 % à 1,4 % RMS [305]), la largeur de la bande passante du tapis n'a pas été encore estimée. Ainsi, afin de garantir la précision de la mesure pour toutes les vitesses de marche du robot, il est nécessaire de concevoir en amont un dispositif de calibration approprié.

Analyse des résultats

La description énergétique de l'hexapode est faite à travers les indicateurs $\{P_{out}, \eta, CoT/M, v\}$ [258], représenté sur chaque graphique Fig. 3.10A-D. À partir des données collectées par le banc de test, les flux d'énergie du robot complet sont estimés pour différents paramètres de locomotion : puissance électrique consommée P_{in} (voir Eq. 3.1) ; puissance mécanique produite, nécessaire au mouvement et au transport

3. Évaluation des performances d'un robot hexapode

• 3.3. Évaluation des performances

de la charge P_{out} (Eq. 3.8) ; la puissance perdue P_{loss} (Eq. 3.5). On peut ainsi définir le rendement η (Eq. 3.9), le coût du transport CoT (Eq. 3.4), et la vitesse v .

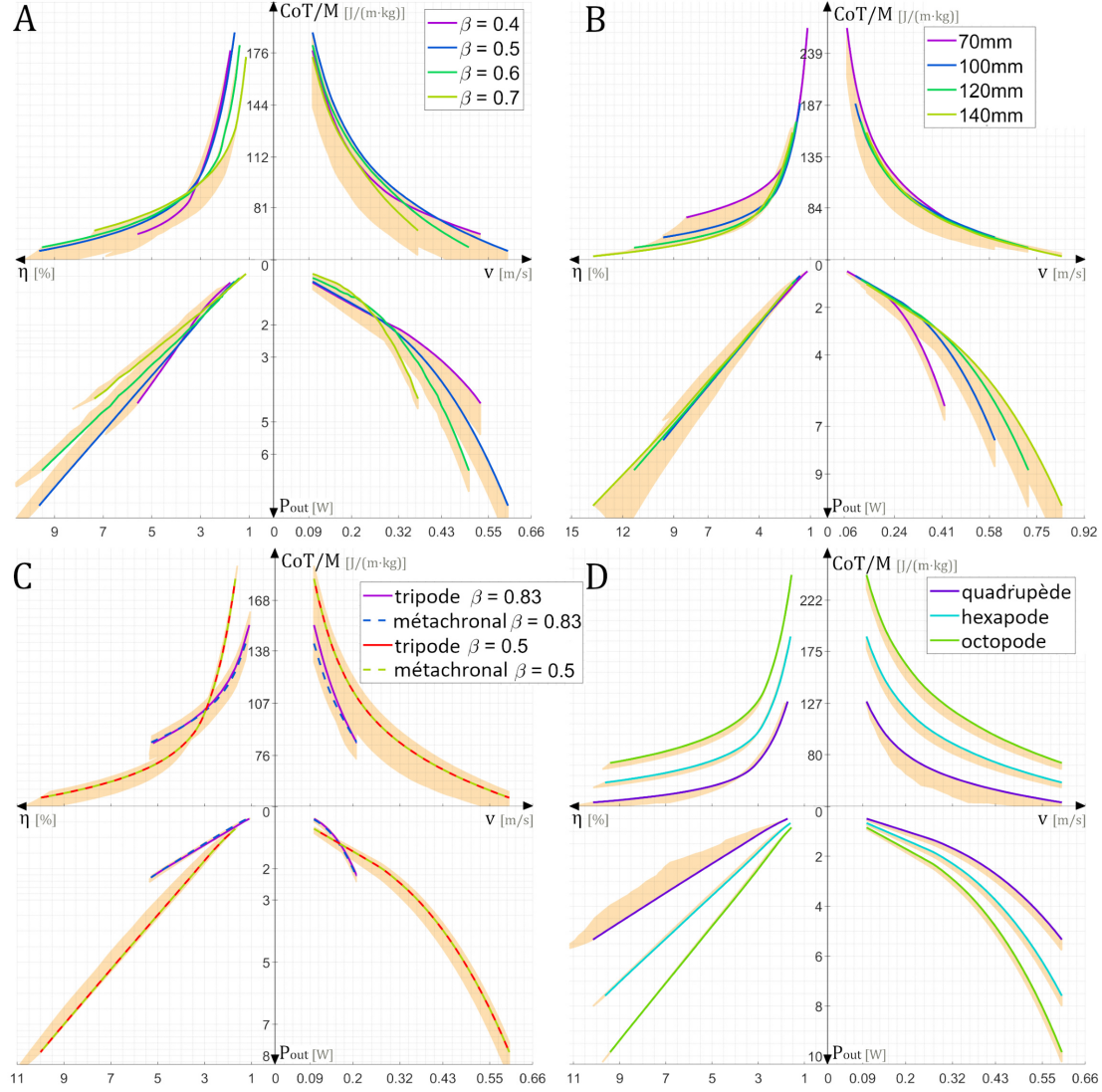


FIGURE 3.10. – Graphique à quatre quadrants, présentant les indicateurs énergétiques $\{P_{out}, \eta, CoT/M, v\}$ du robot hexapode étudié. La région orange représente la plage de variation des courbes lorsque la charge transportée varie de 0 g à 500 g. Avec l'augmentation de cette charge, chaque courbe glisse en direction du bord opposé de la région. (A) Description énergétique pour différents rapport cycliques, quand l'hexapode marche sans charge en tripode alterné. (B) Description énergétique pour différentes longueurs de pas, quand le robot marche sans charge en tripode alterné. (C) Description énergétique pour la marche en tripode et le rythme métachronal, sous une charge de 140 g, avec des pas de 100 mm. (D) Description énergétique pour un robot quadrupède, hexapode et octopode, marchant avec un patron alterné de rapport cyclique égal à 0,5, des pas de 100 mm, sans charge.

3. Évaluation des performances d'un robot hexapode

• 3.3. Évaluation des performances

Plus particulièrement, afin d'avoir une valeur semblable à la résistance spécifique (voir chapitre 1), nous utilisons le coût du transport spécifique (Eq. 3.10).

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (3.9)$$

$$CoT/M = \frac{P_{loss}}{(M \cdot v)} \quad \text{avec } M \text{ la masse totale du robot} \quad (3.10)$$

Dans un premier temps, nous avons étudié l'influence du rapport cyclique β sur les performances du robot, avec un pas fixé à 100 mm. Comme le montre Fig. 3.10A, en regardant la vitesse maximale atteinte par chaque courbe CoT/M , on constate que le rapport cyclique a un effet limitant sur la vitesse du robot. Par définition, le rapport cyclique n'a pas de lien direct avec la vitesse, puisqu'il correspond au ratio entre la durée de la phase d'appui et la période d'un pas (Eq. 1.4), alors que la vitesse est définie par la longueur des pas et la fréquence (Eq. 1.2). Cependant, le rapport cyclique détermine la proportion entre la durée d'appui et de balancement. Plus on s'écarte de la valeur centrale de β égal à 0,5, plus l'une des deux phases devient courte, jusqu'à atteindre la limite imposée par l'actionneur. Cette limite est déterminée la vitesse de rotation maximale des moteurs, et par conséquent limite la vitesse de marche. Dans le cas de la patte *AXLeg*, la durée minimale de la phase d'appuie est de 0,15 s et 0,16 s pour la phase de balancement. Avec ces conditions limites, la patte a une vitesse maximale de 60 cm/s. De plus, avec l'augmentation de la vitesse v , on observe une augmentation du rendement η . Le rendement maximal de 9,6 % est donc atteint pour un rapport cyclique de 0,5.

Concernant la perte de puissance CoT/M , on remarque qu'à faibles vitesses, une valeur de rapport cyclique éloignée de la valeur centrale de 0,5 améliore l'économie d'énergie. À grandes vitesses, c'est un rapport cyclique proche de 0,5 qui est le plus adapté. La raison de ce phénomène est l'allure de la courbe de la puissance mécanique P_{out} , dont la valeur maximale glisse le long de l'axe horizontal avec la variation de β . Ainsi, pour chaque valeur de vitesse de marche, il y a un rapport cyclique optimal. Par exemple, pour une marche à 37 cm/s, c'est un β de 0,7 et à 50 cm/s, un β de 0,6. Du point de vue du contrôle, il est donc essentiel d'adapter la valeur du rapport cyclique à la vitesse, pour maximiser l'économie d'énergie et le rendement. Dans le cas où le robot marchant à 37 cm/s passe d'un rapport cyclique de 0,5 à 0,7, il réduirait les pertes énergétiques de 18 % et augmenterait sa puissance mécanique de 56 %.

Dans un second temps, nous avons étudié l'influence de la longueur des pas sous un rapport cyclique fixe (β égal à 0,5). La courbe du CoT spécifique (Fig. 3.10B) montre clairement que l'augmentation de la longueur des pas augmente la vitesse de marche v et donc un meilleur rendement η . À faible vitesse (14 cm/s), la longueur de pas optimale est de 100 mm, pour laquelle la perte d'énergie est jusqu'à 4 % plus faible que pour des pas de 140 mm. Des foulées plus courtes, permettent aussi d'atteindre la puissance mécanique maximale P_{out} plus rapidement, ce qui est avantageux pour un lent transport de charge. En résumé, ajuster la longueur des pas a un effet minimal sur la consommation énergétique des hexapodes à base de servomoteurs. Cependant, du point de vue de la puissance produite, il est avantageux de se déplacer en ajustant la

3. Évaluation des performances d'un robot hexapode

• 3.3. Évaluation des performances

vitesse par la variation de la longueur du pas, en gardant toujours la fréquence des foulées maximale.

Troisièmement, une analyse de l'influence du patron de marche a été réalisée (Fig. 3.10C), en comparant un patron de marche en tripode (β de 0,83 et 0,5, Fig. 1.3) avec le rythme métachronal (β de 0,83 et 0,5, Fig. 1.3). Ces deux patrons de marche sont souvent implémentés sur des robots hexapodes [64, 150]. Étant donné que le rapport cyclique a un effet limitant sur la vitesse, la marche d'un β de 0,83 n'existe que pour de faibles valeurs, jusqu'à 21 cm/s. À cette vitesse, la perte énergétique CoT/M du rythme métachronal est jusqu'à 7% plus faible, que pour le patron tripode. En effet, un patron de marche détermine le nombre de pattes supportant le poids du robot à chaque instant, et par conséquent la puissance mécanique engendrée. La marche selon le rythme métachronal a la particularité d'avoir une seule et unique patte en phase de balancement à chaque instant, les autres cinq pattes propulsent le robot. Ainsi, ce patron maximise la puissance produite et est adapté au transport de charges. Réciproquement, un patron avec peu de pattes en contact avec le sol est adapté à la marche rapide.

En guise de vérification de la méthode de calcul, nous avons aussi calculé la description énergétique dans le cas d'un rapport cyclique de 0,5 pour les deux patrons de marche. Comme attendu, les deux styles de marche induisent, à chaque instant, la présence de trois pattes propulsant le robot. Dans ce cas, les deux profils énergétiques sont identiques.

Cependant, l'économie d'énergie du patron métachronal pourrait être plus significative, dans le cas d'un actionneur conçu pour de grandes vitesses, plutôt que pour produire un couple important. Les expériences réalisées sur la patte *AXLeg* ont démontré, que la variation de la charge transportée n'a qu'une faible influence sur la puissance moyenne consommée par les actionneurs. Par exemple, l'augmentation moyenne de la puissance consommée P_{in} , entre un hexapode non chargé et un hexapode transportant de 500 g, est de seulement 4 W (pour β égal à 0,5). C'est neuf fois inférieur à l'augmentation moyenne de puissance entre une marche à 10 cm/s et une marche à 60 cm/s, égale à 36 W. Pour cette raison, les hexapodes équipés de servomoteurs ont un coût du transport, qui diminue constamment avec l'élévation de la charge.

Comme les calculs réalisés sont fondés sur les données d'une patte unique, nous avons la possibilité d'estimer les performances d'un robot quadrupède ou octopode (Fig. 3.10D). Comme prévu, la configuration quadrupède est celle engendrant les plus faibles valeurs du CoT/M . Ceci est dû au fait que la consommation du robot statique (la puissance basale), a une contribution significative à la puissance consommée par le robot. Avec ce type de servomoteurs, il est donc plus convenable de construire un robot quadrupède au lieu d'un hexapode. En revanche, plus le robot possède de pattes, plus il peut transporter des charges lourdes et engendrer une forte propulsion.

3. Évaluation des performances d'un robot hexapode

• 3.3. Évaluation des performances

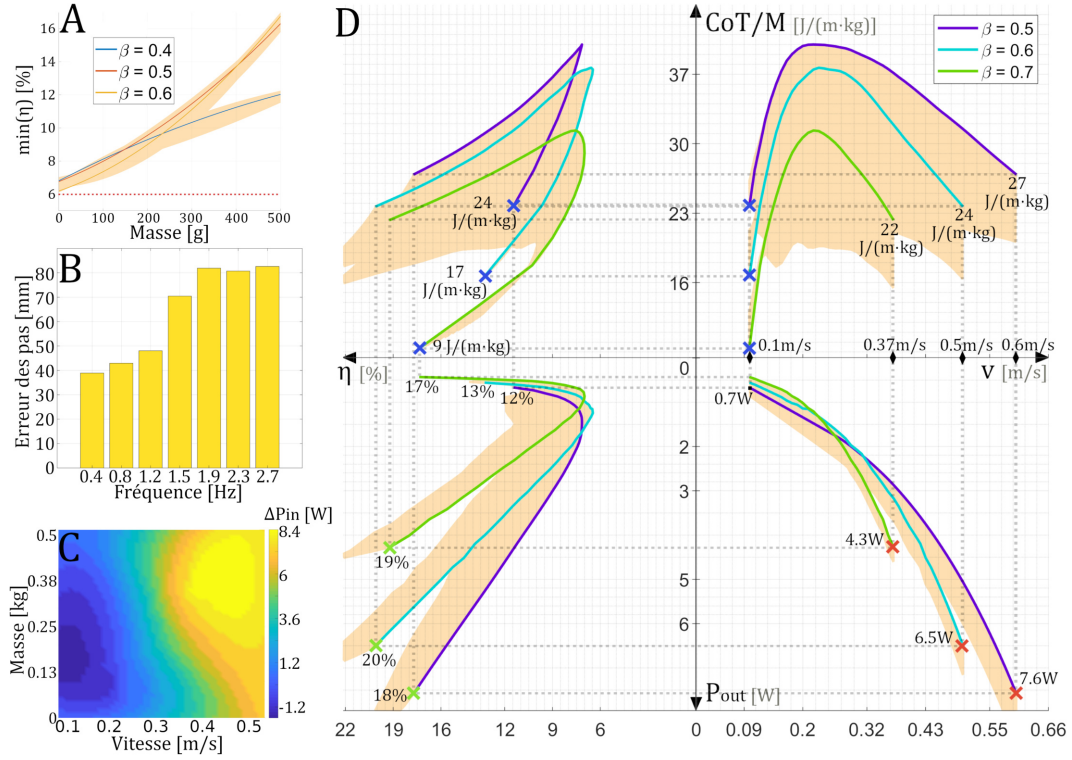


FIGURE 3.11. – (A) Limite du rendement minimal $\min(\eta)$ qui garantit l'existence de plusieurs points de fonctionnement. La région orange correspond aux variations des courbes lorsque la longueur des pas passe de 70 mm à 140 mm. (B) Erreur moyenne de la longueur des pas de l'hexapode pour plusieurs fréquences de marche. La longueur des pas de référence est de 100 mm. (C) Mesure de l'élévation de la puissance moyenne consommée par le robot complet P_{in} , après dix minutes de marche, en fonction de la vitesse et de la masse transportée. (D) Description énergétique de l'hexapode dans le cas où il posséderait plusieurs points de fonctionnement. Cas de figure obtenu en réduisant la puissance consommée P_{in} de 36 W. Les régions oranges représentent la variation des courbes lorsque la masse transportée varie de 0 g à 500 g. Les croix rouges représentent les points de fonctionnement maximisant la production de puissance mécanique. Les croix bleues correspondent au minimum des pertes énergétiques. Les croix vertes sont les points de rendement maximaux.

Indépendamment des paramètres de marche, l'hexapode testé atteint son unique point de fonctionnement optimal (PFO), lorsqu'il marche à la vitesse maximale (Fig. 3.10). Dans ce cas, le robot possède le rendement maximal η , la puissance mécanique maximale P_{out} , et une perte énergétique minimale CoT/M . En modifiant les paramètres du patron de marche, on peut ajuster la position du point de fonctionnement du robot localement, le déplaçant le long de l'axe des vitesses, mais globalement, il existe seulement un unique PFO. Contrairement aux hexapodes à base de servomoteurs, les animaux possèdent plusieurs PFO distincts [258] : un point de rendement maximal, un point de puissance maximale et un correspondant aux pertes énergé-

3. Évaluation des performances d'un robot hexapode

• 3.3. Évaluation des performances

tiques minimales. En fonction de la tâche réalisée, l'animal peut ajuster sa marche pour être le plus performant. Les animaux peuvent aussi posséder un même PFO atteignable avec des paramètres de marche différents. Par exemple, les chevaux peuvent passer d'une marche lente au trot tout en gardant la même valeur de CoT [156]. De manière générale, posséder plusieurs PFO reflète la capacité à être flexible énergiquement et de pouvoir s'adapter à des environnements exigeants. À partir de cette observation, on peut se demander comment il serait possible d'augmenter la flexibilité énergétique de notre robot? Les résultats obtenus à partir des données du banc de test ont montré, qu'un indicateur significatif serait la valeur minimale de l'efficacité énergétique $\min(\eta)$. Lorsqu'elle est supérieure à 6 %, de nouveaux PFO apparaissent. Il est important de noter que c'est une condition minimale et non suffisante, car ce seuil dépend du patron de marche choisi, de la longueur des pas, du rapport cyclique β et de la masse transportée (Fig. 3.11A).

Dans l'état normal, l'hexapode testé possède un rendement minimal ($\min(\eta)$) entre 1.1 % et 2.0 %. Cette valeur extrêmement faible est due aux nombreux défauts des servomoteurs, inexistants pour les muscles des êtres vivants. Certains de ces défauts sont structurels, comme le jeu mécanique de actionneurs, les pertes fer, les pertes Joule, la friction et la déformation des segments de la patte. D'autres, comme les erreurs de trajectoire, sont causées par le manque de précision du contrôle. Grâce au banc de test *MiMiC-Ant*, nous avons évalué l'impact des principaux défauts sur les performances énergétiques de l'hexapode (Fig. 3.11B-C). Cette étude a pour but d'identifier quels aspects du robot doivent être améliorés pour accroître sa flexibilité énergétique.

Le rendement du robot dépend de son design mécanique, de la température de l'environnement et de la durée de marche. Comme le montrent les données de capture de mouvement (Fig. 3.11B), on met en évidence que l'erreur de la longueur des pas augmente avec la fréquence de marche. Plus le robot marche vite, plus ses pas sont longs, alors que la commande impose une valeur fixe. Ce phénomène résulte des phénomènes non pris en compte dans la planification de la trajectoire et le contrôle, comme l'élasticité des matériaux, la compliance des actionneurs ou le jeu mécanique. Nous avons mesuré, que les erreurs cinématiques correspondent à au moins 13 % de la perte énergétique totale du robot (pour une marche de β égal à 0,5 et des pas de 100 mm). En plus des défauts cinématiques, la Fig. 3.11C illustre la présence d'une augmentation de la consommation énergétique du robot après une marche prolongée. Plus la vitesse et la masse transportée augmentent, plus les actionneurs surchauffent et plus ils consomment d'énergie. Plus le robot marche longtemps, plus cette augmentation est importante. L'augmentation de la puissance maximale par patte est autour de 1,4 W, ce qui résulte en une augmentation maximale de 8,4 W pour l'hexapode complet, après dix minutes de marche. Dans le cas d'une marche avec un β de 0,5 et une longueur des pas de 100 mm, cette augmentation de puissance représente jusqu'à 6 % de la perte énergétique totale. En dehors des effets cinématiques et thermiques, la consommation de puissance basale compte pour au moins 30 % de la perte énergétique totale.

Dans le cas hypothétique où on aurait amélioré le robot et éliminé les défauts précédemment cités, le rendement minimale ($\min(\eta)$), précédemment compris entre 1.1 % et 2.0 %, passerait à la plage de 1.5 % à 2.6 %. En se basant sur la Fig. 3.11A, nous pouvons dire que ce n'est pas une condition suffisante pour observer de nouveaux PFO. On peut donc supposer, que palier aux problèmes cinématiques, thermiques et à la consommation passive d'énergie, n'est pas suffisant pour optimiser le robot. L'ensemble de l'actionneur doit être remplacé une solution plus économe en énergie, mais certainement plus complexe. Si dans le cas hypothétique, on aurait eu un rendement minimal supérieur à 6 %, la description énergétique serait identique à celle donnée par la Fig. 3.11D. Ces courbes sont obtenus en diminuant la puissance consommée P_{in} de 36 W. Dans ce cas de figure, on peut voir deux PFOs. À chaque PFO est attribuée une vitesse différente. En sélectionnant la vitesse, on peut soit maximiser la puissance mécanique P_{out} (à 60 cm/s pour β égal à 0,5), représenté sur le graphique par les croix rouges, soit minimiser la perte énergétique CoT/M (à 10 cm/s pour β égal à 0,5), représenté par les croix bleues. Les paramètres de marche gardent les mêmes propriétés et influencent le graphique de la même façon que vu précédemment. Également, la longueur des pas et le rapport cyclique déterminent si le rendement maximal est atteint pour la puissance maximale ou pour la perte énergétique minimale. Un robot avec un tel profil énergétique pourrait, par exemple, accomplir des missions à hautes vitesses et à basses vitesses en gardant le même rendement. Cela illustre un comportement attendu des robots à pattes qui ne sont pas seulement développés pour accomplir des tâches rapides.

Discussion

Vis-à-vis des résultats présentés Fig. 3.10, on peut dire que notre approche aide à choisir les paramètres optimaux pour le patron de marche. On peut ainsi ajuster les courbes énergétiques à une tâche donnée. De plus, les indicateurs énergétiques semblent être plus significatifs qu'une simple étude de la puissance consommée [290] ou de la résistance spécifique [306, 145]. Si on prend l'exemple de la navigation sur terrain difficile, comme de l'herbe, des feuilles ou des rochers, notre étude montre qu'il est plus approprié de se déplacer lentement (Fig. 3.10C) avec un patron métachronal. Cette démarche favorise la stabilité, garantie une plus grande propulsion et une plus faible perte énergétique CoT/M , que la marche en tripode. Si on avait juste regardé la résistance spécifique, on aurait déduit que c'est la marche tripode qui est la plus adaptée et la plus économe en énergie [150]. L'erreur d'interprétation vient du fait, que par sa définition (Eq. 1.7), la résistance spécifique ϵ inclue la puissance mécanique P_{out} . Ainsi, toute démarche produisant une meilleure propulsion résulterait en une augmentation de ϵ . C'est ce qu'on observe avec le rythme métachronal, pour lequel on a plus de pattes en contact avec le sol, et donc une puissance mécanique accrue. Avec notre approche, il est possible d'identifier la portion de la puissance consommée qui est réellement utilisée pour la marche et celle correspondante aux pertes. Ce type de méthodes peut, par exemple, être utilisée pour améliorer les algorithmes de transition de patron de marche actuels [134], basés sur la détection de la rugosité et de la pente du terrain.

Tout de même, CoT/M et ϵ ont quelques propriétés communes. Ces deux indicateurs ont tendance à constamment décroître avec l'augmentation de la vitesse [306, 145]. Ce phénomène est dû au fait que la puissance consommée par le robot provient principalement de la consommation basale d'énergie ainsi que des effets dynamiques de premier ordre [306]. Une autre propriété commune, est qu'on peut réduire les pertes de puissance en sélectionnant le rapport cyclique β le plus élevé possible pour la vitesse donnée. Ce phénomène est illustré par notre étude, ainsi que par l'évaluation de la résistance spécifique chez d'autres robots hexapodes présentant une conception de pattes différente [306]. Concernant la longueur des pas, des valeurs intermédiaires sont généralement préférées, car des pas courts réduisent le rapport cyclique et la vitesse, les pas longs déstabilisent le robot [306].

Du point de vue biologique, les robots hexapodes à base de servomoteurs ont un CoT nettement supérieur au CoT des animaux de masse similaire [155, 135]. Dans la catégorie des animaux de 2 kg, le CoT minimal est constamment sous $19 J \cdot m^{-1} \cdot kg^{-1}$, alors que notre robot approche seulement $35 J \cdot m^{-1} \cdot kg^{-1}$ (pour une vitesse de 84 cm/s, pas de charge, des pas de 140 mm et un β de 0,5). Cependant, il est encore difficile de comparer les performances énergétiques des hexapodes à leur homologue animal. Le CoT est souvent mesuré pour les quadrupèdes ou les bipèdes. Aucune étude ne concerne des arthropodes de 2 kg, comme par exemple les crabes des cocotiers, ou des insectes d'une envergure autour de 45 cm. Les mammifères sont plus aptes à développer des optimisations énergétiques, car leur posture leur permet de passer d'une marche de type pendulaire à une marche de type ressort avec des phases aériennes [67, 70]. Ceci a inspiré le développement de nombreuses optimisations énergétiques pour les robots quadrupèdes, leur permettant d'atteindre des valeurs de CoT en dessous de $19 J \cdot m^{-1} \cdot kg^{-1}$ [279]. Tout de même, les récents progrès des systèmes de mesure ont révélés que la longueur des pas et le rapport cyclique augmentent linéairement avec la vitesse de marche des fourmis [307, 302]. Une observation en accord avec les résultats du banc de test, qui montre dans ce cas une amélioration de la consommation énergétique. L'existence de plusieurs PFO n'a pas encore été mise en évidence chez les insectes, malgré le fait que les données nécessaires à cette analyse sont déjà disponibles [223].

3.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les performances d'un robot hexapode accomplissant une mission d'exploration. Il a été primordial de définir quels sont les indicateurs de performance à utiliser et quelles sont leurs limites. Trois catégories d'indicateurs ont été mises en évidence : les indicateurs de robustesse sensorielle, les indicateurs de robustesse physique et ceux reflétant la robustesse énergétique du robot.

Une attention particulière a été portée aux indicateurs physiques et énergétiques, dont les méthodes de mesure n'ont jamais été correctement définies. À cet effet, le banc de test *MiMiC-Ant* a été construit, regroupant les techniques de mesure du domaine de la biologie et ceux du domaine de la robotique. Dans un premier temps, notre banc de test a permis d'évaluer les performances générales d'un robot

hexapode complet à partir des mesures réalisées sur une patte unique. On a ainsi montré, que les robots hexapodes actuels, basés sur des servomoteurs, possèdent des performances nettement inférieures à ceux des insectes, dont ils sont inspirés. Nous avons aussi pu évaluer les performances de la patte *Pohod15Leg*, et la situer par rapport aux designs de pattes existants. Bien que ces performances sont similaires, voire légèrement inférieures pour certains indicateurs énergétiques à ceux de la patte *AXLeg*, de nombreuses améliorations du prototype sont possibles, notamment au niveau de l'algorithme du contrôle.

Par ailleurs, nous avons vu une méthode novatrice mise en place sur le banc de test *MiMiC-Ant*, permettant de tracer le profil énergétique d'un robot hexapode. Cette méthode représente une nouvelle approche révolutionnaire dans le domaine de la robotique, car elle fournit des métriques plus simples à interpréter et à comparer aux performances des animaux. Le fil directeur de cette nouvelle méthode était la définition alternative du coût du transport, basée sur les lois de la thermodynamique. Une future amélioration de l'automatisation de cette procédure, pourrait faciliter l'évaluation des performances d'un robot hexapode, et ainsi accélérer le processus de développement de nouveaux designs. Le banc *MiMiC-Ant* pourrait aussi réduire le coût de production de nouveaux hexapodes, car on n'aurait plus besoin de construire un robot complet pour évaluer ses performances.

Cependant, il est important de rappeler, qu'en dehors de l'estimation du coût du transport, un paramètre important qui n'est pas encore bien décrit par les indicateurs énergétiques est l'épuisement thermique. En effet, la surchauffe est la première cause d'arrêt du fonctionnement d'un robot hexapode à base de servomoteurs. Il serait donc important dans de futurs travaux d'incorporer de nouveaux modules au banc de test, qui par l'utilisation de la caméra thermique déjà présente, seraient capables d'identifier le modèle thermique du robot pour en déduire ses limites.

Conclusion générale

Tout au long de ce projet de thèse nous avons parcouru le processus de développement d'un robot hexapode, de la définition du cahier des charges, en passant par le choix des matériaux, le design de la commande des actionneurs, et finissant par l'évaluation de ses performances. Une attention particulière a été portée sur le design de la patte *Pohod15Leg*, dont l'objectif était de fabriquer une structure facile à assembler, réparable, et modifiable afin que chacun puisse l'adapter à son utilisation. De même, a été construit le banc de test *MiMiC-Ant*. L'idée de cette partie du projet était de pallier le manque d'outils permettant d'estimer les performances des robots à pattes. Tout au long de notre étude des robots hexapodes bio-inspirés, plusieurs questions ont été soulevées et auxquelles nous pouvons maintenant apporter des réponses :

Quels sont les limites de la bio-inspiration ?

Tout au long du chapitre 1, nous avons vu les différentes thématiques abordées par la bio-robotique actuelle. Il est important de souligner, qu'on ne doit pas faire de la bio-inspiration pour faire de la bio-inspiration. Construire un robot bio-inspiré, doit être fait dans un but précis. Dans le cas de la patte *Pohod15Leg*, nous avons mis en évidence les nombreux défauts des hexapodes conventionnels, à base de servomoteurs. Ainsi, le développement d'une solution bio-inspirée, a permis de trouver une solution technique à ces défauts, mais aussi de développer une structure de patte imitant la morphologie animale pour garantir un modèle biologique fiable. Ainsi, le développement de nouvelles solutions s'inspirant de la nature prendra fin lorsque les performances des robots atteindront le même niveau que celles des animaux. Ceci peut être particulièrement vu par la tendance actuelle à vouloir réduire le coût du transport des hexapodes, en ayant pour cible celui des animaux.

Cependant, il est essentiel de prendre en considération les différences morphologiques entre un robot et son modèle animal. Comme l'a démontré le chapitre 3, en implémentant la trajectoire de marche de la patte d'une fourmi sur une patte de robot, nous n'avons pas réussi à générer un mouvement fluide. Particulièrement, lors du contact avec le sol, la patte *AXLeg₁* n'absorbait pas correctement l'impact due au manque de compliance. Il n'est donc pas toujours possible d'imiter fidèlement la structure ou le comportement d'un animal sur un robot, en raison des limitations technologiques ainsi que des différences d'échelle et de morphologie. Ainsi, s'inspirer de la nature ne fournit pas toujours la solution idéale, mais plutôt des indices sur la voie à suivre.

Qu'est-ce qu'un hexapode performant?

L'étude des performances des robots hexapodes a été l'une des tâches principales de ce travail. Le choix des indices de performances a toujours été complexe pour les hexapodes. L'existence d'une multitude de définitions de la résistance spécifique et du coût du transport souligne ce fait. La première étape de notre étude, était de définir ce qu'est la mission d'exploration, souvent attribuée à ce type de robots. La définition des critères de réussite nous a permis de définir plusieurs indicateurs de performances significatifs. Des indicateurs de robustesse énergétiques, sensoriels et physiques. Avec le banc de test *MiMiC-Ant*, nous avons vu qu'il n'était pas suffisant de donner une seule valeur caractéristique pour décrire le profil énergétique d'un individu, comme le CoT minimal. Il est plus avisé d'étudier les indicateurs à partir du graphique à quatre quadrants, présentant le CoT spécifique, le rendement, la puissance mécanique et la vitesse. Un hexapode performant dans les missions d'exploration serait un robot avec un profil adapté à sa tâche. Avec un rendement et une puissance mécanique élevés dans les hautes vitesses, favorisant le déplacement rapide sur les terrains accidentés. De même qu'en basses vitesses, sa perte énergétique devrait être faible pour économiser de l'énergie au moment de la réalisation des tâches statiques. Avec les robots hexapodes actuels, qui présentent des pertes énergétiques très élevées, l'amélioration des performances consisterait à chercher à augmenter leur vitesse. En effet, le terme de vitesse dans la définition du CoT/M prend rapidement le dessus sur le terme de puissance. Cependant, même si les hexapodes conventionnels possèdent un PFO à leur vitesse maximale et que cette vitesse atteint les 84 cm/s , leur rendement global ne dépasse jamais les 15 %. Cela signifie que près de 85 % de l'énergie consommée par ce type de robots est perdue. De plus, les mesures effectuées sur le banc de test *MiMiC-Ant* ont montré que, en optimisant les paramètres de marche par le système de contrôle de l'hexapode (rapport cyclique, longueur des pas, patron de marche), on ne parviendrait qu'à une réduction maximale des pertes de 30 %. Ainsi, tant que les actionneurs actuels, les servomoteurs, ne sont pas remplacés par des technologies plus optimisées, l'ajustement des paramètres de marche aura peu d'influence sur les performances énergétiques.

En résumé, nous pouvons dire que certains hexapodes conventionnels, à base de servomoteurs, peuvent être plus performants que d'autres, en fonction de leur vitesse maximale de marche. Mais globalement, ils restent encore très éloignés des performances de leurs homologues animales.

Quel est le futur de la bio-robotique hexapode?

La conception de contrôleurs bio-inspirés a toujours été une thématique très fertile et prolifique. De nombreux modèles d'oscillateurs CPG existent, ainsi que des architectures de contrôle basées sur des réflexes, comme le réseau *WalkNet*. L'application de ce type de contrôleurs sur les hexapodes a toujours été aisée, car il existe de nombreux capteurs pouvant imiter les organes sensoriels des insectes, ainsi que la morphologie des robots a peu d'importance. Cependant, avec le développement de systèmes de contrôle de plus en plus bio-mimétiques, des robots sophistiqués, tel que *Drosophibot*

ont vu le jour. Leur structure mécanique complexe, imite davantage la morphologie animale. Par exemple, ils possèdent des pattes incluant le tarse, souvent négligé en robotique, ou encore, des jauges de contrainte semblables aux *sensilles campaniformes*. Dans un futur proche, nous pouvons donc s'attendre, que la robotique hexapode se tournera davantage vers l'étude de la morphologie animale, car elle limitera les performances des contrôleurs bio-inspirés.

Les avancées techniques du domaine de l'impression 3D aura aussi un impact majeur sur la conception de nouveau hexapodes. Ces techniques de fabrications sont les plus adaptées pour concevoir des robots à des fins académiques et de publication en open source. Dans les prochaines années, nous pourrons ainsi voir des cuticules d'insectes imprimés en 3D, composées de multiples matériaux avec des caractéristiques mécaniques différentes.

En ce qui concerne les systèmes d'actionnement, la fabrication de muscles artificiels est essentielle à l'optimisation énergétique des hexapodes. De manière similaire aux fibres musculaires rapides et lentes chez les animaux, des actionneurs de différentes catégories de puissance pourraient être utilisés sur un robot pour améliorer l'efficacité dans des plages de vitesses sélectionnées. De cette façon, le profil énergétique des hexapodes pourrait être modelé plus aisément et adapté à leur mission. La patte *Pohod15Leg* a été spécialement conçue pour être utilisée avec ce type d'actionneurs. Sa grande envergure, pourrait accueillir deux muscles antagonistes, permettant non seulement de déplacer l'articulation, mais aussi d'intégrer de la compliance et un système sensoriel compact. De plus, de nouvelles méthodes sont en cours de développement permettant une description à l'échelle du micromètre de la morphologie des insectes. De telles avancées devraient être bénéfiques pour le développement de conceptions bio-mimétiques pour les robots à pattes, qui supporteront leur charge sur leur structure physique plutôt que par leurs actionneurs.

En résumé, pour parcourir plusieurs centaines de mètres avec un robot hexapode bio-inspiré, de nombreux défis restent encore à relever. Bien que les systèmes de contrôles bio-inspirés proposent des solutions robustes pour adapter la marche au terrain, c'est la morphologie des robots qui fait défaut. Les avancées technologiques actuelles ne permettent pas encore de surmonter les limitations des hexapodes conventionnels. Cependant, en explorant la voie de la bio-inspiration, de nouvelles pistes de recherche émergent déjà, offrant des perspectives prometteuses pour l'avenir de la bio-robotique à pattes.

Bibliographie

- [1] *Communiqué de Presse Yandex, "Yandex Self-Driving Group and Grubhub Partner for Robot Delivery on US College Campuses"*. Yandex Press Releases https://yandex.com/company/press_center/press_releases/2021/07-06-2021. Accessed : 2023-04-13.
- [2] *Communiqué de Presse DHL, "DHL Express lance son premier service de livraison régulier par drone urbain"*, 16-05-2019. Communiqué de presse DHL <https://www.dhl.com/fr-fr/home/presse/archives-presse/2019/dhl-express-lance-son-premier-service-de-livraison-regulier.html>. Accessed : 2023-04-13.
- [3] *Amazon Science*. <https://www.amazon.science/latest-news/amazon-robotics-autonomous-drive-units-hercules-pegasus-xanthus-xbot>. Accessed : 2023-04-13.
- [4] *Dictionnaire de l'Académie française, 9e édition*. <https://www.dictionnaire-academie.fr/article/A9A3264>. Accessed : 2023-04-13.
- [5] *Définition d'un robot, dictionnaire de l'Académie française, 9e édition*. <https://www.dictionnaire-academie.fr/article/A9R2773>. Accessed : 2023-04-13.
- [6] Sangbae KIM et Patrick M. WENSING. « Design of Dynamic Legged Robots ». In : *Foundations and Trends in Robotics* 5.2 (2017), p. 117-190. ISSN : 1935-8253, 1935-8261. DOI : [10.1561/23000000044](https://doi.org/10.1561/23000000044).
- [7] Julien DUPEYROUX. « Navigation autonome bio-inspirée appliquée à un robot hexapode ». Aix-Marseille Université, 5 juill. 2019.
- [8] Charles DARWIN. *On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life*. John Murray, 1859.
- [9] Poramate MANOONPONG, Luca PATANÈ, Xiaofeng XIONG et al. « Insect-Inspired Robots : Bridging Biological and Artificial Systems ». In : *Sensors* 21 (22 2021). DOI : [10.3390/s21227609](https://doi.org/10.3390/s21227609).
- [10] Julien DUPEYROUX, Julien R. SERRES et Stéphane VIOLLET. « AntBot : A six-legged walking robot able to home like desert ants in outdoor environments ». In : *Science Robotics* 4.27 (2019), p. 1-13. ISSN : 24709476. DOI : [10.1126/scirobotics.aau0307](https://doi.org/10.1126/scirobotics.aau0307).
- [11] HEBI ROBOTICS. *ISO 18458 :2015 Biomimétique - Terminologie, concepts et méthodologie*. <https://www.iso.org/fr/standard/62500.html>. Accessed : 2019-11-19. 2015.

- [12] Mat FOURNIER. « Quand la nature inspire la science : biomimétisme ». In : sous la dir. de Plume de CAROTTE. Nov. 2021.
- [13] Patricia RICARD. *Le biomimétisme : s'inspirer de la nature pour innover durablement*. John Wiley & Sons, Ltd, 2015. URL : https://medias.vie-publique.fr/data_storage_s3/rapport/pdf/154000667.pdf.
- [14] Nicolas FRANCESCHINI, Stéphane VIOLLET, Franck RUFFIER et al. « Neuromimetic Robots Inspired by Insect Vision ». In : *Advances in Science and Technology* 58 (sept. 2008), p. 127-136. DOI : [10.4028/www.scientific.net/AST.58.127](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AST.58.127).
- [15] Fabien COLONNIER, Soledad RAMÍREZ-MARTÍNEZ, Stéphane VIOLLET et al. « A bio-inspired sighted robot chases like a hoverfly ». In : *Bioinspiration & Biomimetics* 14 (2019).
- [16] Fabien EXPERT et Franck RUFFIER. « Flying over uneven moving terrain based on optic-flow cues without any need for reference frames or accelerometers ». In : *Bioinspiration & Biomimetics* 10.2 (2015), p. 026003. DOI : [10.1088/1748-3182/10/2/026003](https://doi.org/10.1088/1748-3182/10/2/026003).
- [17] « A biomimetic honeybee robot for the analysis of the honeybee dance communication system ». In : *IEEE/RSJ 2010 International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2010 - Conference Proceedings* (2010), p. 3097-3102. DOI : [10.1109/IROS.2010.5650930](https://doi.org/10.1109/IROS.2010.5650930).
- [18] « Analysis of the waggle dance motion of honeybees for the design of a biomimetic honeybee robot ». In : *PLoS ONE* 6 (8 2011). ISSN : 19326203. DOI : [10.1371/journal.pone.0021354](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0021354).
- [19] Petr ČÍŽEK, Martin ZOULA et Jan FAIGL. « Design, Construction, and Rough-Terrain Locomotion Control of Novel Hexapod Walking Robot With Four Degrees of Freedom Per Leg ». In : *IEEE Access* 9 (2021), p. 17866-17881.
- [20] G. PICARDI, M. CHELLAPURATH, S. IACOPONI et al. « Bioinspired Underwater Legged Robot for Seabed Exploration with Low Environmental Disturbance ». In : *Science Robotics* 5.42 (13 mai 2020), eaaz1012. ISSN : 2470-9476. DOI : [10.1126/scirobotics.aaz1012](https://doi.org/10.1126/scirobotics.aaz1012).
- [21] Shou ZHAI, Bo JIN et Yilü CHENG. « Mechanical Design and Gait Optimization of Hydraulic Hexapod Robot Based on Energy Conservation ». In : *Applied Sciences* 10.11 (3 juin 2020), p. 3884. ISSN : 2076-3417. DOI : [10.3390/app10113884](https://doi.org/10.3390/app10113884).
- [22] Mathias THOR. « MORF - Modular Robot Framework ». Mém. de mast. Maersk Mc-Kinney Moller Inst., Univ. Southern Denmark, Odense, Denmark, fév. 2019.
- [23] Mathias THOR et Poramate MANOONPONG. « A fast online frequency adaptation mechanism for CPG-based robot motion control ». In : *IEEE Robotics and Automation Letters* 4.4 (2019), p. 3324-3331.
- [24] HEBI ROBOTICS. *Daisy Hexapod Robot Kit (18-DoF)*, Ref. A-2049-01, <https://www.hebirobotics.com/>. https://docs.hebi.us/resources/kits/outOfTheBox/A-2049-01_Box_Manual.pdf. Accessed : 2019-11-19. 2019.

- [25] Clarissa GOLDSMITH, Nicholas SZCZECINSKI et Roger QUINN. « Drosophibot : a fruit fly inspired bio-robot ». In : *Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems*. Springer. 2019, p. 146-157.
- [26] C A GOLDSMITH, N S SZCZECINSKI et R D QUINN. « Neurodynamic modeling of the fruit fly *Drosophila melanogaster* ». In : *Bioinspiration & Biomimetics* 15.6 (sept. 2020), p. 065003. DOI : [10.1088/1748-3190/ab9e52](https://doi.org/10.1088/1748-3190/ab9e52). URL : <https://doi.org/10.1088/1748-3190/ab9e52>.
- [27] Julien DUPEYROUX, Stéphane VIOLLET et Julien R SERRES. « An ant-inspired celestial compass applied to autonomous outdoor robot navigation ». In : *Robotics and Autonomous Systems* 117 (2019), p. 40-56.
- [28] Wei CHEAH, Hassan Hakim KHALILI, Farshad ARVIN et al. « Advanced motions for hexapods ». In : *International Journal of Advanced Robotic Systems* 16.2 (2019), p. 1729881419841537.
- [29] Bin ZHONG, Shiwu ZHANG, Min XU et al. « On a CPG-based hexapod robot : AmphiHex-II with variable stiffness legs ». In : *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 23.2 (2018), p. 542-551.
- [30] Oscar A SILVA, Pascal SIGEL, Warren EATON et al. « CRABOT : A Six-legged Platform for Environmental Exploration and Object Manipulation. » In : *CRoNe*. 2018, p. 46-51.
- [31] Julien DUPEYROUX, Grégoire PASSAULT, Franck RUFFIER et al. « Hexabot : a small 3D-printed six-legged walking robot designed for desert ant-like navigation tasks ». In : *IFAC Word Congress*. T. 2017. 2017, p. 1628-1631.
- [32] TROSSEN ROBOTICS. *PhantomX AX Metal Hexapod MK-III Kit, Ref. KIT-PXC-HEX-MK3-AX12*. <https://www.trossenrobotics.com/phantomx-ax-hexapod.aspx>. Accessed : 2021-06-03. 2020.
- [33] Ioannis RODITIS, Theofanis NITSOS, Antonios PORICHIS et al. « Maintaining Static Stability and Continuous Motion in Rough Terrain Hexapod Locomotion without Terrain Mapping ». In : *2016 24th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*. 2016 24th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED). Athens, Greece : IEEE, juin 2016, p. 545-550. DOI : [10.1109/MED.2016.7536027](https://doi.org/10.1109/MED.2016.7536027).
- [34] Marko BJELONIC, Navinda KOTTEGE et Philipp BECKERLE. « Proprioceptive control of an over-actuated hexapod robot in unstructured terrain ». In : *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE. 2016, p. 2042-2049.
- [35] Kåre HALVORSEN. *MXPhoenix, Zenta Robotic Creations*. <http://zentasrobots.com/>. Accessed : 2021-06-10. 2016.
- [36] Jose Hugo BARRON-ZAMBRANO, Cesar TORRES-HUITZIL et Bernard GIRAU. « Perception driven adaptive CPG-based locomotion for hexapod robots ». In : *Neurocomputing* 170 (2015), p. 63-78.
- [37] Mayur PALANKAR et Luther PALMER. « A force threshold-based position controller for legged locomotion ». In : *Autonomous Robots* 38.3 (2015), p. 301-316.

- [38] Nicholas S SZCZECINSKI, David M CHRZANOWSKI, David W COFER et al. « MantisBot : a platform for investigating mantis behavior via real-time neural control ». In : *Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems*. Springer. 2015, p. 175-186.
- [39] Nicholas S SZCZECINSKI, Andrew P GETSY, Joshua P MARTIN et al. « Mantisbot is a robotic model of visually guided motion in the praying mantis ». In : *Arthropod structure & development* 46.5 (2017), p. 736-751.
- [40] Simon KALOUCHE, David ROLLINSON et Howie CHOSSET. « Modularity for Maximum Mobility and Manipulation : Control of a Reconfigurable Legged Robot with Series-Elastic Actuators ». In : (oct. 2015).
- [41] FESTO. *BionicANT*. https://www.festo.com/fr/fr/e/a-propos-de-festo/recherche-et-developpement/bionic-learning-network/faits-marquants-2015-2017/bionlicants-id_33396/. Accessed : 2021-06-11. 2015.
- [42] Duncan W. HALDANE et Ronald S. FEARING. « Running beyond the Bio-Inspired Regime ». In : *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Seattle, WA, USA : IEEE, mai 2015, p. 4539-4546. ISBN : 978-1-4799-6923-4. DOI : [10.1109/ICRA.2015.7139828](https://doi.org/10.1109/ICRA.2015.7139828).
- [43] Axel SCHNEIDER, Jan PASKARBEIT, Malte SCHILLING et al. « HECTOR, a bio-inspired and compliant hexapod robot ». In : *Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems*. Springer. 2014, p. 427-429.
- [44] Volker DÜRR, Paolo P ARENA, Holk CRUSE et al. « Integrative biomimetics of autonomous hexapedal locomotion ». In : *Frontiers in neurorobotics* 13 (2019), p. 88. ISSN : 1662-5218. DOI : [10.3389/fnbot.2019.00088](https://doi.org/10.3389/fnbot.2019.00088).
- [45] Hanno Gerd MEYER, Daniel KLIMECK, Jan PASKARBEIT et al. « Resource-efficient bio-inspired visual processing on the hexapod walking robot HECTOR ». In : *Plos one* 15.4 (2020), e0230620.
- [46] Dominik BELTER et Krzysztof WALAS. « A compact walking robot–flexible research and development platform ». In : *Recent advances in automation, robotics and measuring techniques*. Springer, 2014, p. 343-352.
- [47] Dominik BELTER, Piotr SKRZYPCZYŃSKI, Krzysztof WALAS et al. « Affordable multi-legged robots for research and STEM education : A case study of design and technological aspects ». In : *Progress in Automation, Robotics and Measuring Techniques*. Springer, 2015, p. 23-34.
- [48] Arne RÖNNAU, Georg HEPPNER, Michal NOWICKI et al. « LAURON V : A versatile six-legged walking robot with advanced maneuverability ». In : *2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. IEEE. 2014, p. 82-87.

- [49] T BUETTNER, A ROENNAU, G HEPPNER et al. « Design of an exchangeable, compact and modular bio-inspired leg for six-legged walking robots ». In : *Human-Centric Robotics : Proceedings of CLAWAR 2017 : 20th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*. World Scientific. 2018, p. 89-96.
- [50] Thomas M ROEHR, Florian CORDES et Frank KIRCHNER. « Reconfigurable integrated multirobot exploration system (RIMRES) : Heterogeneous modular reconfigurable robots for space exploration ». In : *Journal of Field Robotics* 31.1 (2014), p. 3-34.
- [51] BONG-HUAN JUN, HYUNGWON SHIM, BANGHYUN KIM et al. « Development of Seabed Walking Robot CR200 ». In : *2013 MTS/IEEE OCEANS - Bergen*. 2013 MTS/IEEE OCEANS. Bergen : IEEE, juin 2013, p. 1-5. DOI : [10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6608164](https://doi.org/10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6608164).
- [52] Arndt von TWICKEL, Manfred HILD, Torsten SIEDEL et al. « Neural Control of a Modular Multi-Legged Walking Machine : Simulation and Hardware ». In : *Robotics and Autonomous Systems* 60.2 (fév. 2012), p. 227-241. ISSN : 09218890. DOI : [10.1016/j.robot.2011.10.006](https://doi.org/10.1016/j.robot.2011.10.006).
- [53] Jie ZHAO, He ZHANG, Yubin LIU et al. « Development of the Hexapod Robot HITCR-II for Walking on Unstructured Terrain ». In : *2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). Chengdu, China : IEEE, août 2012, p. 64-69. DOI : [10.1109/ICMA.2012.6282808](https://doi.org/10.1109/ICMA.2012.6282808).
- [54] Umar ASIF et Javaid IQBAL. « Motion planning using an impact-based hybrid control for trajectory generation in adaptive walking ». In : *International Journal of Advanced Robotic Systems* 8.4 (2011), p. 53.
- [55] Kevin C GALLOWAY, Jonathan E CLARK, Mark YIM et al. « Experimental investigations into the role of passive variable compliant legs for dynamic robotic locomotion ». In : *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE. 2011, p. 1243-1249.
- [56] Kevin C GALLOWAY, Jonathan E CLARK et Daniel E KODITSCHKEK. « Variable stiffness legs for robust, efficient, and stable dynamic running ». In : *Journal of Mechanisms and Robotics* 5.1 (2013).
- [57] Antoine CULLY, Jeff CLUNE, Danesh TARAPORE et al. « Robots That Can Adapt like Animals ». In : *Nature* 521.7553 (28 mai 2015), p. 503-507. ISSN : 0028-0836, 1476-4687. DOI : [10.1038/nature14422](https://doi.org/10.1038/nature14422).
- [58] Rasel HOSSAIN. « A Short Review of the Drone Technology ». In : 7 (août 2022), p. 16.
- [59] Kevin C GALLOWAY, Galen Clark HAYNES, B Deniz ILHAN et al. *X-RHex : A highly mobile hexapedal robot for sensorimotor tasks*. Rapp. tech. University of Pennsylvania, USA, Department of Electrical & Systems Engineering, avr. 2010.

- [60] Mantian LI, Zhicheng HE et Fusheng ZHA. « Design and Analysis of a Semi-circular Flexible Hexapod Robot MiniRHex ». In : *2018 13th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*. 2018, p. 418-423. DOI : [10.1109/WCICA.2018.8630613](https://doi.org/10.1109/WCICA.2018.8630613).
- [61] Nicholas SZCZECINSKI et Roger QUINN. « Template for the neural control of directed stepping generalized to all legs of MantisBot ». In : *Bioinspiration & Biomimetics* 12 (avr. 2017). DOI : [10.1088/1748-3190/aa6dd9](https://doi.org/10.1088/1748-3190/aa6dd9).
- [62] Franco TEDESCHI et Giuseppe CARBONE. « Hexapod walking robot locomotion ». In : *Mechanisms and Machine Science* 29 (jan. 2015), p. 439-468. ISSN : 22110992. DOI : [10.1007/978-3-319-14705-5_15](https://doi.org/10.1007/978-3-319-14705-5_15).
- [63] Malte SCHILLING, Thierry HOINVILLE, Josef SCHMITZ et al. « Walknet, a Bio-Inspired Controller for Hexapod Walking ». In : *Biological Cybernetics* 107.4 (août 2013), p. 397-419. ISSN : 0340-1200, 1432-0770. DOI : [10.1007/s00422-013-0563-5](https://doi.org/10.1007/s00422-013-0563-5).
- [64] J. J. COLLINS et Ian STEWART. « Hexapodal gaits and coupled nonlinear oscillator models ». In : *Biol. Cybern* 68 (1993), p. 287-298.
- [65] Franco TEDESCHI et Giuseppe CARBONE. « Design Issues for Hexapod Walking Robots ». In : *Robotics* 3.2 (10 juin 2014), p. 181-206. ISSN : 2218-6581. DOI : [10.3390/robotics3020181](https://doi.org/10.3390/robotics3020181).
- [66] Yuichi AMBE, Shinya AOI, Timo NACHSTEDT et al. « Simple Analytical Model Reveals the Functional Role of Embodied Sensorimotor Interaction in Hexapod Gaits ». In : *PLOS ONE* 13.2 (28 fév. 2018). Sous la dir. de Gennady CYMBALYUK, e0192469. ISSN : 1932-6203. DOI : [10.1371/journal.pone.0192469](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192469).
- [67] Donald F. HOYT, Steven J. WICKLER, Darren J. DUTTO et al. « What are the relations between mechanics, gait parameters, and energetics in terrestrial locomotion? » In : *Journal of Experimental Zoology Part A : Comparative Experimental Biology* 305 (11 nov. 2006), p. 912-922. ISSN : 15488969. DOI : [10.1002/jez.a.335](https://doi.org/10.1002/jez.a.335).
- [68] Hugo MERIENNE. « Biomécanique et énergétique de la locomotion et du transport de charge chez la fourmi ». Thèse de doct. University of Toulouse 3 (Paul Sabatier), Doctoral school "Science écologiques, vétérinaires, agronomiques et bioingénieries", Toulouse, France, 2019.
- [69] Joana COELHO, Fernando RIBEIRO, Bruno DIAS et al. « Trends in the Control of Hexapod Robots : A Survey ». In : *Robotics* 10.3 (4 août 2021), p. 100. ISSN : 2218-6581. DOI : [10.3390/robotics10030100](https://doi.org/10.3390/robotics10030100).
- [70] Tom WEIHMANN. « Survey of biomechanical aspects of arthropod terrestriation – Substrate bound legged locomotion ». In : *Arthropod Structure and Development* 59 (2020), p. 100983. ISSN : 18735495. DOI : [10.1016/j.asd.2020.100983](https://doi.org/10.1016/j.asd.2020.100983). URL : <https://doi.org/10.1016/j.asd.2020.100983>.

- [71] Phuc Huu TRUONG, Jinwook LEE, Ae-Ran KWON et al. « Stride Counting in Human Walking and Walking Distance Estimation Using Insole Sensors ». In : *Sensors* 16.6 (2016). DOI : [10.3390/s16060823](https://doi.org/10.3390/s16060823). URL : <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/6/823>.
- [72] Felix RUPPERT et Alexander BADRI-SPRÖWITZ. « Learning Plastic Matching of Robot Dynamics in Closed-Loop Central Pattern Generators ». In : *Nature Machine Intelligence* 4.7 (18 juill. 2022), p. 652-660. ISSN : 2522-5839. DOI : [10.1038/s42256-022-00505-4](https://doi.org/10.1038/s42256-022-00505-4).
- [73] Shinya AOI, Poramate MANOONPONG, Yuichi AMBE et al. « Adaptive Control Strategies for Interlimb Coordination in Legged Robots : A Review ». In : *Frontiers in Neurorobotics* 11 (23 août 2017), p. 39. ISSN : 1662-5218. DOI : [10.3389/fnbot.2017.00039](https://doi.org/10.3389/fnbot.2017.00039).
- [74] Carlos Viescas HUERTA, Xiaofeng XIONG, Peter BILLESCHOU et al. « Adaptive Neuromechanical Control for Robust Behaviors of Bio-Inspired Walking Robots ». In : *International Conference on Neural Information Processing*. Springer. 2020, p. 775-786.
- [75] Xiaofeng XIONG, Florentin WORGOTTER et Poramate MANOONPONG. « Adaptive and Energy Efficient Walking in a Hexapod Robot Under Neuromechanical Control and Sensorimotor Learning ». In : *IEEE Transactions on Cybernetics* 46.11 (nov. 2016), p. 2521-2534. ISSN : 2168-2267, 2168-2275. DOI : [10.1109/TCYB.2015.2479237](https://doi.org/10.1109/TCYB.2015.2479237).
- [76] Clint J PERRY, Andrew B BARRON et Lars CHITTKA. « The frontiers of insect cognition ». In : *Current Opinion in Behavioral Sciences* 16 (2017). Comparative cognition, p. 111-118. ISSN : 2352-1546. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2017.05.011>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352154616302017>.
- [77] Holk CRUSE et Malte SCHILLING. « Mental States as Emergent Properties From Walking to Consciousness ». In : *Open Mind*. MIND Group Frankfurt/M, jan. 2015, p. 335-373. DOI : [10.15502/9783958570436](https://doi.org/10.15502/9783958570436).
- [78] H. CRUSE, V. DÜRR, M. SCHILLING et al. « Principles of Insect Locomotion ». In : *Spatial Temporal Patterns for Action-Oriented Perception in Roving Robots*. Sous la dir. de Paolo ARENA et Luca PATANÈ. T. 1. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2009, p. 43-96. DOI : [10.1007/978-3-540-88464-4_2](https://doi.org/10.1007/978-3-540-88464-4_2).
- [79] Ansgar BÜSCHGES, Turgay AKAY, Jens P. GABRIEL et al. « Organizing Network Action for Locomotion : Insights from Studying Insect Walking ». In : *Brain Research Reviews* 57.1 (jan. 2008), p. 162-171. ISSN : 01650173. DOI : [10.1016/j.brainresrev.2007.06.028](https://doi.org/10.1016/j.brainresrev.2007.06.028).
- [80] Ulrich BÄSSLER et Uta WEGNER. « Motor Output of the Denervated Thoracic Ventral Nerve Cord in the Stick Insect *Carausius Morosus* ». In : *Journal of Experimental Biology* 105.1 (1^{er} juill. 1983), p. 127-145. ISSN : 0022-0949, 1477-9145. DOI : [10.1242/jeb.105.1.127](https://doi.org/10.1242/jeb.105.1.127).

- [81] Charalampos MANTZIARIS, Till BOCKEMÜHL et Ansgar BÜSCHGES. « Central Pattern Generating Networks in Insect Locomotion ». In : *Developmental Neurobiology* 80.1-2 (jan. 2020), p. 16-30. ISSN : 1932-8451, 1932-846X. DOI : [10.1002/dneu.22738](https://doi.org/10.1002/dneu.22738).
- [82] Eva M. BERG, Scott L. HOOPER, Joachim SCHMIDT et al. « A Leg-Local Neural Mechanism Mediates the Decision to Search in Stick Insects ». In : *Current Biology* 25.15 (août 2015), p. 2012-2017. ISSN : 09609822. DOI : [10.1016/j.cub.2015.06.017](https://doi.org/10.1016/j.cub.2015.06.017).
- [83] *Photographie de la fourmi Cataglyphis fortis*. <https://antwiki.org/>. Accessed : 23-08-2023.
- [84] Dirk BUCHER, Turgay AKAY, Ralph A. DICAPRIO et al. « Interjoint Coordination in the Stick Insect Leg-Control System : The Role of Positional Signaling ». In : *Journal of Neurophysiology* 89.3 (1^{er} mars 2003), p. 1245-1255. ISSN : 0022-3077, 1522-1598. DOI : [10.1152/jn.00637.2002](https://doi.org/10.1152/jn.00637.2002).
- [85] Turgay AKAY, Björn Ch. LUDWAR, Marie L. GÖRITZ et al. « Segment Specificity of Load Signal Processing Depends on Walking Direction in the Stick Insect Leg Muscle Control System ». In : *The Journal of Neuroscience* 27.12 (21 mars 2007), p. 3285-3294. ISSN : 0270-6474, 1529-2401. DOI : [10.1523/JNEUROSCI.5202-06.2007](https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5202-06.2007).
- [86] Silvia DAUN–GRUHN et Tibor Istvan TÓTH. « An Inter-Segmental Network Model and Its Use in Elucidating Gait-Switches in the Stick Insect ». In : *Journal of Computational Neuroscience* 31.1 (août 2011), p. 43-60. ISSN : 0929-5313, 1573-6873. DOI : [10.1007/s10827-010-0300-1](https://doi.org/10.1007/s10827-010-0300-1).
- [87] Nicholas S. SZCZECINSKI et Roger D. QUINN. « MantisBot Changes Stepping Speed by Entraining CPGs to Positive Velocity Feedback ». In : *Biomimetic and Biohybrid Systems*. Sous la dir. de Michael MANGAN, Mark CUTKOSKY, Anna MURA et al. T. 10384. Cham : Springer International Publishing, 2017, p. 440-452. DOI : [10.1007/978-3-319-63537-8_37](https://doi.org/10.1007/978-3-319-63537-8_37).
- [88] Barbara WEBB. « Neural Mechanisms for Prediction : Do Insects Have Forward Models? » In : *Trends in Neurosciences* 27.5 (mai 2004), p. 278-282. ISSN : 01662236. DOI : [10.1016/j.tins.2004.03.004](https://doi.org/10.1016/j.tins.2004.03.004).
- [89] Donald M WILSON. « Insect walking ». In : *Annual review of entomology* 11.1 (1966), p. 103-122.
- [90] Silke STEINGRUBE, Marc TIMME, Florentin WÖRGÖTTER et al. « Self-Organized Adaptation of a Simple Neural Circuit Enables Complex Robot Behaviour ». In : *Nature Physics* 6.3 (mars 2010), p. 224-230. ISSN : 1745-2473, 1745-2481. DOI : [10.1038/nphys1508](https://doi.org/10.1038/nphys1508).
- [91] Poramate MANOONPONG, Ulrich PARLITZ et Florentin WÖRGÖTTER. « Neural Control and Adaptive Neural Forward Models for Insect-like, Energy-Efficient, and Adaptable Locomotion of Walking Machines ». In : *Frontiers in Neural Circuits* 7 (2013). ISSN : 1662-5110. DOI : [10.3389/fncir.2013.00012](https://doi.org/10.3389/fncir.2013.00012).

- [92] Kenneth S. ESPENSCHIED, Roger D. QUINN, Randall D. BEER et al. « Biologically Based Distributed Control and Local Reflexes Improve Rough Terrain Locomotion in a Hexapod Robot ». In : *Robotics and Autonomous Systems* 18.1-2 (juill. 1996), p. 59-64. ISSN : 09218890. DOI : [10.1016/0921-8890\(96\)00003-6](https://doi.org/10.1016/0921-8890(96)00003-6).
- [93] K.G. PEARSON et R. FRANKLIN. « Characteristics of Leg Movements and Patterns of Coordination in Locusts Walking on Rough Terrain ». In : *The International Journal of Robotics Research* 3.2 (juin 1984), p. 101-112. ISSN : 0278-3649, 1741-3176. DOI : [10.1177/027836498400300209](https://doi.org/10.1177/027836498400300209).
- [94] Joseph MIZRAHI. « Mechanical Impedance and Its Relations to Motor Control, Limb Dynamics, and Motion Biomechanics ». In : *Journal of Medical and Biological Engineering* 35.1 (fév. 2015), p. 1-20. ISSN : 1609-0985, 2199-4757. DOI : [10.1007/s40846-015-0016-9](https://doi.org/10.1007/s40846-015-0016-9).
- [95] B. H. BRESSLER et N. F. CLINCH. « The Compliance of Contracting Skeletal Muscle ». In : *The Journal of Physiology* 237.3 (1^{er} mars 1974), p. 477-493. ISSN : 00223751. DOI : [10.1113/jphysiol.1974.sp010493](https://doi.org/10.1113/jphysiol.1974.sp010493).
- [96] H. CRUSE, S. KÜHN, S. PARK et al. « Adaptive Control for Insect Leg Position : Controller Properties Depend on Substrate Compliance ». In : *Journal of Comparative Physiology A* 190.12 (déc. 2004), p. 983-991. ISSN : 0340-7594, 1432-1351. DOI : [10.1007/s00359-004-0555-y](https://doi.org/10.1007/s00359-004-0555-y).
- [97] « Neurorobotics ». In : *Informatik-Spektrum* 40.2 (2017), p. 161-164. ISSN : 1432-122X. DOI : [10.1007/s00287-017-1031-8](https://doi.org/10.1007/s00287-017-1031-8). URL : <https://doi.org/10.1007/s00287-017-1031-8>.
- [98] Archibald Vivian HILL. « The Heat of Shortening and the Dynamic Constants of Muscle ». In : *Proceedings of the Royal Society of London. Series B - Biological Sciences* 126.843 (3 août 1938), p. 136-195. DOI : [10.1098/rspb.1938.0050](https://doi.org/10.1098/rspb.1938.0050).
- [99] Christophe GOUPIL, Henni OUERDANE, Eric HERBERT et al. « Thermodynamics of metabolic energy conversion under muscle load ». In : *New Journal of Physics* 21 (2 fév. 2019). ISSN : 13672630. DOI : [10.1088/1367-2630/ab0223](https://doi.org/10.1088/1367-2630/ab0223).
- [100] J. L. PROCTOR et P. HOLMES. « The Effects of Feedback on Stability and Maneuverability of a Phase-Reduced Model for Cockroach Locomotion ». In : *Biological Cybernetics* 112.4 (août 2018), p. 387-401. ISSN : 0340-1200, 1432-0770. DOI : [10.1007/s00422-018-0762-1](https://doi.org/10.1007/s00422-018-0762-1).
- [101] Auke Jan IJSPEERT. « Central Pattern Generators for Locomotion Control in Animals and Robots : A Review ». In : *Neural Networks* 21.4 (mai 2008), p. 642-653. ISSN : 08936080. DOI : [10.1016/j.neunet.2008.03.014](https://doi.org/10.1016/j.neunet.2008.03.014).
- [102] Mostafa AJALLOOEIAN. « Pattern Generation for Rough Terrain Locomotion with Quadrupedal Robots : Morphed Oscillators & Sensory Feedback ». ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, 2015.
- [103] J. HELLGREN, S. GRILLNER et A. LANSNER. « Computer Simulation of the Segmental Neural Network Generating Locomotion in Lamprey by Using Populations of Network Interneurons ». In : *Biological Cybernetics* 68.1 (nov. 1992), p. 1-13. ISSN : 0340-1200, 1432-0770. DOI : [10.1007/BF00203132](https://doi.org/10.1007/BF00203132).

- [104] Orjan EKEBERG. « A Combined Neuronal and Mechanical Model of Fish Swimming ». In : *Biol. Cybern.* 69 (1993), p. 363-374.
- [105] Frank PASEMANN, Manfred HILD et Keyan ZAHEDI. « SO(2)-Networks as Neural Oscillators ». In : *Computational Methods in Neural Modeling*. Sous la dir. de José MIRA et José R. ÁLVAREZ. Réd. par Gerhard GOOS, Juris HARTMANIS et Jan VAN LEEUWEN. T. 2686. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2003, p. 144-151. DOI : [10.1007/3-540-44868-3_19](https://doi.org/10.1007/3-540-44868-3_19).
- [106] Ludovic RIGHETTI, Jonas BUCHLI et Auke Jan IJSPEERT. « Dynamic Hebbian Learning in Adaptive Frequency Oscillators ». In : *Physica D : Nonlinear Phenomena* 216.2 (avr. 2006), p. 269-281. ISSN : 01672789. DOI : [10.1016/j.physd.2006.02.009](https://doi.org/10.1016/j.physd.2006.02.009).
- [107] Mathias THOR et Poramate MANOONPONG. « Error-Based Learning Mechanism for Fast Online Adaptation in Robot Motor Control ». In : *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems* 31.6 (juin 2020), p. 2042-2051. ISSN : 2162-237X, 2162-2388. DOI : [10.1109/TNNLS.2019.2927737](https://doi.org/10.1109/TNNLS.2019.2927737).
- [108] Poramate MANOONPONG, Frank PASEMANN et Hubert ROTH. « Modular reactive neurocontrol for biologically inspired walking machines ». In : *The International Journal of Robotics Research* 26.3 (2007), p. 301-331.
- [109] Thomas BUSCHMANN, Alexander EWALD, Arndt von TWICKEL et al. « Controlling legs for locomotion—Insights from robotics and neurobiology ». In : *Bioinspiration & biomimetics* 10.4 (2015), p. 041001.
- [110] Arne ROENNAU, Thilo KERSCHER, Marco ZIEGENMEYER et al. « Adaptation of a six-legged walking robot to its local environment ». In : *Robot Motion and Control 2009*. Springer, 2009, p. 155-164.
- [111] Jettanan HOMCHANTHANAKUL, Potiwat NGAMKAJORNWIWAT, Pitiwut TEERAKITTIKUL et al. « Neural Control with an Artificial Hormone System for Energy-Efficient Compliant Terrain Locomotion and Adaptation of Walking Robots ». In : *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Macau, China : IEEE, nov. 2019, p. 5475-5482. DOI : [10.1109/IROS40897.2019.8968580](https://doi.org/10.1109/IROS40897.2019.8968580).
- [112] J. Camilo Vasquez TIECK, Jacqueline RUTSCHKE, Jacques KAISER et al. « Combining Spiking Motor Primitives with a Behaviour-Based Architecture to Model Locomotion for Six-Legged Robots ». In : *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Macau, China : IEEE, nov. 2019, p. 4161-4168. DOI : [10.1109/IROS40897.2019.8968128](https://doi.org/10.1109/IROS40897.2019.8968128).
- [113] Peter CORKE. « Robotics, Vision and Control ». In : *Robotics, Vision and Control*. Springer Cham, 2017. Chap. 1, p. 9-10. DOI : [10.1007/978-3-319-54413-7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-54413-7).

- [114] J. IGNASOV, A. KAPILAVAI, K. FILONENKO et al. « Bio-Inspired Design and Movement Generation of Dung Beetle-like Legs ». In : *Artificial Life and Robotics* 23.4 (déc. 2018), p. 555-563. ISSN : 1433-5298, 1614-7456. DOI : [10.1007/s10015-018-0475-5](https://doi.org/10.1007/s10015-018-0475-5).
- [115] Marko BJELONIC, Timon HOMBERGER, Navinda KOTTEGE et al. « Autonomous Navigation of Hexapod Robots with Vision-Based Controller Adaptation ». In : *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Singapore, Singapore : IEEE, mai 2017, p. 5561-5568. DOI : [10.1109/ICRA.2017.7989655](https://doi.org/10.1109/ICRA.2017.7989655).
- [116] H CRUSE et Ch BARTLING. « Movement of Joint Angles in the Legs of a Walking Insect, *Carausius* ». In : *Journal of Insect Physiology* 41.9 (1995), p. 761-771. DOI : [10.1016/0022-1910\(95\)00032-P](https://doi.org/10.1016/0022-1910(95)00032-P).
- [117] Satoshi KITANO, Shigeo HIROSE, Atsushi HORIGOME et al. « TITAN-XIII : Sprawling-Type Quadruped Robot with Ability of Fast and Energy-Efficient Walking ». In : *ROBOMECH Journal* 3.1 (déc. 2016), p. 8. ISSN : 2197-4225. DOI : [10.1186/s40648-016-0047-1](https://doi.org/10.1186/s40648-016-0047-1).
- [118] Marko BJELONIC, Navinda KOTTEGE, Timon HOMBERGER et al. « Weaver : Hexapod Robot for Autonomous Navigation on Unstructured Terrain ». In : *Journal of Field Robotics* 35.7 (oct. 2018), p. 1063-1079. ISSN : 15564959. DOI : [10.1002/rob.21795](https://doi.org/10.1002/rob.21795).
- [119] Jan BAYER et Jan FAIGL. « On Autonomous Spatial Exploration with Small Hexapod Walking Robot Using Tracking Camera Intel RealSense T265 ». In : *2019 European Conference on Mobile Robots (ECMR)*. 2019 European Conference on Mobile Robots (ECMR). Prague, Czech Republic : IEEE, sept. 2019, p. 1-6. DOI : [10.1109/ECMR.2019.8870968](https://doi.org/10.1109/ECMR.2019.8870968).
- [120] Russell BUCHANAN, Tirthankar BANDYOPADHYAY, Marko BJELONIC et al. « Walking Posture Adaptation for Legged Robot Navigation in Confined Spaces ». In : *IEEE Robotics and Automation Letters* 4.2 (avr. 2019), p. 2148-2155. ISSN : 2377-3766, 2377-3774. DOI : [10.1109/LRA.2019.2899664](https://doi.org/10.1109/LRA.2019.2899664).
- [121] Dominik BELTER et Piotr SKRZYPCZYNSKI. « Rough Terrain Mapping and Classification for Foothold Selection in a Walking Robot ». In : *2010 IEEE Safety Security and Rescue Robotics*. 2010, p. 1-6. DOI : [doi:10.1109/SSRR.2010.5981552](https://doi.org/10.1109/SSRR.2010.5981552).
- [122] Tao LIU, Weihai CHEN, Jianhua WANG et al. « Terrain Analysis and Locomotion Control of a Hexapod Robot on Uneven Terrain ». In : *2014 9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. 2014 IEEE 9th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Hangzhou, China : IEEE, juin 2014, p. 1959-1964. DOI : [10.1109/ICIEA.2014.6931489](https://doi.org/10.1109/ICIEA.2014.6931489).
- [123] Alexander DIETRICH. *Whole-Body Impedance Control of Wheeled Humanoid Robots*. T. 116. Springer Tracts in Advanced Robotics. Cham : Springer International Publishing, 2016. DOI : [10.1007/978-3-319-40557-5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-40557-5).

- [124] Xiaofeng XIONG, Florentin WÖRGÖTTER et Poramate MANOONPONG. « A Simplified Variable Admittance Controller Based on a Virtual Agonist-Antagonist Mechanism for Robot Joint Control ». In : *Nature-Inspired Mobile Robotics*. Sydney, Australia, 2013, p. 281-288.
- [125] Xiaofeng XIONG et Poramate MANOONPONG. « Adaptive Motor Control for Human-like Spatial-temporal Adaptation ». In : *2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. 2018, p. 2107-2112.
- [126] R. KUKILLAYA, J. PROCTOR et P. HOLMES. « Neuromechanical Models for Insect Locomotion : Stability, Maneuverability, and Proprioceptive Feedback ». In : *Chaos : An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science* 19.2 (juin 2009), p. 026107. ISSN : 1054-1500, 1089-7682. DOI : [10.1063/1.3141306](https://doi.org/10.1063/1.3141306).
- [127] Nicholas S. SZCZECINSKI, Clarissa A. GOLDSMITH, Fletcher R. YOUNG et al. « Tuning a Robot Servomotor to Exhibit Muscle-Like Dynamics ». In : *Biomimetic and Biohybrid Systems*. Sous la dir. d'Uriel MARTINEZ-HERNANDEZ, Vasiliki VOULOUTSI, Anna MURA et al. T. 11556. Cham : Springer International Publishing, 2019, p. 254-265. DOI : [10.1007/978-3-030-24741-6_22](https://doi.org/10.1007/978-3-030-24741-6_22).
- [128] Roland HAFNER, Tim HERTWECK, Philipp KLÖPPNER et al. « Towards General and Autonomous Learning of Core Skills : A Case Study in Locomotion ». In : *arXiv preprint arXiv :2008.12228* (2020).
- [129] Malte SCHILLING, Kai KONEN, Frank W. OHL et al. « Decentralized Deep Reinforcement Learning for a Distributed and Adaptive Locomotion Controller of a Hexapod Robot ». In : *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2020, p. 5335-5342. DOI : [10.1109/IROS45743.2020.9341754](https://doi.org/10.1109/IROS45743.2020.9341754).
- [130] Justin TING, Yan FANG, Ashwin LELE et al. « Bio-inspired gait imitation of hexapod robot using event-based vision sensor and spiking neural network ». In : *2020 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*. IEEE. 2020, p. 1-7.
- [131] Christiaan J PRETORIUS, Mathys C du PLESSIS et John W GONSALVES. « Evolutionary robotics applied to hexapod locomotion : A comparative study of simulation techniques ». In : *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 96.3 (2019), p. 363-385.
- [132] Gary B PARKER. « Evolving gaits for hexapod robots using cyclic genetic algorithms ». In : *International journal of general systems* 34.3 (2005), p. 301-315.
- [133] Antoine CULLY et J-B MOURET. « Evolving a behavioral repertoire for a walking robot ». In : *Evolutionary computation* 24.1 (2016), p. 59-88.
- [134] Qing CHANG et Fanghua MEI. « A Bioinspired Gait Transition Model for a Hexapod Robot ». In : *Journal of Robotics* 2018 (2018). ISSN : 16879619. DOI : [10.1155/2018/2913636](https://doi.org/10.1155/2018/2913636).
- [135] V. A. TUCKER. « The Energetic Cost of Moving About ». In : *American Scientist* 63.4 (1975), p. 413-419. JSTOR : [27845576](https://www.jstor.org/stable/27845576). URL : <http://www.jstor.org/stable/27845576>.

- [136] R. McN. ALEXANDER. « The Gaits of Bipedal and Quadrupedal Animals ». In : *The International Journal of Robotics Research* 3.2 (juin 1984), p. 49-59. ISSN : 0278-3649, 1741-3176. DOI : [10.1177/027836498400300205](https://doi.org/10.1177/027836498400300205).
- [137] Alexander SPRÖWITZ, Alexandre TULEU, Massimo VESPIGNANI et al. « Towards Dynamic Trot Gait Locomotion : Design, Control, and Experiments with Cheetah-cub, a Compliant Quadruped Robot ». In : *The International Journal of Robotics Research* 32.8 (juill. 2013), p. 932-950. ISSN : 0278-3649, 1741-3176. DOI : [10.1177/0278364913489205](https://doi.org/10.1177/0278364913489205).
- [138] Miomir VUKOBRATOVIĆ et Branislav BOROVIAC. « ZERO-MOMENT POINT — THIRTY FIVE YEARS OF ITS LIFE ». In : *International Journal of Humanoid Robotics* 01.01 (mars 2004), p. 157-173. ISSN : 0219-8436, 1793-6942. DOI : [10.1142/S0219843604000083](https://doi.org/10.1142/S0219843604000083).
- [139] P. SARDAIN et G. BESSONNET. « Forces Acting on a Biped Robot. Center of Pressure—Zero Moment Point ». In : *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A : Systems and Humans* 34.5 (sept. 2004), p. 630-637. ISSN : 1083-4427. DOI : [10.1109/TSMCA.2004.832811](https://doi.org/10.1109/TSMCA.2004.832811).
- [140] Pavan RAMDYA, Robin THANDIACKAL, Raphael CHERNEY et al. « Climbing Favours the Tripod Gait over Alternative Faster Insect Gaits ». In : *Nature Communications* 8.1 (17 fév. 2017), p. 14494. ISSN : 2041-1723. DOI : [10.1038/ncomms14494](https://doi.org/10.1038/ncomms14494).
- [141] R.B. MCGHEE et A.A. FRANK. « On the Stability Properties of Quadruped Creeping Gaits ». In : *Mathematical Biosciences* 3 (août 1968), p. 331-351. ISSN : 00255564. DOI : [10.1016/0025-5564\(68\)90090-4](https://doi.org/10.1016/0025-5564(68)90090-4).
- [142] D. MESSURI et C. KLEIN. « Automatic Body Regulation for Maintaining Stability of a Legged Vehicle during Rough-Terrain Locomotion ». In : *IEEE Journal on Robotics and Automation* 1.3 (1985), p. 132-141. ISSN : 0882-4967. DOI : [10.1109/JRA.1985.1087012](https://doi.org/10.1109/JRA.1985.1087012).
- [143] G. GABRIELLI et Th. Von KARMAN. « What price speed? Specific Power Required for Propulsion of Vehicles ». In : *Mech. Eng.* (1950), p. 775-781.
- [144] Simon IWNICKI, Maksym SPIRYAGIN, Colin COLE et al. « Handbook of Railway Vehicle Dynamics ». In : *Handbook of Railway Vehicle Dynamics (2nd ed.)* CRC Press, 2019. Chap. 4, p. 157-163. DOI : [10.1201/9780429469398-3](https://doi.org/10.1201/9780429469398-3).
- [145] Bo JIN, Cheng CHEN et Wei LI. « Power consumption optimization for a hexapod walking robot ». In : *Journal of Intelligent and Robotic Systems : Theory and Applications* 71 (2 août 2012), p. 195-209. ISSN : 09210296. DOI : [10.1007/s10846-012-9771-9](https://doi.org/10.1007/s10846-012-9771-9).
- [146] Vladimir LAPSHIN. « Energy consumption of a walking machine model estimations and optimization ». In : *IFAC Intelligent Autonomous Vehicles* (1995).
- [147] David ZARROUK et Ronald S. FEARING. « Cost of locomotion of a dynamic hexapedal robot ». In : *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2013), p. 2548-2553. ISSN : 10504729. DOI : [10.1109/ICRA.2013.6630925](https://doi.org/10.1109/ICRA.2013.6630925).

- [148] Thomas MOLNAR, Ryan STEINDL, Navinda KOTTEGE et al. « Steep Terrain Ascension Controller for Hexapod Robots ». In : Australasian Conference on Robotics and Automation. Brisbane, Australia, 8-10 déc. 2017, p. 1-7.
- [149] Jun NISHII. « An analytical estimation of the energy cost for legged locomotion ». In : *Journal of theoretical biology* 238.3 (2006), p. 636-645.
- [150] Navinda KOTTEGE, Callum PARKINSON, Peyman MOGHADAM et al. « Energetics-informed hexapod gait transitions across terrains ». In : *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE. 2015, p. 5140-5147.
- [151] Makoto KANEKO, Susumu TACHI, Karuo TANIE et al. « Basic Study on Similarity in Walking Machine from a Point of Energetic Efficiency ». In : *IEEE Journal of Robotics and Automation* RA-3 (1987).
- [152] R McNeill ALEXANDER. « Models and the scaling of energy costs for locomotion ». In : *Journal of Experimental Biology* 208.9 (2005), p. 1645-1652.
- [153] Sangok SEOK, Albert WANG, Meng Yee CHUAH et al. « Design principles for highly efficient quadrupeds and implementation on the MIT Cheetah robot ». In : *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE. 2013, p. 3307-3312.
- [154] Pranav A. BHOUNSULE, Jason CORTELL, Anoop GREWAL et al. « Low-Bandwidth Reflex-Based Control for Lower Power Walking : 65 Km on a Single Battery Charge ». In : *The International Journal of Robotics Research* 33.10 (sept. 2014), p. 1305-1321. ISSN : 0278-3649, 1741-3176. DOI : [10.1177/0278364914527485](https://doi.org/10.1177/0278364914527485).
- [155] Vance A. TUCKER. « Energetic Cost of Locomotion in Animals ». In : *Comparative Biochemistry and Physiology* 34.4 (juin 1970), p. 841-846. ISSN : 0010406X. DOI : [10.1016/0010-406X\(70\)91006-6](https://doi.org/10.1016/0010-406X(70)91006-6).
- [156] Donald F. HOYT et C. Richard TAYLOR. « Gait and the Energetics of Locomotion in Horses ». In : *Nature* 292.5820 (juill. 1981), p. 239-240. ISSN : 0028-0836, 1476-4687. DOI : [10.1038/292239a0](https://doi.org/10.1038/292239a0).
- [157] John R B LIGHTON et Frances D DUNCAN. « Energy Cost of Locomotion : Validation of Laboratory Data by in Situ Respirometry ». In : *Ecology* 83.12 (2002). JSTOR : [3072100](https://www.jstor.org/stable/3072100). URL : <https://www.jstor.org/stable/3072100>.
- [158] R.F. CHAPMAN. *The insects structure and function (5th ed.)* Cambridge University Press, 2013.
- [159] Santiago ARROYAVE-TOBON, Jordan DRAPIN, Anton KANIEWSKI et al. « Kinematic Modeling at the Ant Scale : Propagation of Model Parameter Uncertainties ». In : *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 10 (2022). ISSN : 2296-4185. DOI : [10.3389/fbioe.2022.767914](https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.767914). URL : <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbioe.2022.767914>.
- [160] Fred DELCOMYN, Mark E. NELSON et Jan H. COCATRE-ZILGIEN. « Sense Organs of Insect Legs and the Selection of Sensors for Agile Walking Robots ». In : *The International Journal of Robotics Research* 15.2 (avr. 1996), p. 113-127. ISSN : 0278-3649, 1741-3176. DOI : [10.1177/027836499601500201](https://doi.org/10.1177/027836499601500201).

- [161] Christofer J. CLEMENTE, Hanns Hagen GOETZKE, James M.R. BULLOCK et al. « Jumping without slipping : Leafhoppers (Hemiptera : Cicadellidae) possess special tarsal structures for jumping from smooth surfaces ». In : *Journal of the Royal Society Interface* 14.130 (2017). ISSN : 17425662. DOI : [10.1098/rsif.2017.0022](https://doi.org/10.1098/rsif.2017.0022).
- [162] Jie CHEN, Zhongchao LIANG, Yanhe ZHU et al. « Improving Kinematic Flexibility and Walking Performance of a Six-legged Robot by Rationally Designing Leg Morphology ». In : *Journal of Bionic Engineering* 16.4 (2019), p. 608-620. ISSN : 25432141. DOI : [10.1007/s42235-019-0049-9](https://doi.org/10.1007/s42235-019-0049-9).
- [163] Rüdiger WEHNER. *Taxonomie, Funktionsmorphologie und Zoogeographie der saharischen Wüstenameise Cataglyphis fortis (Forel 1902) stat. nov.* T. 64. 1983, p. 89-132.
- [164] L.R. DIXEY et P.C. GARDINER. « LXIII.—Heterogony in *Messor barbarus* L. var. *capitatus* Latreille ». In : *Journal of Natural History* 13.78 (1934), p. 619-627.
- [165] G. Di CANIO, S. STOYANOV, J. C. LARSEN et al. « A robot leg with compliant tarsus and its neural control for efficient and adaptive locomotion on complex terrains ». In : *Artificial Life and Robotics* 21.3 (2016), p. 274-281. ISSN : 16147456. DOI : [10.1007/s10015-016-0296-3](https://doi.org/10.1007/s10015-016-0296-3).
- [166] P Thanh TRAN-NGOC, Jia Hui GAN, T Thang VO-DOAN et al. « A Robotics Leg Inspired from an Insect Leg ». In : *IOP Publishing* 17 (9 août 2022), p. 056008. DOI : [10.1088/1748-3190/ac78b5](https://doi.org/10.1088/1748-3190/ac78b5).
- [167] Zi-Qiang ZHANG, Qi YANG, Jing ZHAO et al. « Dynamic Model and Performance Analysis of Rigid-Flexible Coupling Four-Bar Leg Mechanism for Small Scale Bio-Inspired Jumping Robot ». In : *Microsystem Technologies* 25.9 (sept. 2019), p. 3269-3285. ISSN : 0946-7076, 1432-1858. DOI : [10.1007/s00542-019-04546-5](https://doi.org/10.1007/s00542-019-04546-5).
- [168] Weiting LIU, Fei LI, Xin FU et al. « Jumping Like an Insect : From Biomimetic Inspiration to a Jumping Minirobot Design ». In : *Advanced Mechatronics and MEMS Devices*. Sous la dir. de Dan ZHANG. T. 23. Microsystems. New York, NY : Springer New York, 2013, p. 207-221. DOI : [10.1007/978-1-4419-9985-6_11](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9985-6_11).
- [169] Uluc SARANLI, Martin BUEHLER et Daniel E. KODITSCHKE. « RHex : A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot ». In : *The International Journal of Robotics Research* 20.7 (juill. 2001), p. 616-631. ISSN : 0278-3649, 1741-3176. DOI : [10.1177/02783640122067570](https://doi.org/10.1177/02783640122067570).
- [170] Benedikt SEITZ. « Design of Climbing Mechanisms for Harvard Ambulatory MicroRobot, HAMR-VP ». In : (2014). DOI : [10.3929/ETHZ-A-010419248](https://doi.org/10.3929/ETHZ-A-010419248).
- [171] Daniel E. SOLTERO, Brian J. JULIAN, Cagdas D. ONAL et al. « A lightweight modular 12-DOF print-and-fold hexapod ». In : (2013), p. 1465-1471. DOI : [10.1109/IR0S.2013.6696542](https://doi.org/10.1109/IR0S.2013.6696542).

- [172] Jiefeng SUN et Jianguo ZHAO. « An Adaptive Walking Robot With Reconfigurable Mechanisms Using Shape Morphing Joints ». In : *IEEE Robotics and Automation Letters* 4.2 (avr. 2019), p. 724-731. ISSN : 2377-3766, 2377-3774. DOI : [10.1109/LRA.2019.2893439](https://doi.org/10.1109/LRA.2019.2893439).
- [173] Larry L. HOWELL. *Handbook of Compliant Mechanisms*. John Wiley & Sons, Ltd, 2013. DOI : <https://doi.org/10.1002/9781118516485.ch1>. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781118516485.ch1>.
- [174] Anthony DeMARIO et Jianguo ZHAO. « Development and Analysis of a Three-Dimensional Printed Miniature Walking Robot With Soft Joints and Links ». In : *Journal of Mechanisms and Robotics* 10.4 (1^{er} août 2018), p. 041005. ISSN : 1942-4302, 1942-4310. DOI : [10.1115/1.4039773](https://doi.org/10.1115/1.4039773).
- [175] R. KRAM, B. WONG et R. J. FULL. « Three-Dimensional Kinematics and Limb Kinetic Energy of Running Cockroaches ». In : *Journal of Experimental Biology* 200.13 (1^{er} juill. 1997), p. 1919-1929. ISSN : 0022-0949, 1477-9145. DOI : [10.1242/jeb.200.13.1919](https://doi.org/10.1242/jeb.200.13.1919).
- [176] Javier G. FERNANDEZ et Donald E. INGBER. « Unexpected Strength and Toughness in Chitosan-Fibroin Laminates Inspired by Insect Cuticle ». In : *Advanced Materials* 24.4 (24 jan. 2012), p. 480-484. ISSN : 09359648. DOI : [10.1002/adma.201104051](https://doi.org/10.1002/adma.201104051).
- [177] Javier G. FERNANDEZ et Donald E. INGBER. « Manufacturing of Large-Scale Functional Objects Using Biodegradable Chitosan Bioplastic : Manufacturing of Large-Scale Chitosan Objects ». In : *Macromolecular Materials and Engineering* 299.8 (août 2014), p. 932-938. ISSN : 14387492. DOI : [10.1002/mame.201300426](https://doi.org/10.1002/mame.201300426).
- [178] Mingyuan YANG, Rongjie KANG et Yan CHEN. « A Highly Mobile Crawling Robot Inspired by Hexapod Insects ». In : *2019 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. 2019 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Dali, China : IEEE, déc. 2019, p. 1797-1802. DOI : [10.1109/ROBIO49542.2019.8961825](https://doi.org/10.1109/ROBIO49542.2019.8961825).
- [179] Victor Lobato RIOS, Shravan Tata RAMALINGASETTY, Jonathan ARREGUIT et al. « NeuroMechFly, a Neuromechanical Model of Adult Drosophila Melanogaster ». In : *Nature Methods* 19 (1^{er} mai 2022), p. 620-627. DOI : [10.1038/s41592-022-01466-7](https://doi.org/10.1038/s41592-022-01466-7).
- [180] Kenzo NONAMI, Ranjit Kumar BARAI, Addie IRAWAN et al. *Hydraulically Actuated Hexapod Robots : Design, Implementation and Control*. T. 66. Intelligent Systems, Control and Automation : Science and Engineering. Tokyo : Springer Japan, 2014. DOI : [10.1007/978-4-431-54349-7](https://doi.org/10.1007/978-4-431-54349-7).
- [181] Robert C. JUVINALL et Kurt M. MARSHEK. *Fundamentals of Machine Component Design, 5th Edition*. Wiley, 2011. DOI : [10.1007/978-4-431-54349-7](https://doi.org/10.1007/978-4-431-54349-7).

- [182] J. CLARK, D. GOLDMAN, P. LIN et al. « Design of a Bio-inspired Dynamical Vertical Climbing Robot ». In : *Robotics : Science and Systems III*. Robotics : Science and Systems 2007. Robotics : Science and Systems Foundation, 27 juin 2007. DOI : [10.15607/RSS.2007.III.002](https://doi.org/10.15607/RSS.2007.III.002).
- [183] Kaushik JAYARAM, Jennifer SHUM, Samantha CASTELLANOS et al. *Scaling down an Insect-Size Microrobot, HAMR-VI into HAMR-Jr*. 6 mars 2020. arXiv : [arXiv:2003.03337](https://arxiv.org/abs/2003.03337). URL : <http://arxiv.org/abs/2003.03337>. preprint.
- [184] Ilya BRODOLINE, Stéphane VIOLLET et Julien R. SERRES. « Novel Test Bench for Robotic Leg Characterization ». In : *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. ABSTRACTS 46th Congress of the Society of Biomechanics 24 (sup1 10 nov. 2021), S267-S268. ISSN : 1025-5842, 1476-8259. DOI : [10.1080/10255842.2021.1978758](https://doi.org/10.1080/10255842.2021.1978758).
- [185] *Maxon Group Motor Catalogue*. <https://www.maxongroup.fr/>. Accessed : 26-03-2023.
- [186] Sebastian STOPP, Thomas WOLFF, Franz IRLINGER et al. « A New Method for Printer Calibration and Contour Accuracy Manufacturing with 3D-print Technology ». In : *Rapid Prototyping Journal* 14.3 (30 mai 2008), p. 167-172. ISSN : 1355-2546. DOI : [10.1108/13552540810878030](https://doi.org/10.1108/13552540810878030).
- [187] Zhiguang ZHU, Tsz KIN TAM, Fangfang SUN et al. « A High-Energy-Density Sugar Biobattery Based on a Synthetic Enzymatic Pathway ». In : *Nature Communications* 5.1 (21 jan. 2014), p. 3026. ISSN : 2041-1723. DOI : [10.1038/ncomms4026](https://doi.org/10.1038/ncomms4026).
- [188] Xiufeng YANG, Longlong CHANG et Néstor O. PÉREZ-ARANCIBIA. « An 88-Milligram Insect-Scale Autonomous Crawling Robot Driven by a Catalytic Artificial Muscle ». In : *Science Robotics* 5.45 (26 août 2020), eaba0015. ISSN : 2470-9476. DOI : [10.1126/scirobotics.aba0015](https://doi.org/10.1126/scirobotics.aba0015).
- [189] Cristina TAVOLIERI, Erika OTTAVIANO, Marco CECCARELLI et al. « Analysis and Design of a 1-DOF Leg for Walking Machines ». In : (2006).
- [190] Vinay R. KAMIDI. « Design and Integration of a Novel Robotic Leg Mechanism for Dynamic Locomotion at High-Speeds ». In : 2018.
- [191] Wael SAAB, William S. RONE et Pinhas BEN-TZVI. « Robotic Modular Leg : Design, Analysis, and Experimentation ». In : *Journal of Mechanisms and Robotics* 9 (2017), p. 024501.
- [192] Petr CIZEK, Martin ZOULA et Jan FAIGL. « Design, Construction, and Rough-Terrain Locomotion Control of Novel Hexapod Walking Robot With Four Degrees of Freedom Per Leg ». In : *IEEE Access* 9 (2021), p. 17866-17881. ISSN : 2169-3536. DOI : [10.1109/ACCESS.2021.3053492](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3053492).
- [193] Marek ŽÁK, Jaroslav ROZMAN et František V ZBOŘIL. « Design and Control of 7-DOF Omni-directional Hexapod Robot ». In : *Open Computer Science* 11.1 (2021), p. 80-89.

- [194] A. ROENNAU, T. KERSCHER et R. DILLMANN. « Design and Kinematics of a Biologically-Inspired Leg for a Six-Legged Walking Machine ». In : *2010 3rd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*. EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob 2010). Tokyo, Japan : IEEE, sept. 2010, p. 626-631. ISBN : 978-1-4244-7708-1. DOI : [10.1109/BIOROB.2010.5626328](https://doi.org/10.1109/BIOROB.2010.5626328).
- [195] J DRAPIN, S ARROYAVE-TOBON, J-M LINARES et al. « 3D kinematic of the leg joints at the ant scale ». In : *Biomechanics and Biomedical Engineering* (2021).
- [196] Sandra WOHLGEMUTH, Bernhard RONACHER et Rüdiger WEHNER. « Ant Odometry in the Third Dimension ». In : *Nature* 411.6839 (juin 2001), p. 795-798. ISSN : 0028-0836, 1476-4687. DOI : [10.1038/35081069](https://doi.org/10.1038/35081069).
- [197] Franco TEDESCHI et Giuseppe CARBONE. « Design of a Novel Leg-Wheel Hexapod Walking Robot ». In : *Robotics* 6.4 (14 déc. 2017), p. 40. ISSN : 2218-6581. DOI : [10.3390/robotics6040040](https://doi.org/10.3390/robotics6040040).
- [198] Marko BJELONIC, C. Dario BELLICOSO, Yvain de VIRAGH et al. « Keep Rollin'-Whole-Body Motion Control and Planning for Wheeled Quadrupedal Robots ». In : *IEEE Robotics and Automation Letters* 4.2 (2019), p. 2116-2123. DOI : [10.1109/LRA.2019.2899750](https://doi.org/10.1109/LRA.2019.2899750).
- [199] Brian H WILCOX, Todd LITWIN, Jeff BIESIADECKI et al. « ATHLETE : A cargo handling and manipulation robot for the moon ». In : *Journal of Field Robotics* 24.5 (2007), p. 421-434.
- [200] Bram VANDERBORGHT, Alin ALBU-SCHÄFFER, Antonio BICCHI et al. « Variable impedance actuators : A review ». In : *Robotics and autonomous systems* 61.12 (2013), p. 1601-1614.
- [201] Dong-Hee LEE. « Wide-Range Speed Control Scheme of BLDC Motor Based on the Hall Sensor Signal ». In : *Journal of Power Electronics* 18.3 (2018).
- [202] VERTIQ. *23-06 Module Thrust Data*, <https://www.vertiq.co/vert-23-06-2200kv-apc5x3e-18v>. <https://www.vertiq.co/vert-23-06-2200kv-apc5x3e-18v>. Accessed : 2023-04-26. 2022.
- [203] Ian W HUNTER et Serge LAFONTAINE. « A comparison of muscle with artificial actuators ». In : *Technical Digest IEEE solid-state sensor and actuator workshop*. IEEE. 1992, p. 178-185.
- [204] K. ARIKAWA et S. HIROSE. « Development of Quadruped Walking Robot TITAN-VIII ». In : *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IROS '96*. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IROS '96. T. 1. Osaka, Japan : IEEE, 1996, p. 208-214. DOI : [10.1109/IROS.1996.570670](https://doi.org/10.1109/IROS.1996.570670).
- [205] Wei LIANG, Hao LIU, Kunyang WANG et al. « Comparative study of robotic artificial actuators and biological muscle ». In : *Advances in Mechanical Engineering* 12.6 (2020), p. 1687814020933409.

- [206] Jaronie MOHD JANI, Martin LEARY, Aleksandar SUBIC et al. « A review of shape memory alloy research, applications and opportunities ». In : *Materials & Design (1980-2015)* 56 (2014), p. 1078-1113. ISSN : 0261-3069. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.084>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306913011345>.
- [207] Zishun LIU, William TOH et Teng Yong NG. « Advances in Mechanics of Soft Materials : A Review of Large Deformation Behavior of Hydrogels ». In : *International Journal of Applied Mechanics* 07.05 (oct. 2015), p. 1530001. ISSN : 1758-8251, 1758-826X. DOI : [10.1142/S1758825115300011](https://doi.org/10.1142/S1758825115300011).
- [208] Kaushik JAYARAM, Noah T JAFFERIS, Neel DOSHI et al. « Concomitant Sensing and Actuation for Piezoelectric Microrobots ». In : *Smart Materials and Structures* 27.6 (1^{er} juin 2018), p. 065028. ISSN : 0964-1726, 1361-665X. DOI : [10.1088/1361-665X/aabdf1](https://doi.org/10.1088/1361-665X/aabdf1).
- [209] Michael KARPELSON, Gu-Yeon WEI et Robert J. WOOD. « Driving High Voltage Piezoelectric Actuators in Microrobotic Applications ». In : *Sensors and Actuators A : Physical* 176 (avr. 2012), p. 78-89. ISSN : 09244247. DOI : [10.1016/j.sna.2011.11.035](https://doi.org/10.1016/j.sna.2011.11.035).
- [210] Andrew T. BAISCH, Onur OZCAN, Benjamin GOLDBERG et al. « High Speed Locomotion for a Quadrupedal Microrobot ». In : *The International Journal of Robotics Research* 33.8 (juill. 2014), p. 1063-1082. ISSN : 0278-3649, 1741-3176. DOI : [10.1177/0278364914521473](https://doi.org/10.1177/0278364914521473).
- [211] Philipp ROTHEMUND, Nicholas KELLARIS, Shane K MITCHELL et al. « HASEL Artificial Muscles for a New Generation of Lifelike Robots—Recent Progress and Future Opportunities ». In : *Advanced Materials* 33.19 (2021), p. 2003375.
- [212] A. ROENNAU, G. HEPPNER, L. PFOTZER et al. « LAURON V : OPTIMIZED LEG CONFIGURATION FOR THE DESIGN OF A BIO-INSPIRED WALKING ROBOT ». In : *Nature-Inspired Mobile Robotics*. Proceedings of the 16th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines. University of Technology Sydney, Australia : WORLD SCIENTIFIC, août 2013, p. 563-570. DOI : [10.1142/9789814525534_0071](https://doi.org/10.1142/9789814525534_0071).
- [213] Stéphane VIOLLET, Nicolas THELLIER, Nicolas THOUVENEL et al. « Design of a Bio-inspired Optical Compass for Education Purposes ». In : avr. 2022.
- [214] Julien DUPEYROUX, Stéphane VIOLLET et Julien R. SERRES. « Polarized skylight-based heading measurements : A bio-inspired approach ». In : *Journal of the Royal Society Interface* 16.150 (2019). ISSN : 17425662. DOI : [10.1098/rsif.2018.0878](https://doi.org/10.1098/rsif.2018.0878).
- [215] B Y Michael L BRINES. « Skylight Polarization patterns and Animal Orientation ». In : *Journal of Experimental Biology* 96.1 (1982), p. 69-91. ISSN : 0022-0949.
- [216] Thomas LABHART et Eric P MEYER. « Detectors for Polarized Skylight in Insects : A Survey of Ommatidial Specializations in the Dorsal Rim Area of the Compound Eye ». In : 379.June (1999), p. 368-379. DOI : [10.1002/\(SICI\)1097-0029\(19991215\)47:6<368::AID-JEMT2>3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0029(19991215)47:6<368::AID-JEMT2>3.0.CO;2-Q).

- [217] Ben J HARDCASTLE, Jaison J OMOTO, Pratyush KANDIMALLA et al. « A Visual Pathway for Skylight Polarization Processing in *Drosophila* ». In : *eLife* 10 (23 mars 2021), e63225. ISSN : 2050-084X. DOI : [10.7554/eLife.63225](https://doi.org/10.7554/eLife.63225).
- [218] Fernando AMOR, Patrocinio ORTEGA, Xim CERDÁ et al. « Solar Elevation Triggers Foraging Activity in a Thermophilic Ant : Solar Elevation Triggers Foraging Activity ». In : *Ethology* 117.11 (nov. 2011), p. 1031-1039. ISSN : 01791613. DOI : [10.1111/j.1439-0310.2011.01955.x](https://doi.org/10.1111/j.1439-0310.2011.01955.x).
- [219] Jochen ZEIL, Willi A. RIBI et Ajay NARENDRA. « Polarisation Vision in Ants, Bees and Wasps ». In : *Polarized Light and Polarization Vision in Animal Sciences*. Sous la dir. de Gábor HORVÁTH. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2014, p. 41-60. DOI : [10.1007/978-3-642-54718-8_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-54718-8_3).
- [220] Adam KHALIFE, Roberto A. KELLER, Johan BILLEN et al. « Skeletomuscular Adaptations of Head and Legs of *Melissotarsus* Ants for Tunnelling through Living Wood ». In : *Frontiers in Zoology* 15.1 (déc. 2018), p. 30. ISSN : 1742-9994. DOI : [10.1186/s12983-018-0277-6](https://doi.org/10.1186/s12983-018-0277-6).
- [221] Julien SERRES, Vincent FOURCASSIÉ, Ilya BRODOLINE et al. « Projet MiMiC-ANT - Étude de la locomotion lors du transport de charges chez la fourmi : application à la robotique hexapode ». In : *Colloque Ingénierie inspirée par la nature*. L'Institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes (INSIS) du CNRS. en visionconférence, France, juin 2021. URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-03285797>.
- [222] Sarah Elisabeth PFEFFER, Verena Luisa WAHL, Matthias WITTLINGER et al. « High-Speed Locomotion in the Saharan Silver Ant, *Cataglyphis bombycina* ». In : *Journal of Experimental Biology* 222.20 (15 oct. 2019), jeb198705. ISSN : 1477-9145, 0022-0949. DOI : [10.1242/jeb.198705](https://doi.org/10.1242/jeb.198705).
- [223] Chris J. DALLMANN, Volker DÜRR et Josef SCHMITZ. « Joint Torques in a Freely Walking Insect Reveal Distinct Functions of Leg Joints in Propulsion and Posture Control ». In : *Proceedings of the Royal Society B : Biological Sciences* 283.1823 (27 jan. 2016), p. 20151708. ISSN : 0962-8452, 1471-2954. DOI : [10.1098/rspb.2015.1708](https://doi.org/10.1098/rspb.2015.1708).
- [224] RS PRO. *Fournisseur de pompes hydrauliques*. <https://fr.rs-online.com/web/c/pneumatiques-et-hydrauliques/unites-de-puissance-pompes-et-verins-hydrauliques/pompes-hydrauliques-a-engrenages/>. Accessed : 02-05-2023.
- [225] Chanun SUWANPREECHA et Anchalee MANONUKUL. « A Review on Material Extrusion Additive Manufacturing of Metal and How It Compares with Metal Injection Moulding ». In : *Metals* 12.3 (28 fév. 2022), p. 429. ISSN : 2075-4701. DOI : [10.3390/met12030429](https://doi.org/10.3390/met12030429).
- [226] *RepRap Wiki*. <https://reprap.org/wiki/RepRap/fr>. Accessed : 29-03-2023.

- [227] Shunichi KURUMAYA, Koichi SUZUMORI, Hiroyuki NABAE et al. « Musculoskeletal Lower-Limb Robot Driven by Multifilament Muscles ». In : *ROBOMECH Journal* 3.1 (déc. 2016), p. 18. ISSN : 2197-4225. DOI : [10.1186/s40648-016-0061-3](https://doi.org/10.1186/s40648-016-0061-3).
- [228] Martin MÜLLER et Rüdiger WEHNER. « Path Integration in Desert Ants, *Cataglyphis Fortis* ». In : *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 85.14 (1988), p. 5287-5290. JSTOR : [32406](https://www.jstor.org/stable/32406). URL : <http://www.jstor.org/stable/32406>.
- [229] Peter BROWN et Tuan NGUYEN PHÚ. « The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation ». In : *Current Biology* 7.3 (mars 1997), R126. ISSN : 09609822. DOI : [10.1016/S0960-9822\(97\)70976-X](https://doi.org/10.1016/S0960-9822(97)70976-X).
- [230] Jasmine A NIRODY. « Universal Features in Panarthropod Inter-Limb Coordination during Forward Walking ». In : *Integrative and Comparative Biology* 61.2 (8 sept. 2021), p. 710-722. ISSN : 1540-7063, 1557-7023. DOI : [10.1093/icb/icab097](https://doi.org/10.1093/icb/icab097).
- [231] Leslie M. THEUNISSEN et Volker DÜRR. « Insects Use Two Distinct Classes of Steps during Unrestrained Locomotion ». In : *PLoS ONE* 8.12 (23 déc. 2013). Sous la dir. d'Holger G KRAPP, e85321. ISSN : 1932-6203. DOI : [10.1371/journal.pone.0085321](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0085321).
- [232] Morton WHEELER. *Ants. Their Structure, Development and Behavior*. Columbia University Press, 1910. DOI : [10.5962/bhl.title.1937](https://doi.org/10.5962/bhl.title.1937). URL : <https://www.biodiversitylibrary.org/bibliography/1937>.
- [233] B. BLÄSING et H. CRUSE. « Mechanisms of Stick Insect Locomotion in a Gap-Crossing Paradigm ». In : *Journal of Comparative Physiology A : Sensory, Neural, and Behavioral Physiology* 190.3 (1^{er} mars 2004), p. 173-183. ISSN : 0340-7594, 1432-1351. DOI : [10.1007/s00359-003-0482-3](https://doi.org/10.1007/s00359-003-0482-3).
- [234] Toni WÖHRL, Lars REINHARDT et Reinhard BLICKHAN. « Propulsion in Hexapod Locomotion : How Do Desert Ants Traverse Slopes? » In : *Journal of Experimental Biology* (1^{er} jan. 2017), jeb.137505. ISSN : 1477-9145, 0022-0949. DOI : [10.1242/jeb.137505](https://doi.org/10.1242/jeb.137505).
- [235] Larry L. HOWELL. *Compliant Mechanisms*. John Wiley & Sons, Ltd, 2001. URL : <https://www.wiley.com/en-us/Compliant+Mechanisms-p-9780471384786>.
- [236] Ilya BRODOLINE, Emilie SAUVAGEOT, Stéphane VIOLLET et al. « Shaping the energy curves of a servomotor-based hexapod robot ». In : *Submitted* 24 (2023), S267-S268.
- [237] Raghavendra GADAGKAR. « How to Design Experiments in Animal Behaviour 5. How Do Ants Estimate the Distance Walked? » In : *Resonance* 24 (août 2019), p. 875-889. DOI : [10.1007/s12045-019-0850-0](https://doi.org/10.1007/s12045-019-0850-0).
- [238] Robert C. JUVINALL et Kurt M. MARSHEK. *Fundamentals of Machine Component Design*. Wiley, 2011.

- [239] Delta Rubber LIMITED. *Documentation technique des caoutchoucs*. <https://shop.deltarubber.co.uk/rubber-technical-properties.pdf>. Accessed : 05-05-2023.
- [240] Jae Young RHO, Richard B. ASHMAN et Charles H. TURNER. « Young's modulus of trabecular and cortical bone material : Ultrasonic and microtensile measurements ». In : *Journal of Biomechanics* 26.2 (1993), p. 111-119. ISSN : 0021-9290. DOI : [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(93\)90042-D](https://doi.org/10.1016/0021-9290(93)90042-D).
- [241] Julian F.V VINCENT et Ulrike G.K WEGST. « Design and Mechanical Properties of Insect Cuticle ». In : *Arthropod Structure & Development* 33.3 (juill. 2004), p. 187-199. ISSN : 14678039. DOI : [10.1016/j.asd.2004.05.006](https://doi.org/10.1016/j.asd.2004.05.006).
- [242] Hongjie LI, Chang-Yu SUN, Yihang FANG et al. « Biomineral Armor in Leaf-Cutter Ants ». In : *Nature Communications* 11.1 (24 nov. 2020), p. 5792. ISSN : 2041-1723. DOI : [10.1038/s41467-020-19566-3](https://doi.org/10.1038/s41467-020-19566-3).
- [243] Chua Chee KAI, Leong Kah FAI et Lim CHU-SING. *Rapid Prototyping : Principles and Applications in Manufacturing*. 2^e éd. USA : World Scientific Publishing Co., Inc., 2003.
- [244] John Ryan C. DIZON, Alejandro H. ESPERA, Qiyi CHEN et al. « Mechanical Characterization of 3D-printed Polymers ». In : *Additive Manufacturing* 20 (mars 2018), p. 44-67. ISSN : 22148604. DOI : [10.1016/j.addma.2017.12.002](https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002).
- [245] ULTIMAKER. *Documentation technique de l'imprimante Ultimaker S5*. <https://ultimaker.com/printers/ultimaker-s5/>. Accessed : 05-05-2023.
- [246] VOLUMIC. *Documentation technique de l'imprimante STREAM 30 Ultra*. <https://imprimante-3d-volumic.com/imprimante-3d-volumic-3d-la-gamme-detail-2/>. Accessed : 05-05-2023.
- [247] Manav DOSHI, Ameya MAHALE, Suraj KUMAR SINGH et al. « Printing Parameters and Materials Affecting Mechanical Properties of FDM-3D Printed Parts : Perspective and Prospects ». In : *Materials Today : Proceedings* 50 (2022), p. 2269-2275. ISSN : 22147853. DOI : [10.1016/j.matpr.2021.10.003](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.003).
- [248] Douglas A. J. BRION et Sebastian W. PATTINSON. « Generalisable 3D Printing Error Detection and Correction via Multi-Head Neural Networks ». In : *Nature Communications* 13.1 (15 août 2022), p. 4654. ISSN : 2041-1723. DOI : [10.1038/s41467-022-31985-y](https://doi.org/10.1038/s41467-022-31985-y).
- [249] Charles W. HULL. « Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography ». 4575330. Août 1984. URL : <https://patents.justia.com/patent/4575330%7D>.
- [250] FORMLAB. *Documentation technique de l'imprimante Form 2*. <https://formlabs.com/fr/3d-printers/form-2/>. Accessed : 05-05-2023.
- [251] Deckard Carl R. « Method and apparatus for producing parts by selective sintering ». US4863538 (A). Sept. 1989. URL : https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=US&NR=4863538&KC=&locale=fr_EP&FT=E%7D.

- [252] MATERIALIZE. *Fabrication de pièces 3D par frittage laser*. <https://www.materialise.com/en/industrial/3d-printing-technologies/selective-laser-sintering>. Accessed : 06-05-2023.
- [253] MAKERSHOP. *Revendeur de matière PLA pour l'impression 3D*. <https://www.makershop.fr/pla-ultimaker/1109-pla-ultimaker-noir.html>. Accessed : 06-05-2023.
- [254] MAKERSHOP. *Revendeur de matière résine pour l'impression 3D*. <https://www.makershop.fr/cartouches-resine-form-2/633-cartouche-formlabs-resine-noire-1l.html>. Accessed : 06-05-2023.
- [255] MAKERSHOP. *Revendeur de poudre pour frittage selectif pour l'impression 3D*. <https://www.makershop.fr/formlabs/4639-poudre-nylon-11-formlabs.html>. Accessed : 06-05-2023.
- [256] Geethanjali GADAMCHETTY, Abhijeet PANDEY et Majnoo GAWTURE. « On Practical Implementation of the Ramberg-Osgood Model for FE Simulation ». In : *SAE International Journal of Materials and Manufacturing* 9.1 (5 jan. 2016), p. 200-205. ISSN : 1946-3987. DOI : [10.4271/2015-01-9086](https://doi.org/10.4271/2015-01-9086).
- [257] Engineers EDGE. *Stress-Strain curve generator*. https://www.engineersedge.com/calculators/stressstrain_curve_15438.htm. Accessed : 06-05-2023.
- [258] E. HERBERT, H. OUERDANE, Ph. LECOEUR et al. « Thermodynamics of Animal Locomotion ». In : *Physical Review Letters* 125.22 (23 nov. 2020), p. 228102. ISSN : 0031-9007, 1079-7114. DOI : [10.1103/PhysRevLett.125.228102](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.228102).
- [259] Stuart BURGESS. « A Review of Linkage Mechanisms in Animal Joints and Related Bioinspired Designs ». In : *Bioinspiration & Biomimetics* 16.4 (1^{er} juill. 2021), p. 041001. ISSN : 1748-3182, 1748-3190. DOI : [10.1088/1748-3190/abf744](https://doi.org/10.1088/1748-3190/abf744).
- [260] A SCHNEIDER et U SCHMUCKER. « Force Sensing for Multi-Legged Walking Robots : Theory and Experiments Part 1 : Overview and Force Sensing ». In : *Mobile Robotics, Moving Intelligence* (2006).
- [261] Peter BILLESCHOU, Carsten ALBERTSEN, Jorgen Christian LARSEN et al. « A Low-Cost, Compact, Sealed, Three-Axis Force/Torque Sensor for Walking Robots ». In : *IEEE Sensors Journal* 21.7 (1^{er} avr. 2021), p. 8916-8926. DOI : [10.1109/JSEN.2021.3049947](https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3049947).
- [262] He ZHANG, Rui WU, Changle LI et al. « A force-sensing system on legs for biomimetic hexapod robots interacting with unstructured terrain ». In : *Sensors (Switzerland)* 17.7 (2017). ISSN : 14248220. DOI : [10.3390/s17071514](https://doi.org/10.3390/s17071514).
- [263] Dzmitry TSETSERUKOU, Naoki KAWAKAMI et Susumu TACHI. « iSoRA : Humanoid Robot Arm for Intelligent Haptic Interaction with the Environment ». In : *Advanced Robotics* 23 (jan. 2009), p. 1327-1358. DOI : [10.1163/156855309X462619](https://doi.org/10.1163/156855309X462619).

- [264] Rafael P. BACHEGA, Ricardo PIRES et Alexandre B. CAMPO. « Force sensing to control a bio-inspired walking robot ». In : *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)* 46.7 (2013), p. 105-109. ISSN : 14746670. DOI : [10.3182/20130522-3-BR-4036.00052](https://doi.org/10.3182/20130522-3-BR-4036.00052). URL : <http://dx.doi.org/10.3182/20130522-3-BR-4036.00052>.
- [265] Sasha ZILL, Josef SCHMITZ et Ansgar BÜSCHGES. « Load Sensing and Control of Posture and Locomotion ». In : *Arthropod Structure & Development* 33.3 (juill. 2004), p. 273-286. ISSN : 14678039. DOI : [10.1016/j.asd.2004.05.005](https://doi.org/10.1016/j.asd.2004.05.005).
- [266] Chris J. DALLMANN, Thierry HOINVILLE, Volker DÜRR et al. « A load-based mechanism for inter-leg coordination in insects ». In : *Proceedings of the Royal Society B : Biological Sciences* 284.1868 (2017). ISSN : 14712954. DOI : [10.1098/rspb.2017.1755](https://doi.org/10.1098/rspb.2017.1755).
- [267] Sathya KALIYAMOORTHY, Roger D. QUINN et Sasha N. ZILL. « Force sensors in hexapod locomotion ». In : *International Journal of Robotics Research* 24.7 (2005), p. 563-574. ISSN : 02783649. DOI : [10.1177/0278364905055381](https://doi.org/10.1177/0278364905055381).
- [268] William P. ZYHOWSKI, Sasha N. ZILL et Nicholas S. SZCZECINSKI. « Adaptive Load Feedback Robustly Signals Force Dynamics in Robotic Model of Carausius Morosus Stepping ». In : *Frontiers in Neurorobotics* 17 (26 jan. 2023), p. 1125171. ISSN : 1662-5218. DOI : [10.3389/fnbot.2023.1125171](https://doi.org/10.3389/fnbot.2023.1125171).
- [269] Norman S. NISE. *Control Systems Engineering, 7th Edition*. T. 116. Wiley, 2014.
- [270] Andrew A. BIEWENER et Monica A. DALEY. « Unsteady Locomotion : Integrating Muscle Function with Whole Body Dynamics and Neuromuscular Control ». In : *Journal of Experimental Biology* 210.17 (1^{er} sept. 2007), p. 2949-2960. ISSN : 1477-9145, 0022-0949. DOI : [10.1242/jeb.005801](https://doi.org/10.1242/jeb.005801).
- [271] Emre SARIYILDIZ, Haoyong YU et Kouhei OHNISHI. « A Practical Tuning Method for the Robust PID Controller with Velocity Feed-Back ». In : *Machines* 3.3 (20 août 2015), p. 208-222. ISSN : 2075-1702. DOI : [10.3390/machines3030208](https://doi.org/10.3390/machines3030208).
- [272] X. MOREAU, A. OUSTALOUP et M. NOUILLANT. « The Crone Suspension : Concept and Technological Solutions ». In : *IFAC Proceedings Volumes* 31.18 (juill. 1998), p. 521-526. ISSN : 14746670. DOI : [10.1016/S1474-6670\(17\)42044-1](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)42044-1).
- [273] A. OUSTALOUP, P. MELCHIOR, P. LANUSSE et al. « The CRONE Toolbox for Matlab ». In : *CACSD. Conference Proceedings. IEEE International Symposium on Computer-Aided Control System Design (Cat. No.00TH8537)*. CACSD. Conference Proceedings. IEEE International Symposium on Computer-Aided Control Systems Design. Anchorage, AK, USA : IEEE, 2000, p. 190-195. DOI : [10.1109/CACSD.2000.900210](https://doi.org/10.1109/CACSD.2000.900210).
- [274] Sophocles J. ORFANIDIS. *Introduction to signal processing*. 1995.
- [275] Sky MCKINLEY et Megan LEVINE. « Cubic spline interpolation ». In : *College of the Redwoods* 45.1 (1998), p. 1049-1060.
- [276] *Définition d'un de la performance, dictionnaire de l'Académie française, 9e édition*. <https://www.dictionnaire-academie.fr/article/A9P1529>. Accessed : 2023-05-12.

- [277] Pierre-Yves ROQUEFERE. *Coach 3.0 - Le spécialiste performance*. Amphora, 2017. DOI : [10.1201/9780429469398-3](https://doi.org/10.1201/9780429469398-3).
- [278] Dimitrios LAMBRINOS, Hiroshi KOBAYASHI, Rolf PFEIFER et al. « An Autonomous Agent Navigating with a Polarized Light Compass ». In : *Adaptive Behavior* 6.1 (juin 1997), p. 131-161. ISSN : 1059-7123, 1741-2633. DOI : [10.1177/105971239700600104](https://doi.org/10.1177/105971239700600104).
- [279] Jun HE et Feng GAO. « Mechanism, Actuation, Perception, and Control of Highly Dynamic Multilegged Robots : A Review ». In : *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)* 33 (1 déc. 2020). ISSN : 21928258. DOI : [10.1186/s10033-020-00485-9](https://doi.org/10.1186/s10033-020-00485-9).
- [280] Maureen ROJAS, Novel CERTAD, Jose CAPPELLETTO et al. « Foothold Planning and Gait Generation for a Hexapod Robot Traversing Terrains with Forbidden Zones ». In : *2015 12th Latin American Robotics Symposium and 2015 3rd Brazilian Symposium on Robotics (LARS-SBR)*. 2015 12th Latin American Robotics Symposium (LARS) and 2015 3rd Brazilian Symposium on Robotics (SBR). Uberlandia : IEEE, oct. 2015, p. 49-54. DOI : [10.1109/LARS-SBR.2015.70](https://doi.org/10.1109/LARS-SBR.2015.70).
- [281] Bernard FRIEDLAND. *Control Systems Design, An introduction to State-Space Methods*. DOVER PUBLICATIONS, 2005.
- [282] Haichuang XIA, Xiaoping ZHANG et Hong ZHANG. « A new foot trajectory planning method for legged robots and its application in hexapod robots ». In : *Applied Sciences (Switzerland)* 11 (19 oct. 2021). ISSN : 20763417. DOI : [10.3390/app11199217](https://doi.org/10.3390/app11199217).
- [283] Dariusz GRZELCZYK, Bartosz STANCZYK et Jan AWREJCWICZ. « Kinematics, Dynamics and Power Consumption Analysis of the Hexapod Robot during Walking with Tripod Gait ». In : *International Journal of Structural Stability and Dynamics* 17 (5 juin 2017). ISSN : 17936764. DOI : [10.1142/S0219455417400107](https://doi.org/10.1142/S0219455417400107).
- [284] Mindaugas LUNECKAS, Tomas LUNECKAS, Jonas KRIAUCIŪNAS et al. « Hexapod robot gait switching for energy consumption and cost of transport management using heuristic algorithms ». In : *Applied Sciences (Switzerland)* 11 (3 2021), p. 1-13. ISSN : 20763417. DOI : [10.3390/app11031339](https://doi.org/10.3390/app11031339).
- [285] Unai SANANDRES, Gaizka ALMANDOZ, Javier POZA et al. « Design of Cooling Systems Using Computational Fluid Dynamics and Analytical Thermal Models ». In : *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 61.8 (août 2014), p. 4383-4391. ISSN : 0278-0046, 1557-9948. DOI : [10.1109/TIE.2013.2286081](https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2286081).
- [286] Sherief REDA, Kapil DEV et Adel BELOUCHRANI. « Blind Identification of Thermal Models and Power Sources From Thermal Measurements ». In : *IEEE Sensors Journal* 18.2 (15 jan. 2018), p. 680-691. DOI : [10.1109/JSEN.2017.2774704](https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2774704).
- [287] Mary B. ALATISE et Gerhard P. HANCKE. « A Review on Challenges of Autonomous Mobile Robot and Sensor Fusion Methods ». In : *IEEE Access* 8 (2020), p. 39830-39846. DOI : [10.1109/ACCESS.2020.2975643](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2975643).

- [288] Rebecca Elizabeth CARLISLE et Arthur D KUO. « Optimization of energy and time predicts dynamic speeds for human walking ». In : *eLife* 12 (2023). Sous la dir. de Gordon J BERMAN, e81939. ISSN : 2050-084X. DOI : [10.7554/eLife.81939](https://doi.org/10.7554/eLife.81939). URL : <https://doi.org/10.7554/eLife.81939>.
- [289] Leonardo A. PEYRÉ-TARTARUGA, Arthur H. DEWOLF, Pietro E. di PRAMPERO et al. « Mechanical work as a (key) determinant of energy cost in human locomotion : recent findings and future directions ». In : *Experimental Physiology* 106 (9 sept. 2021), p. 1897-1908. ISSN : 1469445X. DOI : [10.1113/EP089313](https://doi.org/10.1113/EP089313).
- [290] T. A. GUARDABRAZO et P. Gonzalez de SANTOS. « Building an energetic model to evaluate and optimize power consumption in walking robots ». In : *Industrial Robot* 31 (2 2004), p. 201-208. ISSN : 0143991X. DOI : [10.1108/01439910410522874](https://doi.org/10.1108/01439910410522874).
- [291] Ervin BURKUS, Szilard BESSENYEI, Akos ODRY et al. « Test Bench Built for the Identification of the Szabad(Ka)-II Hexapod Robot Leg Prototypes ». In : *2016 IEEE 14th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY)*. 2016 IEEE 14th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY). Subotica, Serbia : IEEE, août 2016, p. 13-18. DOI : [10.1109/SISY.2016.7601492](https://doi.org/10.1109/SISY.2016.7601492).
- [292] E GARCIA, J A GALVEZ et P Gonzalez De SANTOS. « On Finding the Relevant Dynamics for Model-Based Controlling Walking Robots ». In : *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 37 (2023), p. 375-398.
- [293] Benjamin GOLDBERG, Neel DOSHI, Kaushik JAYARAM et al. « A High Speed Motion Capture Method and Performance Metrics for Studying Gaits on an Insect-Scale Legged Robot ». In : *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Vancouver, BC : IEEE, sept. 2017, p. 3964-3970. DOI : [10.1109/IROS.2017.8206249](https://doi.org/10.1109/IROS.2017.8206249).
- [294] Kutluk B AR. « A Test Bench to Study Bioinspired Control for Robot Walking ». In : *CONTROL ENGINEERING AND APPLIED INFORMATICS* 13.2 (2011).
- [295] N. C. HEGLUND, G. A. CAVAGNA et C. R. TAYLOR. « Energetics and mechanics of terrestrial locomotion. III. Energy changes of the centre of mass as a function of speed and body size in birds and mammals ». In : *Journal of Experimental Biology* 97.1 (avr. 1982), p. 41-56. ISSN : 0022-0949. DOI : [10.1242/jeb.97.1.41](https://doi.org/10.1242/jeb.97.1.41). URL : <https://doi.org/10.1242/jeb.97.1.41>.
- [296] Hugo MERIENNE, Gérard LATIL, Pierre MORETTO et al. « Walking Kinematics in the Polymorphic Seed Harvester Ant *Messor Barbarus* : Influence of Body Size and Load Carriage ». In : *Journal of Experimental Biology* (1^{er} jan. 2019), jeb.205690. ISSN : 1477-9145, 0022-0949. DOI : [10.1242/jeb.205690](https://doi.org/10.1242/jeb.205690).
- [297] Ilya BRODOLINE, Pierre MORETTO, Stephane VIOLLET et al. « Test Benches for Comparing the Performance of an Ant's Leg with a Hexapod Robot's Leg ». In : *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine* 25.9 (déc. 2022), p. 36-41. ISSN : 1094-6969, 1941-0123. DOI : [10.1109/MIM.2022.9955461](https://doi.org/10.1109/MIM.2022.9955461).

- [298] Ilya BRODOLINE, Stéphane VIOLLET et Julien R. SERRES. « A Methodology to Estimate the Cost of Transport of a Hexapod Robot Based on Single Leg Performance ». In : *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* 25 (sup1 26 oct. 2022), S41-S42. ISSN : 1025-5842, 1476-8259. DOI : [10.1080/10255842.2022.2116885](https://doi.org/10.1080/10255842.2022.2116885).
- [299] *Systèmes de capture de mouvement Qualisys*. <https://www.qualisys.com/>. Accessed : 12-05-2023.
- [300] Kathleen M KNUTZEN, Lorraine R BRILLA et Dennis CAINE. « Validity of 1RM Prediction Equations for Older Adults ». In : *Journal of Strength and Conditioning Research* 13.3 (1999), p. 242-246.
- [301] E GARCIA, J A GALVEZ, P GONZALEZ et al. « On Finding the Relevant Dynamics for Model-Based Controlling Walking Robots ». In : *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 37 (2003), p. 375-398. DOI : [10.1023/A:1026104815610](https://doi.org/10.1023/A:1026104815610).
- [302] Verena WAHL, Sarah E. PFEFFER et Matthias WITTLINGER. « Walking and Running in the Desert Ant *Cataglyphis Fortis* ». In : *Journal of Comparative Physiology A* 201.6 (juin 2015), p. 645-656. ISSN : 0340-7594, 1432-1351. DOI : [10.1007/s00359-015-0999-2](https://doi.org/10.1007/s00359-015-0999-2).
- [303] Herman PONTZER. « A Unified Theory for the Energy Cost of Legged Locomotion ». In : *Biology Letters* 12.2 (fév. 2016), p. 20150935. ISSN : 1744-9561, 1744-957X. DOI : [10.1098/rsbl.2015.0935](https://doi.org/10.1098/rsbl.2015.0935).
- [304] Christophe GOUPIL et Eric HERBERT. « Adapted or adaptable : How to manage entropy production? » In : *Entropy* 22 (1 jan. 2020), p. 29. ISSN : 10994300. DOI : [10.3390/e22010029](https://doi.org/10.3390/e22010029).
- [305] Steven H. COLLINS, Peter G. ADAMCZYK, Daniel P. FERRIS et al. « A Simple Method for Calibrating Force Plates and Force Treadmills Using an Instrumented Pole ». In : *Gait & Posture* 29.1 (jan. 2009), p. 59-64. ISSN : 09666362. DOI : [10.1016/j.gaitpost.2008.06.010](https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2008.06.010).
- [306] Duane W. MARHEFKA et David E. ORIN. « Gait Planning for Energy Efficiency in Walking Machines ». In : *IEEE International Conference of Robotics and Automation* (1997), p. 474-480.
- [307] Tobias SEIDL et Rüdiger WEHNER. « Walking on inclines : How do desert ants monitor slope and step length ». In : *Frontiers in Zoology* 5 (2008), p. 1-15. ISSN : 17429994. DOI : [10.1186/1742-9994-5-8](https://doi.org/10.1186/1742-9994-5-8).
- [308] Damir T. JELASKA. *Gears and Gear Drives*. Wiley, 2012.
- [309] *Liste des coefficients de frottements*. https://maron.perso.univ-pau.fr/meca_old/ch3coef.htm. Accessed : 26-03-2023.

Index

A

allométrie, [43](#), [58](#)
apprentissage automatique, [34](#)
avantages des hexapodes, [24](#)

B

banc de test, [92–94](#)
bio-inspiration, [21](#)
bio-mimétisme, [21](#)
bio-robotique, [21](#)

C

cahier des charges, [53](#)
capteur de force, [72](#)
capteurs, [70](#)
cataglyphis fortis, [52](#), [53](#)
catégories d'hexapodes, [24](#)
central pattern generator, [30](#)
chitine, [63](#)
circuit locomoteur spinal, [30](#)
cognition, [30](#)
compliance, [30](#), [31](#), [71](#)
contrôle bio-inspiré, [33](#)
coordination inter-membre, [30](#)
coordination inter-membres, [33](#)
coordination intra-membre, [30](#), [31](#)
coordination intra-membres, [33](#)
corps, [42](#)
couple moteur, [74](#)
coût du transport, [38](#), [56](#), [106](#)
coût du transport minimal, [36](#)
CPG, [30](#)
cuticule, [63](#)

D

DDL, [44](#)
degrés de liberté, [44](#)
Denavit-Hartenberg, [82](#)

ductilité, [62](#)

dureté, [62](#)

déformations, [43](#)

dépôt de fil fondu, [63](#)

E

effet d'échelle, [43](#)
envergure du robot, [54](#)
essai de traction, [61](#)
exosquelette, [63](#)

F

facteur d'échelle, [56](#), [58](#)
force de réaction du support, [107](#)
force de traction, [36](#)
fragilité, [63](#)
frittage sélectif par laser, [65](#)
fréquence, [27](#)

G

ganglions thoraciques, [30](#)

I

impression 3D, [54](#), [63](#)
indicateur de performance, [34](#)
indice de performance, [89](#), [90](#)
ingénierie du contrôle, [33](#)

L

Lagrange-Euler, [108](#)
liaison irréversible, [68](#)
longueur des pas, [110](#)

M

marge de stabilité, [35](#)
Melissotarsus, [53](#)
module de Young, [62](#), [63](#), [65](#), [66](#)
modèle géométrique, [81](#)
modèle mécanique, [74](#)

moteur brushless, 47
 muscle artificiel, 48, 56
 mécanorécepteur, 71

N

nombre de Froude, 35

O

organe chordotonal, 71
 organes sensoriels, 31
 origamis, 40

P

paramètres de marche, 26
 patron de marche, 111
 patron tétrapode, 27
 pattes du robot, 39
 performance, 87
 phase d'appui, 26, 27
 phase de balancement, 27
 phase de propulsion, 26
 phase relative, 27
 phases de la marche, 28
 piézoélectrique, 48
 point de fonctionnement optimal, 38, 112
 posture, 39
 proprioception, 70
 précision, 100
 puissance, 98, 100
 puissance perdue, 106
 puissance spécifique d'actionnement, 47
 période, 27
 période d'échantillonnage, 73

R

raideur, 62
 Ramberg-Osgood, 67
 rapport cyclique, 27, 110
 rigidité, 62
 robots bio-inspirés, 26

robots hexapodes, 23
 robustesse physique, 90
 robustesse sensorielle, 90
 robustesse énergétique, 90
 roues dentées, 69
 rythme métachronal, 27
 règles de Cruse, 31
 règles de Wilson, 31
 résistance, 62
 résistance spécifique, 35
 résistance thermique, 68

S

schéma bloc, 77
 schéma cinématique, 74
 scénario de mesure, 96
 sensilles campaniformes, 31, 72
 servomoteurs, 46
 stéréolithographie, 64
 surchauffe, 68, 69
 swing phase, 26, 27

T

tarse, 40
 température de fléchissement, 68
 trajectoire, 83
 tripode alterné, 27

V

vitesse de marche, 27
 vitesse du moteur, 75

W

WalkNet, 31, 33
 wave gait, 27

Z

zig-zag, 39, 60, 61

élasticité, 62
 étapes de la conception, 56

ANNEXES

A. Influence du nombre de degrés de liberté

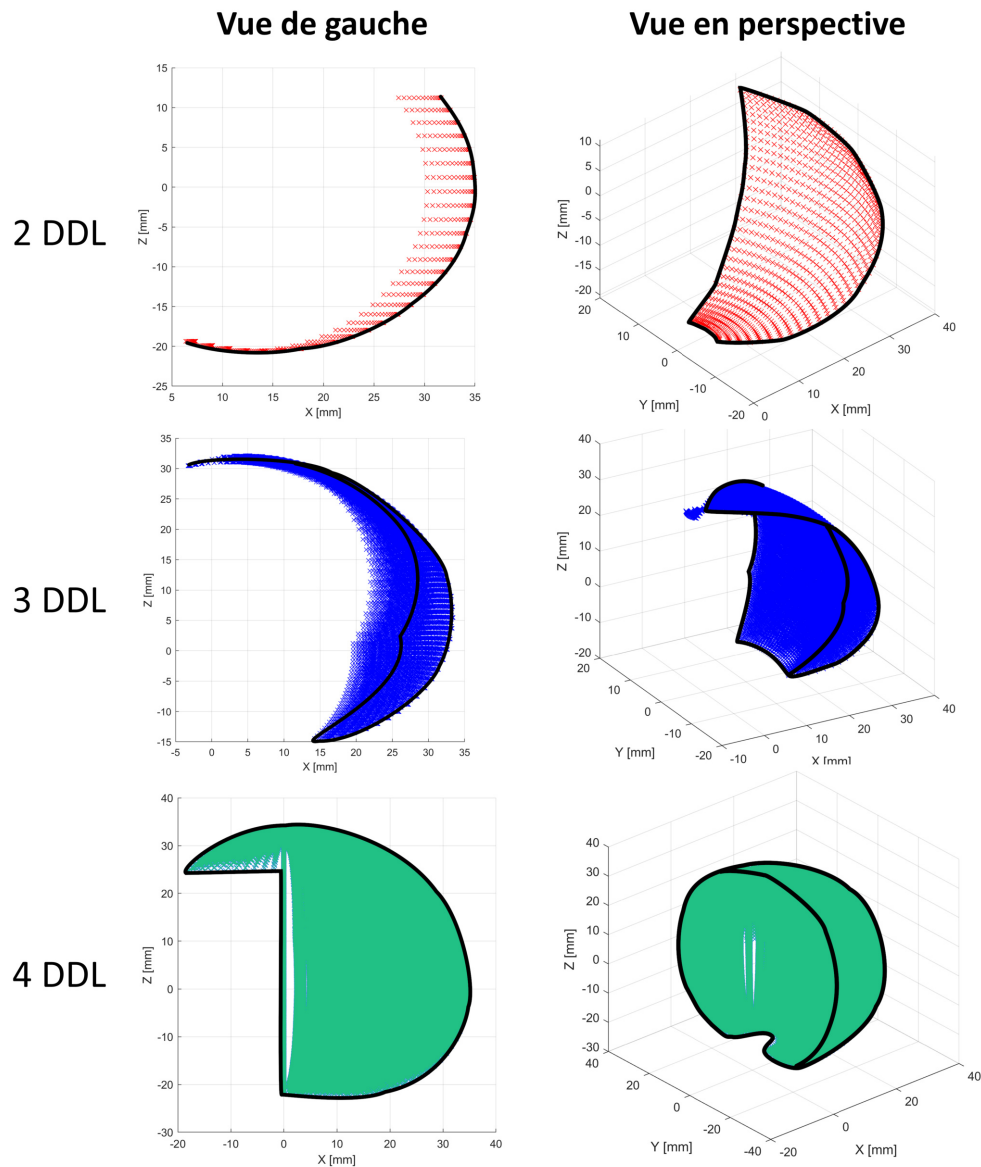


FIGURE 1. – Simulation de l'espace de travail d'une patte de robot en fonction du nombre de degrés de liberté (DDL). La longueur des segments de la patte est constante. L'augmentation du nombre de DDL, induit un espace de travail plus volumineux.

B. Vues de la patte bio-inspirée *Pohod15Leg*

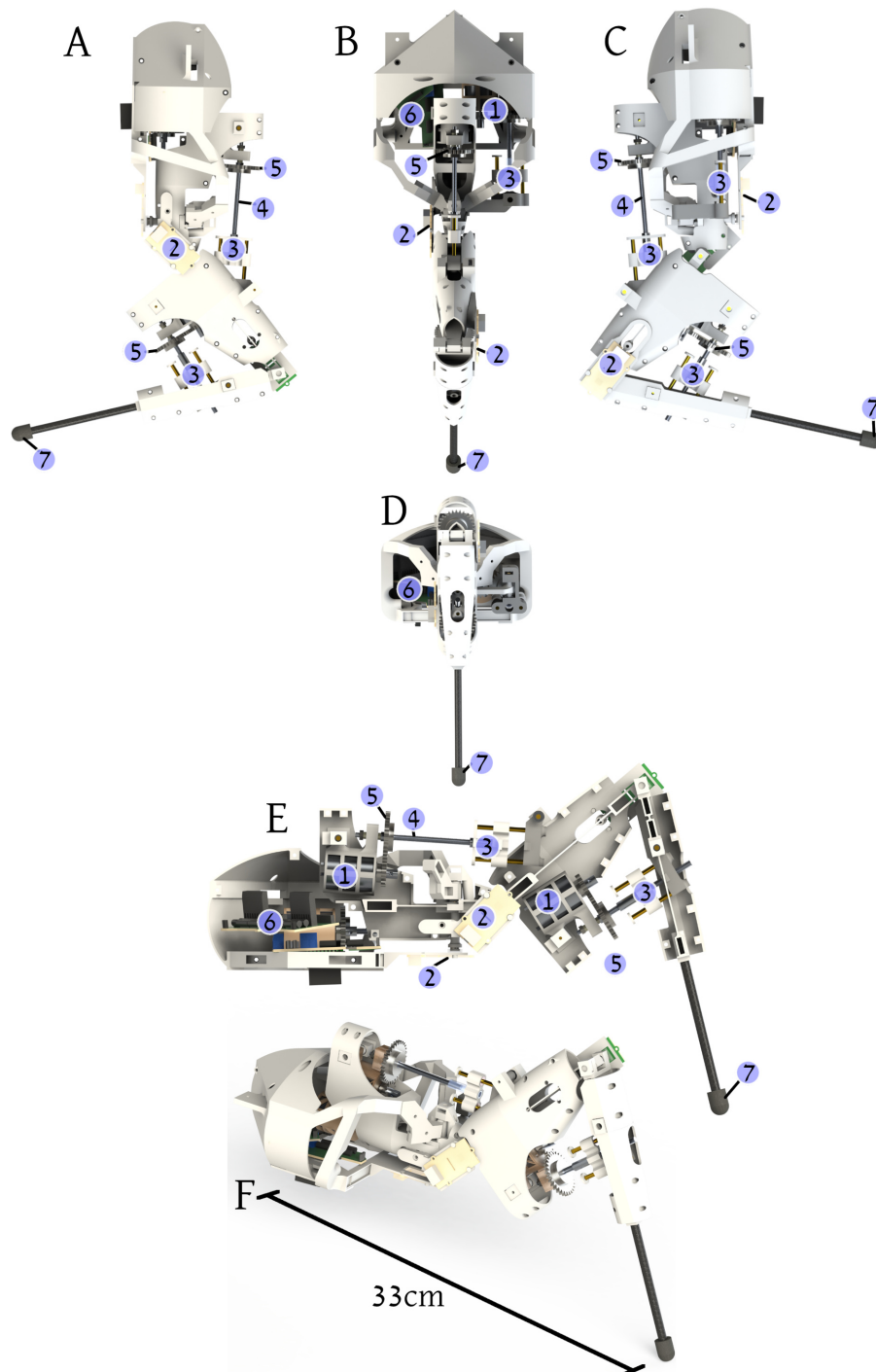


FIGURE 2. – Vues CAO de la patte bio-inspirée *Pohod15*. ① moteur CC ② Capteur angulaire ③ capteur de force ④ vis sans fin ⑤ roue dentée droite ⑥ Circuit de commande ⑦ Bout de patte en silicone.

C. Influence de l'angle de la patte

Afin d'évaluer l'influence de l'angle de la patte sur la consommation énergétique, un modèle numérique d'une patte a été utilisé [236].

La simulation est réalisée à paramètres de marche constants. Plus particulièrement, avec un patron de marche en tripode alterné (voir Fig. 1.3) et des pas d'une longueur de 100mm. La fréquence de marche est variable entre 0.5 et 3Hz, avec une charge de 500g. La distance entre le corps du robot et le bout de patte a été fixée à 200mm. Concernant le rapport cyclique, deux valeurs ont été étudiées : $\beta = 0.5$ et $\beta = 0.7$.

Un changement d'inclinaison de la patte, revient à incliner le champ gravitationnel, des forces de réaction du support, ainsi qu'une rotation de la trajectoire suivie par la patte. Modifications, influençant la dynamique du robot, décrite par le système suivant :

$$\begin{bmatrix} \tau_1(t) \\ \tau_2(t) \\ \tau_3(t) \end{bmatrix} = M(q(t))\ddot{q}(t) + C(q(t), \dot{q}(t))\dot{q}(t) + G(q(t)) + J(q(t))^T f(t) \quad t \in [0, T] \quad (.1)$$

$$\overline{P_{meca,T}} = \frac{6}{T} \cdot \int_0^T \sum_{i=1}^3 |\tau_i(t) \cdot \dot{q}_i(t)| \cdot dt \quad (.2)$$

Avec τ_i les couples moteurs de chaque articulation; $q(3 \times 1)$, $\dot{q}(3 \times 1)$, $\ddot{q}(3 \times 1)$, respectivement, les positions, vitesses et accélération de chaque liaison; $M(3 \times 3)$ est la matrice d'inertie dans l'espace articulaire; $C(3 \times 3)$ matrices de Coriolis et de la force centrifuge; $G(3 \times 1)$ matrice de gravité; $J(6 \times 3)$ est la matrice Jacobienne; $f(6 \times 1)$ sont les forces appliquées en bout de patte; T est la période de marche du robot.

L'ensemble des modifications est réalisée grâce à la matrice de rotation autour de l'axe \vec{y} , décrite ci-dessous :

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (.3)$$

On en déduit, les nouveaux vecteurs :

- Vecteur du champ gravitationnel

$$\vec{g}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -9.80665 \end{bmatrix} \quad (.4)$$

- Vecteur des forces de réaction du support

$$\overrightarrow{F_{support}}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_x \\ 0 \\ F_z \end{bmatrix} \quad (.5)$$

• C. Influence de l'angle de la patte

- Vecteur représentant la position du bout de patte, à chaque instant i

$$\text{Trajectoire}_i(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad (.6)$$

Afin d'estimer l'effet de l'angle d'inclinaison, nous calculons la valeur δP :

$$\delta P = |P_1 - P_2| + |P_1 - P_3| + |P_2 - P_3| \quad (.7)$$

Cette valeur représente la répartition de la charge entre les trois moteurs de la patte du robot. Plus δ est petit, plus la charge entre les moteurs est équilibrée. Plus δ est grand, plus grand est le déséquilibre entre les moteurs. C'est-à-dire, qu'un des moteurs est plus mobilisé que les autres. En calculant δP pour les valeurs de θ de 0° , 10° , 20° , 30° et 40° , nous obtenons la Fig. 2.5. Dans les deux situations décrites dans la Fig. 2.5A-B, les paramètres de marche utilisés ont été identiques, avec pour seul changement le rapport cyclique.

L'effet de la rotation du corps est illustrée par la Fig 3. Nous pouvons observer que l'inclinaison affecte particulièrement l'articulation *trochanter-femur*, qui doit compenser la rotation de la coxa. Cette modification semble être à l'origine du déséquilibre au niveau de la charge des moteurs, car cette articulation est maintenant la plus mobilisée.

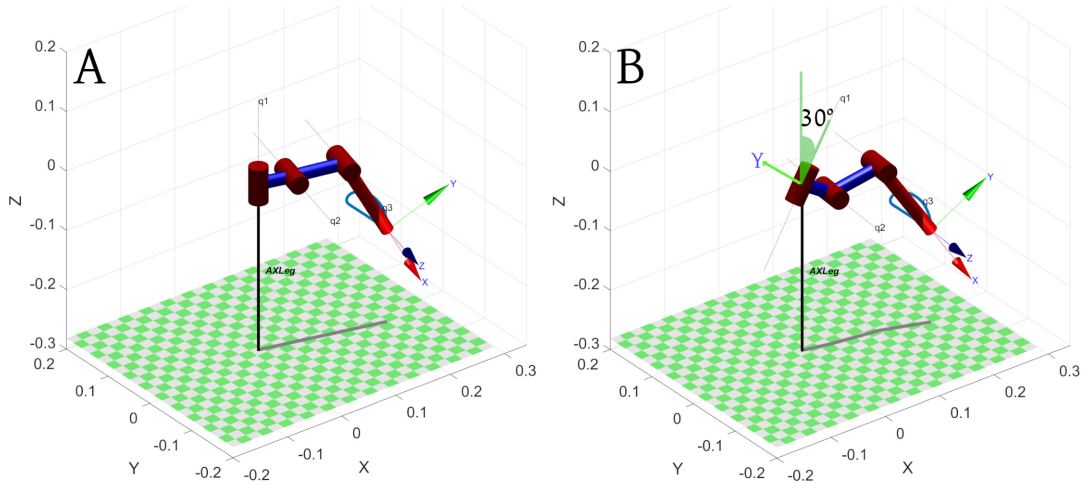


FIGURE 3. – Illustration de l'effet de l'inclinaison de la patte sur sa géométrie.

(A) Patte non inclinée, angle de 0° . (B) Patte inclinée, rotation d'angle de 30° autour de l'axe \vec{y} .

D. Données techniques des matériaux 3D

D.1.



PLA for 3D Printing

The next generation Biopolymer

- Ideal for tooling, prototyping and general industrial applications
- Ideal material to replace ABS (odourless)
- Machinable
- High mechanical and impact resistance
- Consistent diameter and extremely round
- Reduced breakage for longer printing performance
- High temperature resistance (180°C melting point after annealing)

Size Specifications ^[a]		Units	Test Method
Nominal Diameter	1.75 / 2.85	mm	-
Diameter Tolerances	±0.05 / ±0.15	mm	-
Mechanical Properties		Units	Test Method
Tensile Modulus	2400 ± 40	MPa	ISO 527-1
Tensile Stress at Yield	35.2 ± 0.8	MPa	ISO 527-1
Tensile Stress at Break	30.0 ± 3.0	MPa	ISO 527-1
Tensile Strain at Yield	2.0 ± 0.0	%	ISO 527-1
Tensile Strain at Break	6.0 ± 2.0	%	ISO 527-1
Flexural Strength	68 ± 5	MPa	ISO 178
Flexural Modulus	2120 ± 480	MPa	ISO 178
Izod Impact Strength, notched	10 ± 3	kJ/m ²	ISO 180

^[a] Property measured using the filament. All remaining properties are measured using 3D test specimens.

D.2.



Thermal Properties		Units	Test Method
Melt Mass-Flow Rate	13 ± 2	g/10min	ISO 1133
Heat Deflection (HDT) at 0.455 MPa	135 ± 36	°F	ISO 75
Heat Deflection (HDT) at 1.820 MPa	129 ± 37	°F	ISO 75
Glass Transition, 1Hz	151 – 153	°F	ISO 6721
Coefficient of Thermal Expansion	8 x 10 ⁻⁵	m/m°C	-
Melting Temperature ^[a]	342 ± 41	°F	ISO 11357
VICAT Softening Temperature	135 ± 36	°F	ISO 306
Printer Settings ^[b]		Units	Test Method
Extruder Temperature	392 – 419	°F	-
Plate Temperature	140	°F	-
Ventilation	0 – 50	%	-

^[b] Recommended settings. For the best results when printing with our filaments, carefully read the 3D printer manufacturer's instructions manual.

Additional Information

Regulatory Compliance: REACH / RoHs

Spool Weight: 1kg (2.2lbs)

All filaments are supplied in vacuum-sealed packaging containing a desiccant bag

Other sizes, spool weight and packaging are available upon request

Revision: 01/2022

Disclaimer:

This information is based on our current knowledge of raw materials and the manufacturing process and refers to the above mentioned products when leaving Volumic 3D. It is solely the customer's responsibility to determine if the product and information in this document are appropriate for the customer's end use. Responsibility for the use, storage, handling and disposal of the products herein is that of the purchaser or end user.

D.3.

Technical data sheet PLA

Ultimaker

Chemical Name	Polylactic acid
Description	Ultimaker PLA filament provides a no-hassle 3D printing experience thanks to its reliability and good surface quality. Our PLA is made from organic and renewable sources. It's safe, easy to print with and it serves a wide range of applications for both novice and advanced users.
Key features	Good tensile strength and surface quality, easy to work with at high print speeds, user-friendly for both home and office environments, PLA allows the creation of high-resolution parts. There is a wide range of color options available.
Applications	Household tools, toys, educational projects, show objects, prototyping, architectural models, as well as lost casting methods to create metal parts.
Non suitable for	Food contact and in-vivo applications. Long term outdoor usage or applications where the printed part is exposed to temperatures higher than 50 °C.

Filament specifications

	<u>Value</u>	<u>Method</u>
Diameter	2.85±0.10 mm	-
Max roundness deviation	0.10 mm	-
Net filament weight	750 g	-

Color information

<u>Color</u>	<u>Color code</u>
PLA Green	RAL 6018
PLA Black	RAL 9005
PLA Silver Metallic	RAL 9006
PLA White	RAL 9010
PLA Transparent	n/a
PLA Orange	RAL 2008
PLA Blue	RAL 5002
PLA Magenta	RAL 4010
PLA Red	RAL 3020
PLA Yellow	RAL 1003
PLA Pearl White	RAL 1013

D.4.

<u>Mechanical properties (*)</u>	<u>Injection molding</u>		<u>3D printing</u>	
	Typical value	Test method	Typical value	Test method
Tensile modulus	-	-	2346.5 MPa	ISO 527 (1 mm/min)
Tensile stress at yield	-	-	49.5 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Tensile stress at break	-	-	45.6 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Elongation at yield	-	-	3.3 %	ISO 527 (50 mm/min)
Elongation at break	-	-	5.2 %	ISO 527 (50 mm/min)
Flexural strength	-	-	103.0 MPa	ISO 178
Flexural modulus	-	-	3150.0 MPa	ISO 178
Izod impact strength, notched (at 23°C)	-	-	5.1 kJ/m²	ISO 180
Charpy impact strength (at 23°C)	-	-	-	-
Hardness	-	-	-	-
<u>Thermal properties</u>	<u>Typical value</u>		<u>Test method</u>	
Melt mass-flow rate (MFR)	6.09 g/10min		ISO 1133 (210 °C, 2.16 kg)	
Heat deflection (HDT) at 0.455 MPa	-		-	
Heat deflection (HDT) at 1.82 MPa	-		-	
Glass transition	~60 °C		ISO 11357	
Coefficient of thermal expansion (flow)	-		-	
Coefficient of thermal expansion (xflow)	-		-	
Melting temperature	145-160 °C		ISO 11357	
Thermal shrinkage	-		-	
<u>Other properties</u>	<u>Typical value</u>		<u>Test method</u>	
Specific gravity	1.24		ASTM D1505	
Flame classification	-		-	

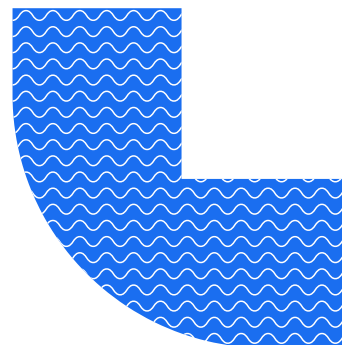
(*) See notes.

D.5.

Ultimaker

Ultimaker ABS

Technical data sheet



General overview

Chemical composition	See Ultimaker ABS safety data sheet, section 3
Description	Used by an array of industries worldwide, Ultimaker ABS is known for its exceptional mechanical properties. Ultimaker ABS is specifically formulated to minimize warping and ensure consistent interlayer adhesion
Key features	Toughness and heat resistance. Superior aesthetics, minimal warping, and reliable bed adhesion
Applications	Visual and functional prototyping, and short-run manufacturing
Non-suitable for	Food contact and in vivo applications. Long term UV exposure can negatively affect properties of an Ultimaker ABS printed part. Applications where the printed part is exposed to temperatures higher than 87 °C

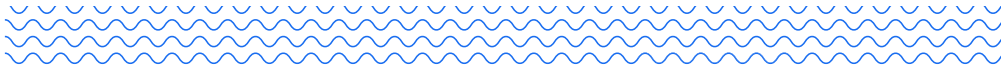
Filament specifications

	Method (standard)	Value
Diameter	–	2.85 ± 0.10 mm
Max roundness deviation	–	0.10 mm
Net filament weight	–	750 gr
Filament length	–	~ 107 m

Color information

Color	Color code
Black	RAL 9017
White	RAL 9003
Red	RAL 3020
Blue	RAL 5002
Silver	RAL 9006
Pearl Gold	RAL 1036
Green	RAL 6018
Orange	RAL 2008
Yellow	RAL 1023
Gray	RAL 7011

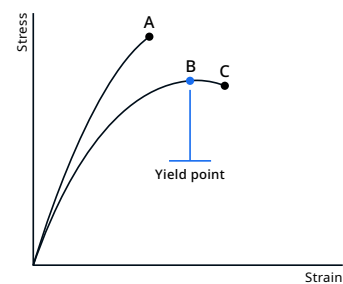
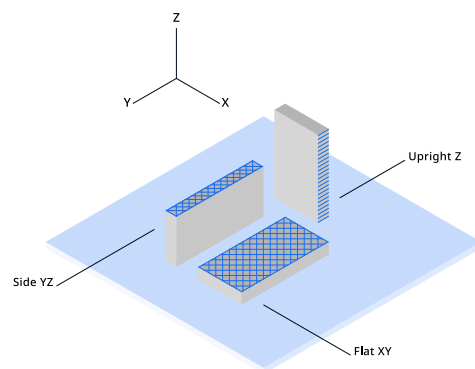
D.6.



Mechanical properties

All samples were 3D printed. See 'Notes' section for details.

	Test method	Typical value		
		XY (Flat)	YZ (Side)	Z (Up)
Tensile (Young's) modulus	ASTM D3039 (1 mm / min)	1962 ± 31 MPa	1931 ± 68 MPa	1699 ± 113 MPa
Tensile stress at yield	ASTM D3039 (5 mm / min)	38.1 ± 0.3 MPa	38.2 ± 0.4 MPa	No yield
Tensile stress at break	ASTM D3039 (5 mm / min)	33.9 ± 1.5 MPa	35.7 ± 1.0 MPa	19.0 ± 0.6 MPa
Elongation at yield	ASTM D3039 (5 mm / min)	4.1 ± 0.1%	4.1 ± 0.1%	No yield
Elongation at break	ASTM D3039 (5 mm / min)	4.6 ± 0.3%	4.5 ± 0.2%	2.0 ± 0.1%
Flexural modulus	ISO 178 (1 mm / min)	1430 ± 83 MPa	1470 ± 48 MPa	1317 ± 28 MPa
Flexural strength	ISO 178 (5 mm / min)	61.1 ± 3.2 MPa at 5.1% strain	60.2 ± 0.6 MPa at 5.3% strain	21.5 ± 1.8 MPa at 1.5% strain
Flexural strain at break	ISO 178 (5 mm / min)	No break (>10%)	No break (>10%)	1.5 ± 0.1%
Charpy impact strength (at 23 °C)	ISO 179-1 / 1eB (notched)	14.2 ± 1.2 kJ/m ² (Hinge) –	–	–
Hardness	ISO 7619-1 (Durometer, Shore D)	76 Shore D	–	–



- A. Tensile stress at break, elongation at break (no yield point)
 B. Tensile stress at yield, elongation at yield
 C. Tensile stress at break, elongation at break

Print orientation

As the FFF process produces part in a layered structure, mechanical properties of the part vary depending on orientation of the part. In-plane there are differences between walls (following the contours of the part) and infill (layer of 45° lines). These differences can be seen in the the data for XY (printed flat on the build plate - mostly infill) and YZ (printed on its side - mostly walls). Additionally, the upright samples (Z direction) give information on the strength of the interlayer adhesion of the material. Typically the interlayer strength (Z) has the lowest strength in FFF.

Note: All samples are printed with 100% infill - blue lines in the illustration indicate typical directionality of infill and walls in a printed part.

Tensile properties

Printed parts can yield before they break, where the material is deforming (necking) before it breaks completely. When this is the case, both the yield and break points will be reported. Typical materials that yield before breaking are materials with high toughness like Tough PLA, Nylon and CPE+.

If the material simply breaks without yielding, only the break point will be reported. This is the case for brittle materials like PLA and PC Transparent, as well as elastomers (like TPU).

D.7.



Thermal properties

Samples marked with an asterisk (*) were 3D printed. See 'Notes' section for details.

	Test Method	Typical value
Melt mass-flow rate (MFR)	ISO 1133 (260 °C, 5 kg)	41 g / 10 min
Heat deflection (HDT) at 0.455 MPa*	ISO 75-2 / B	86.6 ± 0.4 °C
Vicat softening temperature*	ISO 306 / A120	93.8 ± 0.7 °C
Glass transition	ISO 11357 (DSC, 10 °C / min)	100.5 °C
Melting temperature	ISO 11357 (DSC, 10 °C / min)	- (amorphous)

Other properties

Specific gravity	ISO 1183	1.1 g / cm ³
------------------	----------	-------------------------

Notes

*3D Printing: all samples were printed using a new spool of material loaded in an Ultimaker S5 Pro bundle with engineering intent profiles using 0.15 mm layer height with AA0.4 printcore and 100% infill, using Ultimaker Cura 4.9. Samples were printed 'one-at-a-time'. Printed samples were conditioned in room temperature for at least 24h before measuring.

Specimen dimensions (L x W x H):

- Tensile test: 215 x 20 x 4 mm
- Flexural/Vicat/HDT: 80 x 10 x 4 mm
- Charpy: 80 x 10 x 4 mm with printed Notch (Type 1eB)

Disclaimer

Any technical information or assistance provided herein is given and accepted at your risk, and neither Ultimaker nor its affiliates make any warranty relating to it or because of it. Neither Ultimaker nor its affiliates shall be responsible for the use of this information, or of any product, method or apparatus mentioned, and you must make your own determination of its suitability and completeness for your own use, for the protection of the environment, and for the health and safety of your employees and purchasers of your products. No warranty is made of the merchantability or fitness of any product; and nothing herein waives any of Ultimaker's conditions of sale. Specifications are subject to change without notice.

Version	v5.00
Date	April 20, 2022

D.8.

Technical data sheet CPE

Ultimaker

Chemical Name	Copolyester
Description	CPE is chemical resistant, strong, tough and demonstrate good dimensional stability. CPE is available in a wide range of colors to choose from, including gray scale for more professional looking models.
Key features	Excellent chemical resistance, toughness and dimensional stability, good interlayer adhesion (especially when using the front door add-on), and low levels of ultrafine particles (UFPs) and volatile organic compounds (VOCs).
Applications	Visual and functional prototyping and short run manufacturing.
Non suitable for	Food contact and in-vivo applications. Long term outdoor usage or applications where the printed part is exposed to temperatures higher than 70 °C.

Filament specifications

	<u>Value</u>	<u>Method</u>
Diameter	2.85±0.10 mm	-
Max roundness deviation	0.10 mm	-
Net filament weight	750 g	-

Color information

<u>Color</u>	<u>Color code</u>
CPE Black	RAL 9017 (est.)
CPE White	RAL 9010 (est.)
CPE Light Gray	RAL 7035
CPE Dark Gray	RAL 7043
CPE Red	RAL 3028 (est.)
CPE Blue	RAL 5012 (est.)
CPE Yellow	RAL 1021 (est.)
CPE Green	Pantone 368C (est.)
CPE Transparent	n/a

D.9.



FICHE TECHNIQUE UNIVERSAL ULTRA

DESCRIPTION

L'UNIVERSAL ULTRA est fabriqué à partir d'un biopolymère biodégradable renouvelable à haute performance et résistant à la chaleur.

SUPPORT TECHNIQUE

EMAIL: support@volumic3d.com

APPLICATION

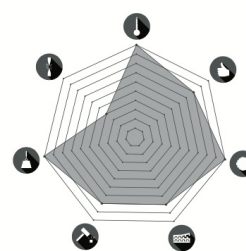
L'UNIVERSAL ULTRA est conçu pour une utilisation industrielle extrême. Il possède de très bonnes propriétés mécaniques et thermiques.

STOCKAGE ET DURÉE DE VIE

Conserver à température ambiante (18-27 ° C), à l'abri de la chaleur directe et du soleil et dans un endroit sec. Stocké correctement, ce produit a une durée de vie d'un an.

PROPRIÉTÉS

TEST	METHODE	UNITÉ	VALEUR
Module de flexion	ISO 527	MPa	4400
Résistance à la traction	ISO 527	MPa	61
Contrainte à la rupture	ISO 527	%	3,4
Contrainte à la rupture	ISO 527	Mpa	50
Allongement à la rupture	ISO 527	%	3
Résistance chocs entaillée	ISO 179-1/I eA	kJ/m^2	4.4
Résistance aux chocs	ISO 179-1/I eU	kJ/m^2	72
MFR	ISO 1133	g/10 min	12
Température de fusion	ISO 3146-C	C°	190-210
VICAT A (VST)	ISO 306	C°	160
HDT / B	ISO 75	C°	110
Contraction	ISO 294-4	%	0.4
Densité	ISO 1183	g/cm^3	1.39



QUALITÉ
VISUELLE
9

HAUTE
RESISTANCE
TEMPERATURE
10

ADHÉSION
DE COUCHE
8

RÉSISTANCE
AUX CHOC
8

ALLONGEMENT
À LA RUPTURE
5

STRESS
MAXIMUM
9

FACILITE
D'IMPRESSION
7

VOLUMIC 3D
12bis Rue Louis GARNERAY
06300 NICE
France

TVA: FR55452187792
SIRET: FR45218779200034

Téléphone: +33 9 500 27 400
Email: info@volumic3d.com
Internet: www.volumic3d.com

D.10.

<u>Mechanical properties (*)</u>	<u>Injection molding</u>		<u>3D printing</u>	
	Typical value	Test method	Typical value	Test method
Tensile modulus	1900 MPa	ASTM D638	1537.5 MPa	ISO 527 (1 mm/min)
Tensile stress at yield	50 MPa	ASTM D638	41.1 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Tensile stress at break	28 MPa	ASTM D638	37.7 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Elongation at yield	5 %	ASTM D638	4.7 %	ISO 527 (50 mm/min)
Elongation at break	100 %	ASTM D638	5.1 %	ISO 527 (50 mm/min)
Flexural strength	-	-	79.5 MPa	ISO 178
Flexural modulus	2100 MPa	ASTM D790	1990.0 MPa	ISO 178
Izod impact strength, notched (at 23°C)	95 J/m	ASTM D256	4.0 kJ/m²	ISO 180
Charpy impact strength (at 23°C)	-	-	-	-
Hardness	108 (Rockwell)	ASTM D785	-	-
<u>Thermal properties</u>	<u>Typical value</u>		<u>Test method</u>	
Melt mass-flow rate (MFR)	13.2 g/10min		ISO 1133 (240 °C, 2.16 kg)	
Heat deflection (HDT) at 0.455 MPa	70 °C		ASTM D648	
Heat deflection (HDT) at 1.82 MPa	62 °C		ASTM D648	
Glass transition	~ 82 °C		DSC	
Coefficient of thermal expansion (flow)	7·10 ⁻⁵ mm/mm °C		ASTM E693	
Coefficient of thermal expansion (xflow)	-		-	
Melting temperature	Not relevant (amorphous)			
Thermal shrinkage	-		-	
<u>Other properties</u>	<u>Typical value</u>		<u>Test method</u>	
Specific gravity	1.27		ASTM D792	
Flame classification	Not tested (typically HB when molded)		-	

(*) See notes.

• D. Données techniques des matériaux 3D

D.11.

MATERIAL PROPERTIES DATA

Standard Resins

The following material properties are comparable for Clear Resin, White Resin, Grey Resin, Black Resin, and Color Kit.

	METRIC ¹		IMPERIAL ¹		METHOD
	Green ²	Post-Cured ³	Green ²	Post-Cured ³	
Tensile Properties					
Ultimate Tensile Strength	38 MPa	65 MPa	5510 psi	9380 psi	ASTM D638-14
Tensile Modulus	1.6 GPa	2.8 GPa	234 ksi	402 ksi	ASTM D638-14
Elongation at Break	12%	6%	12%	6%	ASTM D638-14
Flexural Properties					
Flexural Modulus	1.3 GPa	2.2 GPa	181 psi	320 psi	ASTM D 790-15
Impact Properties					
Notched Izod	16 J/m	25 J/m	0.3 ft-lbf/in	0.46 ft-lbf/in	ASTM D256-10
Thermal Properties					
Heat Deflection Temp. @ 1.8 MPa	43 °C	58 °C	109 °F	137 °F	ASTM D 648-16
Heat Deflection Temp. @ 0.45 MPa	50 °C	73 °C	121 °F	134 °F	ASTM D 648-16

¹ Material properties can vary with part geometry, print orientation, print settings, and temperature.

² Data was obtained from green parts, printed using Form 2, 100 µm, Clear settings, without additional treatments.

³ Data was obtained from parts printed using Form 2, 100 µm, Clear settings and post-cured with 1.25 mW/cm² of 405 nm LED light for 60 minutes at 60 °C.

SOLVENT COMPATIBILITY

Percent weight gain over 24 hours for a printed and post-cured 1 x 1 x 1 cm cube immersed in respective solvent:

Solvent	24 hr weight gain, %	Solvent	24 hr weight gain, %
Acetic Acid 5%	< 1	Mineral oil (Light)	< 1
Acetone	Sample cracked	Mineral oil (Heavy)	< 1
Bleach ~5% NaOCl	< 1	Salt Water (3.5% NaCl)	< 1
Butyl Acetate	< 1	Skydrol 5	1
Diesel Fuel	< 1	Sodium Hydroxide solution (0.025% PH 10)	< 1
Diethyl glycol Monomethyl Ether	1.7	Strong Acid (HCl conc)	Distorted
Hydraulic Oil	< 1	Water	< 1
Hydrogen peroxide (3%)	< 1	Xylene	< 1
Isooctane (aka gasoline)	< 1		
Isopropyl Alcohol	< 1		

D.12.

MATERIAL PROPERTIES DATA

Tough 2000 Resin

METRIC ¹			IMPERIAL ¹		METHOD
	Green ²	Post-Cured ³	Green ²	Post-Cured ³	
Tensile Properties					
Ultimate Tensile Strength	29 MPa	46 MPa	4206 psi	6671 psi	ASTM D638-14
Tensile Modulus	1.2 GPa	2.2 GPa	174 ksi	329 ksi	ASTM D638-14
Elongation at Break	74%	48%	74%	48%	ASTM D638-14
Flexural Properties					
Flexural Strength	17 MPa	65 MPa	2465 psi	9427 psi	ASTM D 790-15
Flexural Modulus	0.45 GPa	1.9 GPa	65 ksi	275 ksi	ASTM D 790-15
Impact Properties					
Notched Izod	79 J/m	40 J/m	1.5 ft-lbf/in	0.75 ft-lbf/in	ASTM D256-10
Unnotched Izod	208 J/m	715 J/m	3.9 ft-lbf/in	13 ft-lbf/in	ASTM D4812-11
Temperature Properties					
Heat Deflection Temp. @ 1.8 MPa	42 °C	53 °C	108 °F	127 °F	ASTM D 648-16
Heat Deflection Temp. @ 0.45 MPa	48 °C	63 °C	118 °F	145 °F	ASTM D 648-16
Thermal Expansion (0-150°C)	107 µm/m/°C	91 µm/m/°C	59 µin/in/°F	50 µin/in/°F	ASTM E 831-13

¹ Material properties can vary with part geometry, print orientation, print settings, and temperature.

² Data was obtained from green parts, printed using Form 2, 100 µm, Tough 2000 settings, without additional treatments.

³ Data was obtained from parts printed using Form 2, 100 µm, Tough 2000 settings and post-cured with a Form Cure for 120 minutes at 80 °C.

SOLVENT COMPATIBILITY

Percent weight gain over 24 hours for a printed and post-cured 1 x 1 x 1 cm cube immersed in respective solvent:

Solvent	24 hr weight gain, %	Solvent	24 hr weight gain, %
Acetic Acid 5%	0.7	Isooctane (aka gasoline)	< 0.1
Acetone	18.8	Mineral oil (light)	0.1
Isopropyl Alcohol	3.7	Mineral oil (Heavy)	0.2
Bleach ~5% NaOCl	0.6	Salt Water (3.5% NaCl)	0.6
Butyl Acetate	6.2	Sodium Hydroxide solution (0.025% PH 10)	0.6
Diesel Fuel	0.1	Water	0.6
Diethyl glycol Monomethyl Ether	5.3	Xylene	4.1
Hydraulic Oil	< 0.1	Strong Acid (HCl conc)	3.0
Skydrol 5	0.9		
Hydrogen peroxide (3%)	0.6		

• D. Données techniques des matériaux 3D

D.13.

MATERIAL PROPERTIES DATA

High Temp Resin

	METRIC ¹			IMPERIAL ¹			METHOD
	Green ²	Post-Cured ³	Post-Cured + additional Thermal Cure ⁴	Green ²	Post-Cured ³	Post-Cured + additional Thermal Cure ⁴	
Tensile Properties							
Ultimate Tensile Strength	21 MPa	58 MPa	49 MPa	3031 psi	8456 psi	7063 psi	ASTM D638-14
Tensile Modulus	0.75 GPa	2.8 GPa	2.8 GPa	109 ksi	399 ksi	406 ksi	ASTM D638-14
Elongation at Break	14%	3.3%	2.3%	14%	3.3%	2.3%	ASTM D638-14
Flexural Properties							
Flexural Strength at Break	24 MPa	95 MPa	97 MPa	3495 psi	13706 psi	14097 psi	ASTM D 790-15
Flexural Modulus	0.7 GPa	2.6 GPa	2.8 GPa	100 ksi	400 ksi	406 ksi	ASTM D 790-15
Impact Properties							
Notched Izod	33 J/m	18 J/m	17 J/m	0.61 ft-lbf/in	0.34 ft-lbf/in	0.32 ft-lbf/in	ASTM D256-10
Thermal Properties							
Heat Deflection Temp. @ 1.8 MPa	44 °C	78 °C	101 °C	111 °F	172 °F	214 °F	ASTM D 648-16
Heat Deflection Temp. @ 0.45 MPa	49 °C	120 °C	238 °C	120 °F	248 °F	460 °F	ASTM D 648-16
Thermal Expansion	118 µm/m/°C	80 µm/m/°C	75 µm/m/°C	41 µin/in/°F	44 µin/in/°F	41 µin/in/°F	ASTM E 831-13

¹ Material properties can vary with part geometry, print orientation, print settings, and temperature.

² Data was obtained from green parts, printed using Form 2, 100 µm, High Temp settings, washed for 5 minutes in Form Wash and air dried without post cure.

³ Data was obtained from parts printed using a Form 2, 100 micron, High Temp settings, and post-cured with Form Cure at 60 °C for 60 minutes.

⁴ Data was obtained from parts printed using a Form 2, 100 micron, High Temp settings, and post-cured with Form Cure at 80 °C for 120 minutes plus an additional thermal cure in a lab oven at 160 °C for 180 minutes.

SOLVENT COMPATIBILITY

Percent weight gain over 24 hours for a printed and post-cured 1 x 1 x 1 cm cube immersed in respective solvent:

Solvent	24 hr size gain, %	24 hr weight gain, %	Solvent	24 hr size gain, %	24 hr weight gain, %
Acetic Acid 5%	< 1	< 1	Mineral oil (Light)	< 1	< 1
Acetone	< 1	2	Mineral oil (Heavy)	< 1	< 1
Bleach ~5% NaOCl	< 1	< 1	Salt Water (3.5% NaCl)	< 1	< 1
Butyl Acetate	< 1	< 1	Skydrol 5	< 1	1.1
Diesel Fuel	< 1	< 1	Sodium Hydroxide solution (0.025% PH 10)	< 1	< 1
Diethyl glycol Monomethyl Ether	< 1	1	Strong Acid (HCl conc)	1.2	< 1
Hydraulic Oil	< 1	< 1	Tripropylene glycol monomethyl ether	< 1	< 1
Hydrogen peroxide (3%)	< 1	< 1	Water	< 1	< 1
Isooctane (aka gasoline)	< 1	< 1	Xylene	< 1	< 1
Isopropyl Alcohol	< 1	< 1			

D.14.

Selective Laser Sintering

PA 12 (SLS)

PA 12 (SLS) is a general-purpose material that offers excellent long-term stability and good chemical resistance, making it suitable for functional prototypes and end-use parts, as well as consumer goods.



MEASUREMENT	VALUE	UNIT	STANDARD
Density	0,95	g/cm ³	N/A
Tensile Strength	48	MPa	DIN EN ISO 527
Tensile Modulus	1650	MPa	DIN EN ISO 527
Flexural Strength	41	MPa	ASTM D790
Flexural Modulus	1500	MPa	DIN EN ISO 178
Impact Strength	4,4	kJ/m ²	DIN EN ISO 180 (Notched, Izod)
Elongation at Break	20	%	DIN EN ISO 527
Hardness	75	Shore D	ASTM D2240
Heat Deflection Temperature 1	86	°C	ASTM D648 (@1.81 MPa)
Melting Temperature	176	°C	DIN EN ISO 11357 (20°C/min)

Actual values may vary with build conditions.

For more information on this material, please visit mtls.am/pa12-sls.

D.15.

Selective Laser Sintering

PA-AF (Aluminum Filled)

PA-AF blends polyamide with aluminum to produce strong, stiff parts resistant to temperatures of up to 130°C. With a metallic appearance, it is ideal for models, rapid tooling, and fixtures.



MEASUREMENT	VALUE	UNIT	STANDARD
Density	1,36	g/cm ³	N/A
Tensile Strength	48	MPa	DIN EN ISO 527
Tensile Modulus	3800	MPa	DIN EN ISO 527
Flexural Modulus	3600	MPa	DIN EN ISO 178
Impact Strength	4,6	kJ/m ²	DIN EN ISO 179 (Notched, Charpy)
Elongation at Break	3,5	%	DIN EN ISO 527
Hardness	76	Shore D	ASTM D2240
Heat Deflection Temperature 1	130	°C	ASTM D648 (@1.81 MPa)

Actual values may vary with build conditions.

For more information on this material, please visit mtls.am/pa12-af.

D.16.

Selective Laser Sintering

PA-GF

PA-GF blends polyamide with glass beads to offer higher durability, stiffness, and thermal resistance. It is ideal for prototypes or applications where temperature or wear resistance are key.



MEASUREMENT	VALUE	UNIT	STANDARD
Density	1,22	g/cm ³	N/A
Tensile Strength	51	MPa	DIN EN ISO 527
Tensile Modulus	3200	MPa	DIN EN ISO 527
Flexural Modulus	2900	MPa	DIN EN ISO 178
Impact Strength	4,2	kJ/m ²	DIN EN ISO 180 (Notched, Izod)
Elongation at Break	6	%	DIN EN ISO 527
Hardness	80	Shore D	ASTM D2240
Heat Deflection Temperature 1	110	°C	ASTM D648 (@1.81 MPa)

Actual values may vary with build conditions.

For more information on this material, please visit mtls.am/pa12-gf.

E. Étude de la déformation d'une structure à exosquelette

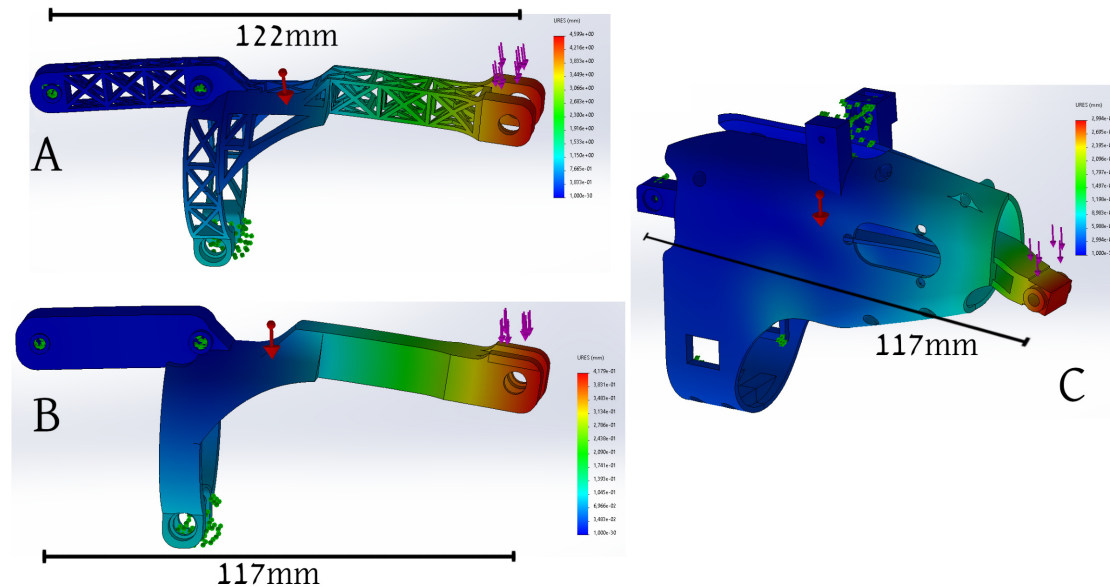


FIGURE 4. – Simulation de la déformation de différents types de pattes. Chaque segment représente le fémur. Le matériaux utilisé pour l'ensemble des trois pièces est l'ABS. Une masse de 200 g est appliquée à son extrémité (flèches roses) pendant que le point de fixation au segment antérieur est fixe (flèches vertes). L'ensemble des pièces est soumis à la force de pesanteur, représentée par la flèche rouge. (A) Fémur avec une armature à base de maille, d'une masse égale à 8,6 g. La déformation maximale est égale à 4,6 mm. (B) Fémur avec une armature centrale, d'une masse de 27,2 g. La déformation maximale est égale à 0,4 mm. (C) Fémur du type exosquelette, d'une masse de 28.0 g. La déformation maximale est égale à 0,03 mm.

- F. Budget de construction de la patte Pohod15Leg

F. Budget de construction de la patte Pohod15Leg

Dénomination	Réf	Fournisseur	Prix unitaire HT	Patte		Robot complet	
				Quantité	Coût	Quantité2	Coût2
Tige acier 6mm (au mètre)	2011/AU5PBBI	hyperacier	2,08 €	1	2,08 €	6	12,48 €
Tige acier 4mm (au mètre)	2011/AU5PBBI	hyperacier	2,08 €	1	2,08 €	6	12,48 €
Roue dentée droite 15 dents	ZG1-15	HPC	9,97 €	3	29,91 €	18	179,46 €
Roue dentée droite 30 dents	ZG1-30	HPC	13,56 €	3	40,68 €	18	244,08 €
Tube carbone 5mm, 1 mètre	CDTC05X06X1000	tubecarbone.com	53,20 €	1	53,20 €	1	53,20 €
Tube carbone 2,5mm, 1 mètre	CWTC2_5X04X1000	tubecarbone.com	4,25 €	1	4,25 €	1	4,25 €
Ecrrous M3 (pack de 100)	189-563	RS	7,44 €	1	7,44 €	1	7,44 €
Ecrrous M4 (pack de 100)	189-579	RS	7,28 €	1	7,28 €	1	7,28 €
Vis M3 (pack de 100)	822-9094	RS	8,94 €	1	8,94 €	1	8,94 €
Vis M2 (pack de 100)	914-1759	RS	6,04 €	1	6,04 €	1	6,04 €
Vis M2.5 (pack de 100)	560-552	RS	2,79 €	1	2,79 €	1	2,79 €
Vis M1.6 (pack de 100)	179-5650	RS	24,58 €	1	24,58 €	1	24,58 €
Filament ULTRA blanc 1kg	UNIV3047	volumic 3D shop	58,80 €	1	58,80 €	2	117,60 €
Résine SLA High Temp 1L	RS-F2-HTAM-01	makershop 3d	190,00 €	1	190,00 €	1	190,00 €
Roulement à billes	618/3-ZZ	lebonroulement.com	1,59 €	20	31,80 €	120	190,80 €
Moteur CC 30V	RK-370CC-14230	alexpress.com	3,65 €	3	10,95 €	18	65,70 €
Capteur angulaire	101020692	Lextronic	5,42 €	3	16,26 €	18	97,56 €
Ampli Boost DC-DC	CV CC 150W 10A DC	alexpress.com	2,73 €	1	2,73 €	3	8,19 €
Batterie	144-9413	RS	25,94 €	1	25,94 €	2	51,88 €
Nappe de fils	FC10GL	Lextronic	0,60 €	2	1,20 €	12	7,20 €
Pont en H	511-1298	Mouser	4,37 €	3	13,11 €	18	78,66 €
Connecteurs signal	267-7400	RS	2,54 €	1	2,54 €	3	7,62 €
Connecteur puissance (pack de 2)	SCREW02	Lextronic	0,42 €	4	1,68 €	24	10,08 €
Diode 6A6 (pack de 20)	885-5381	RS	6,04 €	1	6,04 €	4	24,16 €
Module Grove HUB I2C 8 canaux	103020293	Lextronic	7,20 €	1	7,20 €	6	43,20 €
Ensemble de ressorts	-	Vanel	50,00 €	1	50,00 €	6	300,00 €
Capteur effet Hall	SS494B	Mouser	6,33 €	6	37,98 €	36	227,88 €
				TOTAL LEG		TOTAL	
						645,50 € 1 983,55 €	

H. Aspect irréversible d'une liaison vis sans fin - écrou

Un mécanisme vis-écrou est considéré comme auto-bloquant, s'il existe une friction suffisamment élevée afin d'annuler la composante tangentielle des efforts exercées sur les dents de celle-ci [181]. Ce phénomène est résumé par l'équation ci-dessous :

$$f \geq \cos(\phi_n) \cdot \tan(\lambda) \quad (.8)$$

Avec f , le coefficient de friction entre la vis et l'écrou. ϕ_n est l'angle de pression de l'engrenage. λ est l'angle d'attaque. L'angle de pression d'une vis à filetage métrique M4 est égal à $\phi_n = 20^\circ$ [308] (standard ISO). L'angle d'attaque peut être calculé à partir du pas P et du diamètre D de la vis [308] :

$$\lambda = \arctan\left(\frac{P}{\pi \cdot D}\right) \quad (.9)$$

Dans le cas d'une vis M4, le pas est égal à $0,7 \text{ mm}$. L'angle d'attaque est donc égal à $\lambda = 3,1^\circ$. Nous en déduisons que le frottement doit être supérieur à $0,0523$. Dans le cas du prototype développé, nous utilisons une vis sans fin en acier M4. De l'autre côté, la liaison est garantie par un écrou en acier. On peut donc estimer le coefficient de frottement acier-acier à $0,1$ [309]. Dans cette condition, l'irréversibilité du mécanisme est garantie.

Il est important de remarquer, que l'équation démontre qu'il est possible de réduire d'avantage le frottement et ainsi d'améliorer le rendement.

Plus particulièrement, le rendement d'un système vis sans fin - écrou est décrit par l'équation suivante (pour les détails des calculs voir [181]) :

$$\text{rendement} = \frac{\cos(\phi_n - f \cdot \tan(\lambda))}{\cos(\phi_n + f \cdot \tan(\lambda))} \quad (.10)$$

Dans le cas d'une liaison acier-acier, le rendement est égal à 34% . En choisissant des matériaux plus adaptés ou par l'ajout d'un système de lubrification, on pourrait atteindre la condition limite de l'irréversibilité, induisant un rendement de 50% .

I. Dimensionnement des ressorts du capteur de force

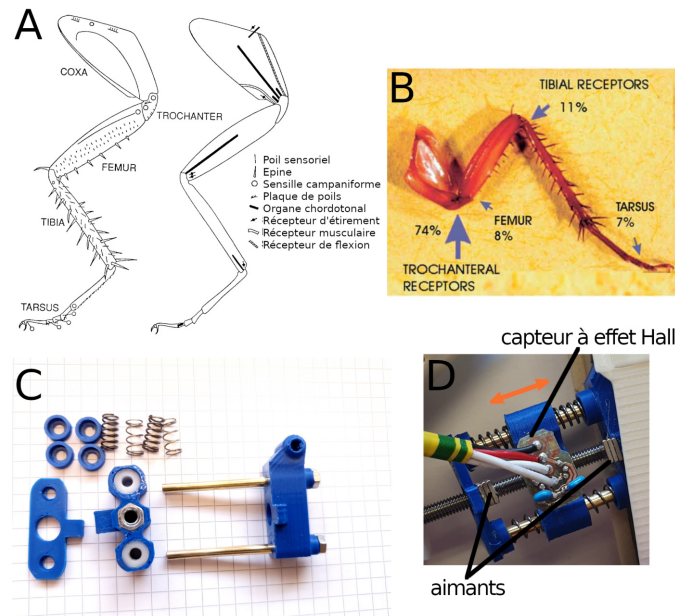


FIGURE 5. – (A) Schéma des organes sensoriels chez les insectes et le robot *Pohod15*. Adapté de DELCOMYN, NELSON et COCATRE-ZILGIEN [160]. (B) Localisation des sensilles campaniformes chez le cafard. Adapté de ZILL, SCHMITZ et BÜSCHGES [265]. (C) Pièces composant le capteur de force de la patte *Pohod15Leg*. (D) Capteur de force de la patte *Pohod15Leg*.

Afin de dimensionner les ressorts utilisés dans chaque capteur de force du robot, un modèle simplifié de la patte doit être défini :

• I. Dimensionnement des ressorts du capteur de force

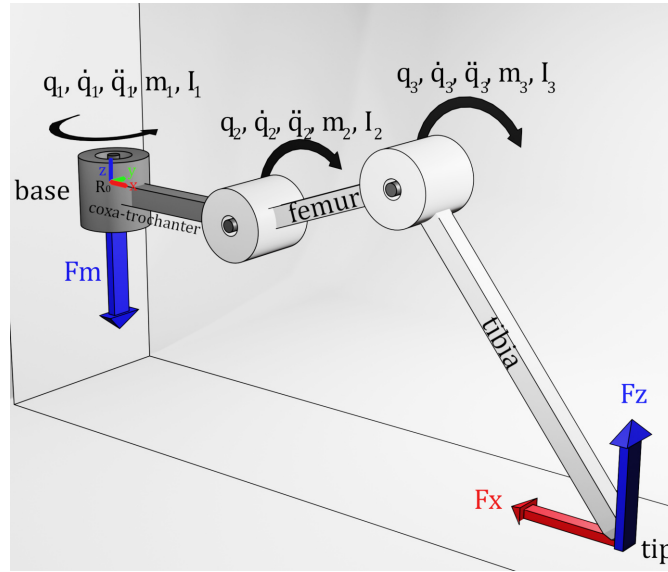


FIGURE 6. – Modèle simplifié de la patte d'un robot hexapode. $q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i$ sont les positions, vitesses et accélérations angulaires de chaque liaison i , respectivement. m_i est la masse de chaque segment. I_i est la matrice d'inertie de chaque segment.

Le dimensionnement consiste à trouver la raideur de chacun des quatre ressorts composant un capteur, afin que le déplacement maximal soit limité à 1 cm . Ce déplacement est défini par l'espace disponible dans la structure du robot et la distance maximale de détection du capteur à effet Hall SS494B.

Il est important de remarquer, que le point d'attache entre la partie mobile et le segment de patte qui suit n'est pas aligné avec le centre des deux axes du capteur. Les ressorts pour chaque axe seront donc différents. Plus particulièrement, un coefficient de 3,2 doit être appliqué (défini à partir des distances entre les deux axes et le point d'attache).

Le calcul de la raideur des ressorts est réalisé dans le pire des cas. Pour chaque articulation, on estime que la rotation est faite à sa vitesse maximale 5 rad/s et à l'accélération maximale 5 rad/s^2 . En calculant le couple maximal exercé au niveau de chaque liaison, on détermine la raideur des ressorts. Un coefficient de sécurité de 2 est appliqué, afin de garantir les variations causées par les chocs. Les résultats des calculs sont présentés ci-dessous.

• I. Dimensionnement des ressorts du capteur de force

Joint 1 [Tiabia]

Static system

Top spring [N/m] :

k =

737.8197

Bottom spring [N/m] :

ans =

230.5686

Dynamic system

Top spring [N/m] :

k =

1.3132e+03

Bottom spring [N/m] :

ans =

410.3635

Top spring [daN/mm] :

ans =

0.1313

Bottom spring [daN/mm] :

ans =

0.0410

#####

Joint 2 [Femur]

Static system

Top spring [N/m] :

k =

555.6938

Bottom spring [N/m] :

ans =

173.6543

Dynamic system

Top spring [N/m] :

k =

665.6341

Bottom spring [N/m] :

ans =

208.0107

Top spring [daN/mm] :

ans =

0.0666

Bottom spring [daN/mm] :

ans =

0.0208

#####

Joint 3 [Coxa]

Static system

Top spring [N/m] :

k =

792.8840

Bottom spring [N/m] :

ans =

247.7762

Dynamic system

Top spring [N/m] :

k =

924.8147

Bottom spring [N/m] :

ans =

289.0046

Top spring [daN/mm] :

ans =

0.0925

Bottom spring [daN/mm] :

ans =

0.0289

J. Calcul des équations décrivant l'actionneur irréversible

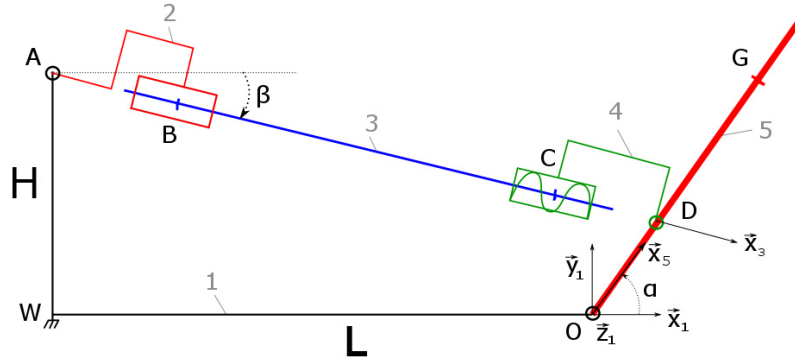


FIGURE 7. – Schéma cinématique d'un actionneur irréversible. (H) Hauteur. (L) La longueur. (1) La segment antérieur de la patte. (2) Support moteur. (3) Vis sans fin. (5) Segment postérieur de la patte.

J.1. Calcul du couple moteur

1. En isolant les solides {2, 3, 4}

Les actions mécaniques se résument aux torseurs statiques suivants :

$$\{T_{1/2}\}_A = \begin{Bmatrix} X_{1/2} & L_{1/2} \\ Y_{1/2} & M_{1/2} \\ Z_{1/2} & 0 \end{Bmatrix}_{R3,A} \quad \text{liaison pivot d'axe } \vec{z} \text{ en A} \quad (.11)$$

$$\{T_{5/4}\}_D = \begin{Bmatrix} X_{5/4} & L_{5/4} \\ Y_{5/4} & M_{5/4} \\ Z_{5/4} & 0 \end{Bmatrix}_{R3,D} \quad \text{liaison pivot d'axe } \vec{z} \text{ en D} \quad (.12)$$

En rapportant le moment au point A :

$$\vec{M}_{5/4,A} = \vec{M}_{5/4,D} + \vec{AD} \wedge \vec{R}_{5/4} \quad (.13)$$

$$= \lambda \cdot Y_{5/4} \cdot \vec{z} \quad \text{Avec } \lambda \text{ la distance } \vec{AD} \quad (.14)$$

En appliquant le théorème du moment dynamique, nous obtenons :

$$\vec{\delta}_{2/R0,A} + \vec{\delta}_{3/R0,A} + \vec{\delta}_{4/R0,A} = \vec{M}_{5/4,A} + \vec{M}_{1/2,A} = \lambda \cdot Y_{5/4} \cdot \vec{z} \quad (.15)$$

Car les moments dynamiques sont nuls :

• J. Calcul des équations décrivant l'actionneur irréversible

$$\vec{\delta}_{2/R0,A} = \frac{d}{dt} \cdot (\vec{\sigma}_{A,2/R0}) - (\vec{\sigma}_{A,2/R0}) \cdot \frac{d}{dt} \vec{z} \quad (.16)$$

$$\vec{\delta}_{2/R0,A} = \vec{0} \quad (.17)$$

Puisqu'on néglige la masse des segments de la liaison et leur inertie devant celle de 5 :

$$\vec{\sigma}_{2/R0,A} = m_2 \cdot \vec{A}\vec{G}_2 \wedge V_{A \in 2/R0} + I_A(2) \cdot \vec{\Omega}_{R2/R0} = \vec{0} \quad (.18)$$

Le même calcul s'applique à $\vec{\delta}_{3/R0,A}$ et $\vec{\delta}_{4/R0,A}$.

2. En isolant le solide {5}

Les actions mécaniques se résument aux torseurs statiques suivants :

$$\{T_{1/5}\}_O = \begin{Bmatrix} X_{1/5} & L_{1/5} \\ Y_{1/5} & M_{1/5} \\ Z_{1/5} & 0 \end{Bmatrix}_{R5,O} \quad \text{liaison pivot d'axe } \vec{z} \text{ en O} \quad (.19)$$

$$\{T_{4/5}\}_D = \begin{Bmatrix} X_{4/5} & L_{4/5} \\ 0 & M_{4/5} \\ Z_{4/5} & 0 \end{Bmatrix}_{R3,D} \quad \text{liaison pivot d'axe } \vec{z} \text{ en D} \quad (.20)$$

$$\{T_{pes/5}\}_G = \begin{Bmatrix} -m_5 \cdot g \cdot \sin(\beta) & 0 \\ -m_5 \cdot g \cdot \cos(\beta) & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{R3,G} \quad \text{pesanteur sur 5} \quad (.21)$$

$$\{T_{ext/5}\}_F = \begin{Bmatrix} -R_{ext} \cdot g \cdot \sin(\beta) & 0 \\ -R_{ext} \cdot g \cdot \cos(\beta) & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{R3,F} \quad \text{force extérieure verticale exercée sur 5 au point F} \quad (.22)$$

On exprime l'ensemble des moments en O, projeté sur \vec{z} :

$$\vec{M}_{4/5,O} \cdot \vec{z} = (\vec{M}_{4/5,D} + \vec{OD} \wedge \vec{R}_{4/5}) \cdot \vec{z} \quad (.23)$$

$$= OD \cdot X_{4/5} \cdot \sin(\beta - \alpha) \quad (.24)$$

• J. Calcul des équations décrivant l'actionneur irréversible

$$\vec{M}_{pes/5,O} \cdot \vec{z} = (\vec{M}_{pes/5,G} + \vec{OG} \wedge \vec{R}_{pes/5}) \cdot \vec{z} \quad (.25)$$

$$= -m_5 \cdot g \cdot OG \cdot \cos(\alpha) \quad (.26)$$

En appliquant le théorème du moment dynamique on obtient :

$$\vec{\delta}_{5/R0,O} \cdot \vec{z} = (\vec{M}_{1/5,O} + \vec{M}_{4/5,O} + \vec{M}_{pes/5,O}) \cdot \vec{z} \quad (.27)$$

$$= OD \cdot X_{4/5} \cdot \sin(\beta - \alpha) \cdot \vec{z} - m_5 \cdot g \cdot OG \cdot \cos(\alpha) \cdot \vec{z} + X_{1/5} \cdot \vec{x}_5 + Y_{1/5} \cdot \vec{y}_5 - R_{ext} \cdot OF \cdot \cos(\alpha) \quad (.28)$$

Calcul du moment dynamique suivant \vec{z} :

$$\vec{\delta}_{5/R0,O} \cdot \vec{z} = \left(\frac{d}{dt}(\vec{\sigma}_{5/R0,O}) - \vec{\sigma}_{5/R0,O} \cdot \frac{d}{dt}(\vec{z}) \right) \cdot \vec{z} \quad (.29)$$

$$= \left(\frac{d}{dt}(\vec{\sigma}_{5/R0,O}) - 0 \right) \cdot \vec{z} \quad (.30)$$

$$= C \cdot \ddot{\alpha} \quad (.31)$$

$$\vec{\sigma}_{5/R0,O} = I_O(2) \cdot \vec{\Omega}_{R5/R0} \quad (.32)$$

$$= \begin{bmatrix} A & -F & -E \\ -F & B & -D \\ -E & -D & C \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} \quad (.33)$$

$$= \begin{bmatrix} -E \cdot \dot{\alpha} \\ -D \cdot \dot{\alpha} \\ C \cdot \dot{\alpha} \end{bmatrix} \quad (.34)$$

On en déduit l'expression de $X_{4/5}$:

$$X_{4/5} = \frac{C \cdot \ddot{\alpha} - (m_5 \cdot g \cdot OG + R_{ext} \cdot OF) \cdot \cos(\alpha)}{OD \cdot \sin(\beta - \alpha)} \quad (.35)$$

3. En isolant le solide {4}

Les actions mécaniques se résument aux torseurs statiques suivants :

$$\{T_{5/4}\}_D = \begin{Bmatrix} X_{5/4} & L_{5/4} \\ 0 & M_{5/4} \\ Z_{5/4} & 0 \end{Bmatrix}_{R3,D} \quad \text{liaison pivot d'axe } \vec{z} \text{ en D} \quad (.36)$$

• J. Calcul des équations décrivant l'actionneur irréversible

$$\{T_{3/4}\}_C = \left\{ \begin{array}{cc} X_{3/4} & X_{3/4} \cdot P/(2\pi) \\ Y_{3/4} & M_{3/4} \\ Z_{3/4} & N_{3/4} \end{array} \right\}_{R3,C} \quad \text{liaison hélicoïdale d'axe } \vec{x}_3 \text{ en C} \quad (.37)$$

En appliquant le théorème de la résultante dynamique, on obtient l'expression :

$$m_4 \cdot \Gamma_{4/R0,G} = X_{5/4} + X_{3/4} = 0 \quad (.38)$$

$$X_{3/4} = X_{4/5} \quad (.39)$$

4. En isolant le solide {3}

Les actions mécaniques se résument aux torseurs statiques suivants :

$$\{T_{2/3}\}_B = \left\{ \begin{array}{cc} X_{2/3} & 0 \\ Y_{2/3} & M_{2/3} \\ Z_{2/3} & N_{2/3} \end{array} \right\}_{R3,B} \quad \text{liaison pivot d'axe } \vec{x}_3 \text{ en B} \quad (.40)$$

$$\{T_{4/3}\}_C = \left\{ \begin{array}{cc} X_{4/3} & X_{4/3} \cdot P/(2\pi) \\ Y_{4/3} & M_{4/3} \\ Z_{4/3} & N_{4/3} \end{array} \right\}_{R3,C} \quad \text{liaison hélicoïdale d'axe } \vec{x}_3 \text{ en C} \quad (.41)$$

$$\{T_{moteur/3}\}_B = \left\{ \begin{array}{cc} 0 & Cm \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{array} \right\}_{R3,B} \quad \text{couple moteur d'axe } \vec{x}_3 \text{ en B} \quad (.42)$$

On rapporte le moment de 2/3 au point C, en projection sur \vec{x}_3 :

$$\vec{M}_{2/3,C} \cdot \vec{x}_3 = \vec{M}_{2/3,B} + \vec{CB} \wedge \vec{R}_{2/3} = \vec{0} \quad (.43)$$

En appliquant le théorème du moment dynamique, nous obtenons l'expression du couple moteur Cm :

$$\delta_{3/R0,C} \cdot \vec{x}_3 = Cm + X_{3/4} \cdot \frac{P}{2\pi} = 0 \quad (.44)$$

$$Cm = \frac{P}{2\pi} \cdot \frac{(m_5 \cdot g \cdot OG + R_{ext} \cdot OF) \cdot \cos(\alpha) - C\ddot{\alpha}}{OD \cdot \sin(\beta - \alpha)} \quad (.45)$$

$$Cm = \frac{-p \cdot C_v}{2\pi \cdot OD \cdot \sin(\beta - \alpha)} \quad \text{avec } C_v \text{ couple de l'actionneur en O} \quad (.46)$$

J.2. Fermeture géométrique

L'équation de fermeture géométrique s'exprime de la manière suivante :

$$\vec{W}A + \vec{A}D + \vec{D}O + \vec{O}W = \vec{0} \quad (.47)$$

En projection sur \vec{x}_1 et sur \vec{y}_1 , on obtient l'expression de β :

$$-W + 0 + \lambda \cdot \cos(\beta) - OD \cdot \cos(\alpha) = 0 \quad (.48)$$

$$H + \lambda \cdot \sin(\beta) - OD \cdot \sin(\alpha) = 0 \quad (.49)$$

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{OD \cdot \sin(\alpha) - height}{OD \cdot \cos(\alpha) + width}\right) \quad (.50)$$

Partant du même principe, on peut aussi retrouver l'expression de la longueur $\vec{A}D$ et par conséquent la vitesse la position angulaire du moteur :

$$\vec{A}D = \vec{A}O + \vec{W}O + \vec{O}D \quad (.51)$$

$$\lambda \cdot \vec{x}_5 = -H \cdot \vec{y}_0 + W \cdot \vec{x}_0 + OD \cdot \vec{x}_5 \quad (.52)$$

$$\lambda \cdot \vec{x}_5 = -H \cdot \sin(\alpha) + W \cdot \cos(\alpha) + OD \quad (.53)$$

$$\lambda \cdot \vec{y}_5 = -H \cdot \cos(\alpha) - W \cdot \sin(\alpha) \quad (.54)$$

$$\lambda = \sqrt{height^2 + width^2 + OD^2 + 2 \cdot OD \cdot (width \cdot \cos(\alpha) - height \cdot \sin(\alpha))} \cdot \vec{x}_3 \quad (.55)$$

$$\theta = \vec{A}D \cdot 2\pi / P \quad (.56)$$

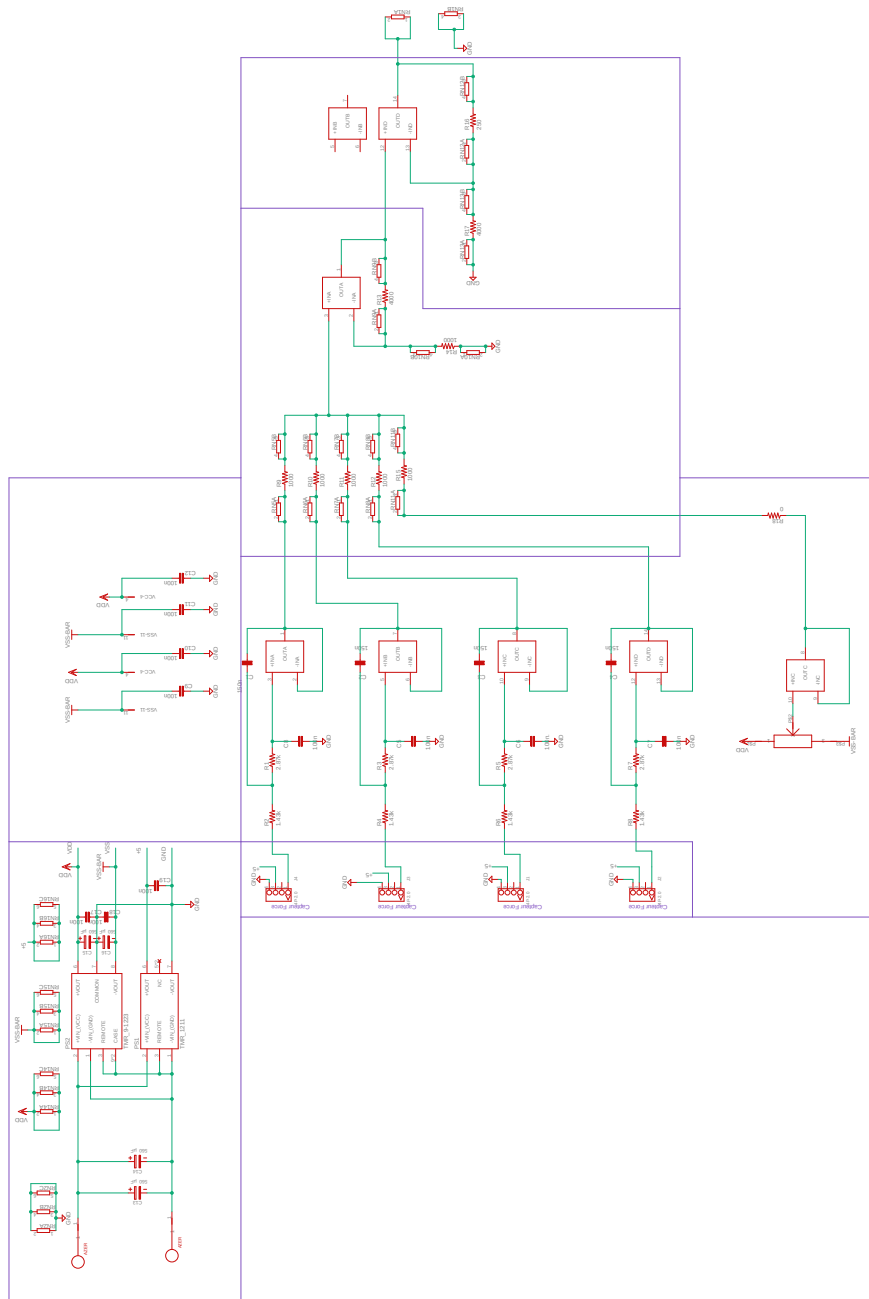
$$\theta = \frac{2\pi}{P} \sqrt{H^2 + W^2 + OD^2 + 2 \cdot OD \cdot (W \cdot \cos(\alpha) - H \cdot \sin(\alpha))} \cdot \vec{x}_3 \quad (.57)$$

$$(.58)$$

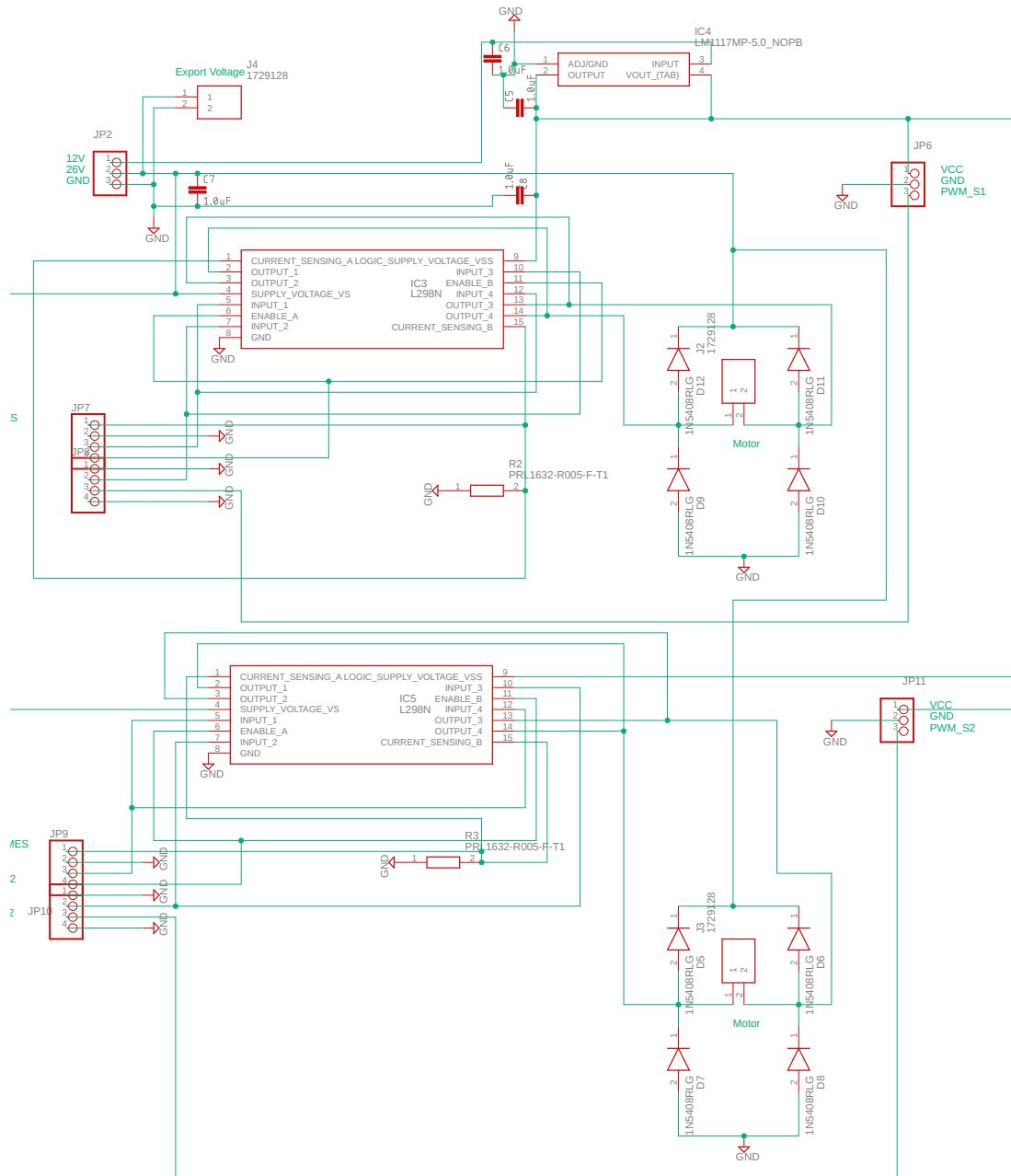
En dérivant la position angulaire du moteur, on trouve la vitesse de rotation :

$$\omega = \frac{2\pi}{P} \cdot \frac{\dot{\alpha} \cdot OD \cdot (W \cdot \sin(\alpha) + H \cdot \cos(\alpha))}{\sqrt{H^2 + W^2 + OD^2 + 2 \cdot OD \cdot (W \cdot \cos(\alpha) - H \cdot \sin(\alpha))}} \cdot \vec{x}_3 \quad (.59)$$

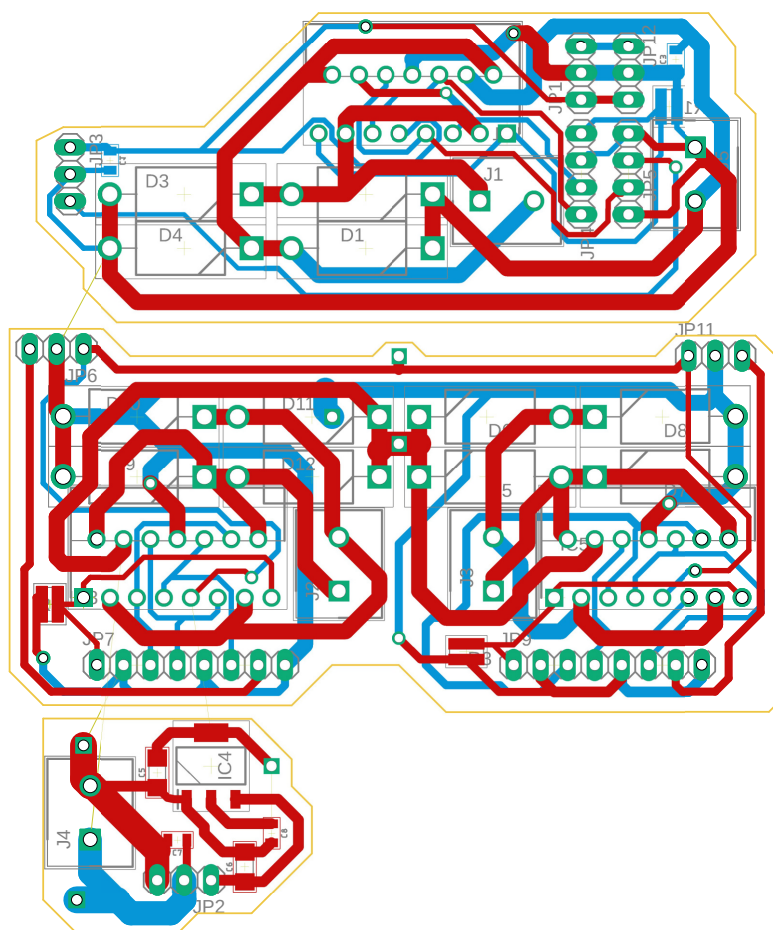
K. Circuit électronique de commande des moteurs



• K. Circuit électronique de commande des moteurs

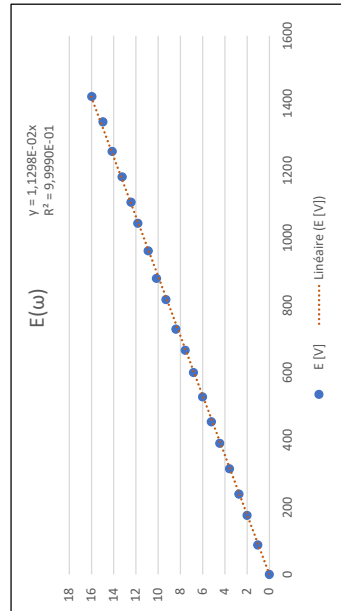


• K. Circuit électronique de commande des moteurs



- L. Mesure des caractéristiques internes du moteur RK-370CC

L. Mesure des caractéristiques internes du moteur RK-370CC



U [V]	E [V]	ω (tr/min)	ω [rad/s]
0	0	0	0
2	1,04	840	87,9645943
3,2	2,01	1680	175,929189
4	2,73	2280	238,761042
5	3,58	3000	314,159265
6,1	4,46	3720	389,557489
7	5,21	4330	453,43654
8	6,01	5040	527,787566
9	6,82	5730	600,044197
10	7,57	6360	666,017643
11	8,4	6960	728,849496
12	9,3	7800	816,81409
13	10,15	8400	879,645943
14	10,9	9180	961,327352
15	11,83	9960	1043,00876
16	12,45	10560	1105,84061
17	13,25	11280	1181,23884
18	14,15	12000	1256,63706
19	14,97	12840	1344,60166
20	15,97	13560	1419,99988

Données expérimentales

Méthode :
Deux moteurs identiques sont liés par leur axe de rotation. L'un est actionné par une tension constante U. La tension E produite par la force contre-électromotrice du second moteur.

Résultat :
La constante de couple, égale à la constante électromotrice $K_e=1.13e-2$, est déduite de la pente de la courbe $E(\omega)$. La résistance du moteur $R=20\Omega$, est mesurée grâce à un multimètre, en moyennant sur 10 positions du rotor. L'inductance $L=7.24mH$ est mesurée par un RLC-mètre.

M. Réponse temporelle du correcteur à avance de phase

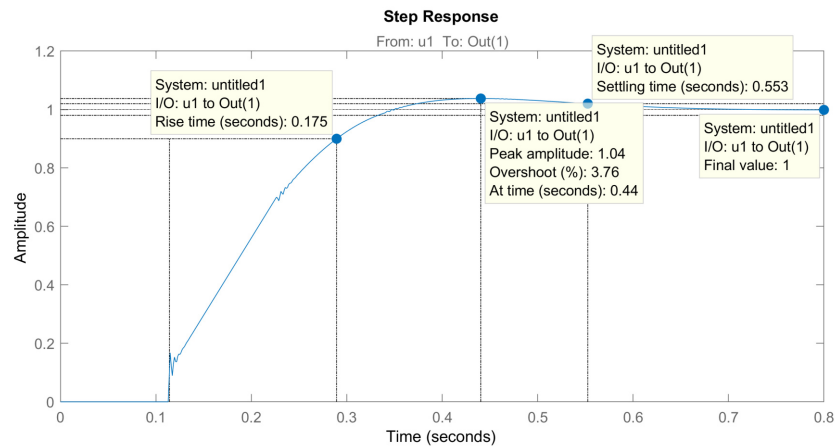


FIGURE 8. – Réponse indicielle du correcteur à avance de phase.

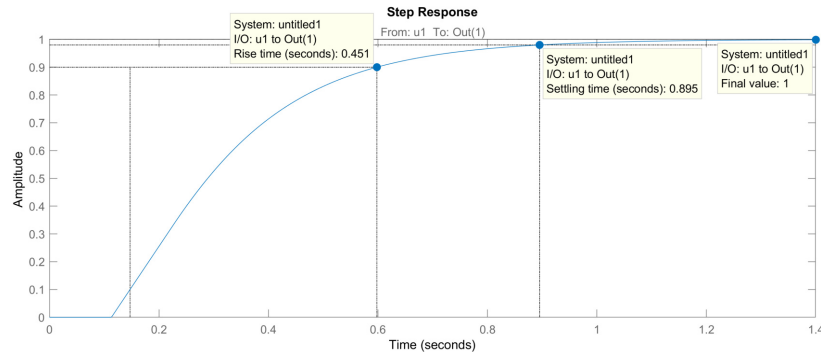


FIGURE 9. – Réponse indicielle du correcteur proportionnel (gain égal à 30).

• M. Réponse temporelle du correcteur à avance de phase

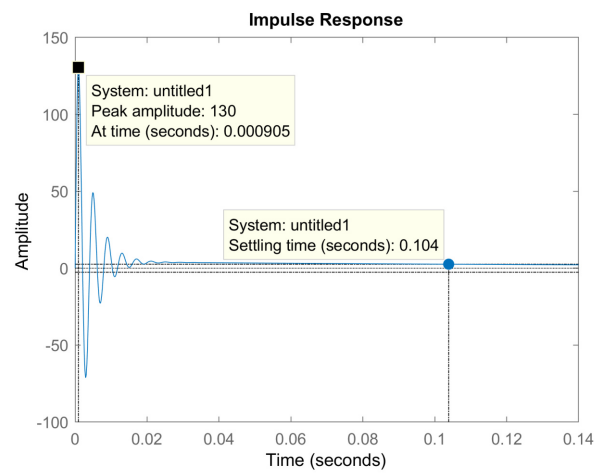


FIGURE 10. – Réponse impulsionnelle du correcteur à avance de phase.

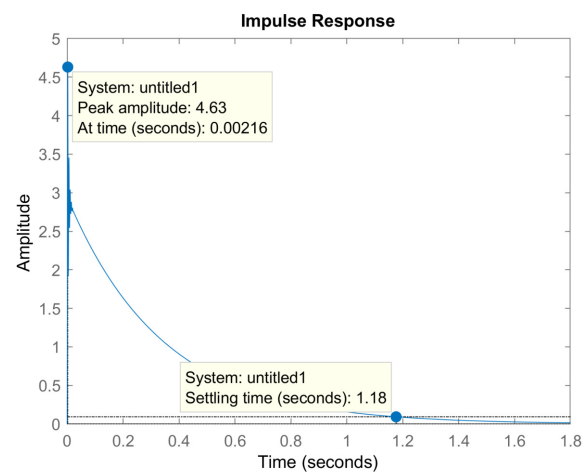


FIGURE 11. – Réponse impulsionnelle du correcteur proportionnel (gain égal à 30).

N. Programme d'un correcteur sous forme canonique

Extrait du programme du microcontrôleur STM32F411RE, illustrant l'implémentation d'un filtre sous forme canonique.

```

1  void LegUpdate(TIM_HandleTypeDef *htim)
2  {
3      #ifdef DEBUG_TECH
4      uint32_t tic = HAL_GetTick();
5      #endif
6
7      if(__HAL_TIM_GET_FLAG(Leg.htim,TIM_FLAG_UPDATE) != RESET) {
8
9          double ctrl=0;
10         //AS5145_update(1);
11         for(int i=0; i<3;i++)
12         {
13             if(Leg.joints[i]->ENABLE == 1) {
14
15                 jointPreUpdate(Leg.joints[i]);
16
17                 Leg.w[i][0] = (Leg.joints[i]->TARGET* ANGLE_SENSIVITY_RAD)-
18                 (Leg.joints[i]->ANGLE*ANGLE_SENSIVITY_RAD);
19                 Leg.joints[i]->ERR = Leg.w[i][0];
20
21                 for(int k=1;k<=FILTER_NB;k++) {
22                     Leg.w[i][0] -= Leg.a[i][k] * Leg.w[i][k];
23                 }
24                 for(int k=0;k<=FILTER_NA;k++) {
25                     ctrl += Leg.b[i][k] * Leg.w[i][k];
26                 }
27                 for(int k=FILTER_N;k>=1;k--) {
28                     Leg.w[i][k] = Leg.w[i][k-1];
29                 }
30                 Leg.joints[i]->CMD = (int)(ctrl*VOLT_TO_PWM);
31
32                 if(Leg.joints[i]->CMD>PWM_PERIOD) {
33                     Leg.joints[i]->CMD = PWM_PERIOD;
34                 }
35                 else if(Leg.joints[i]->CMD<-PWM_PERIOD) {
36                     Leg.joints[i]->CMD = -PWM_PERIOD;
37                 }
38
39                 jointPostUpdate(Leg.joints[i]);
40             }
41         }
42     }
43 }

```

FIGURE 12. – Le programme fourni est extrait du code de commande disponible sur GitHub <https://github.com/IlyaBrod/Pohod15>. $FILTER_{NA}$: nombre de coefficients au numérateur. $FILTER_{NB}$: nombre de coefficients au dénominateur. $FILTER_N$: ordre du filtre.

O. Vues additionnelles du banc de test *MiMiC-Ant*

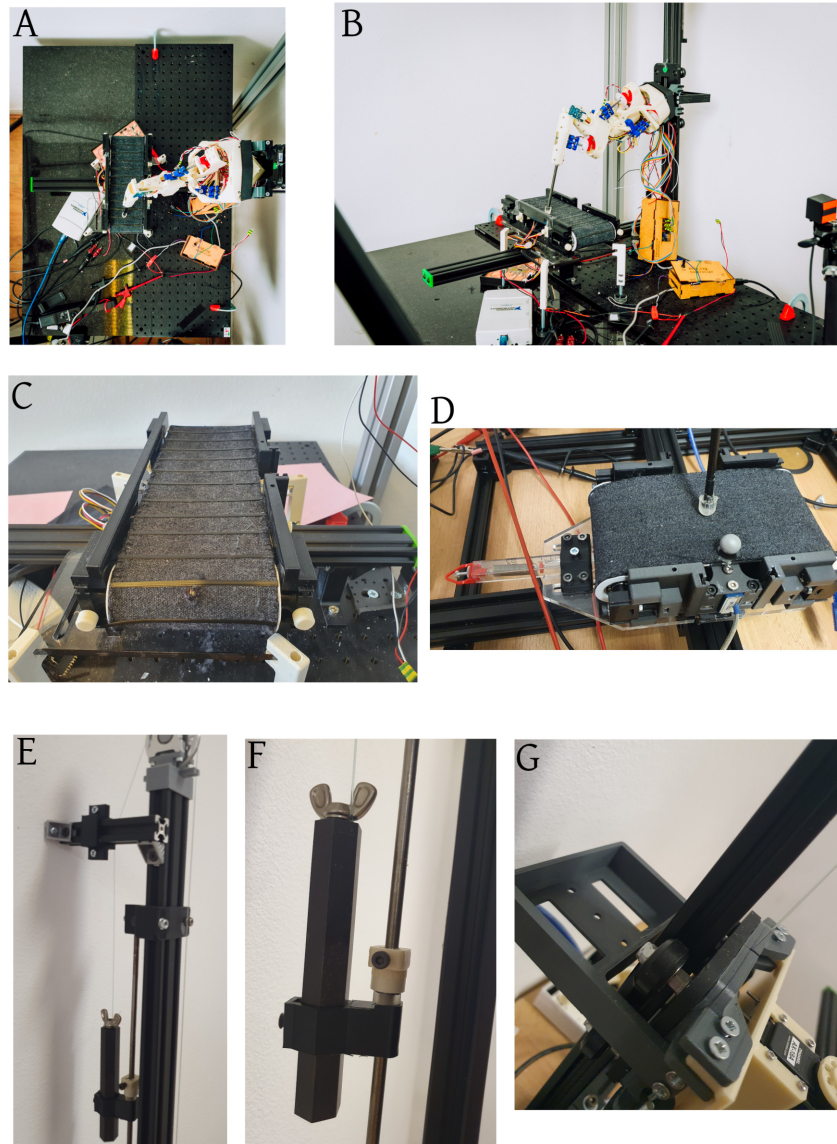


FIGURE 13. – (A-B) Photographie de la patte *Pohod15Leg* installée sur le banc de test. ©Cyril FRESILLON, ISM, CNRS Photothèque. (C) Tapis roulant. (D) Tapis roulant contraint par un ressort, situé à gauche (en rouge). Le marqueur 3d, permet de mesurer le déplacement du tapis. (E-F) Mécanisme de contrepoids et de frein. (G) Support de charge additionnelle.

P. Diagramme de classes de *MiMiC-Ant*

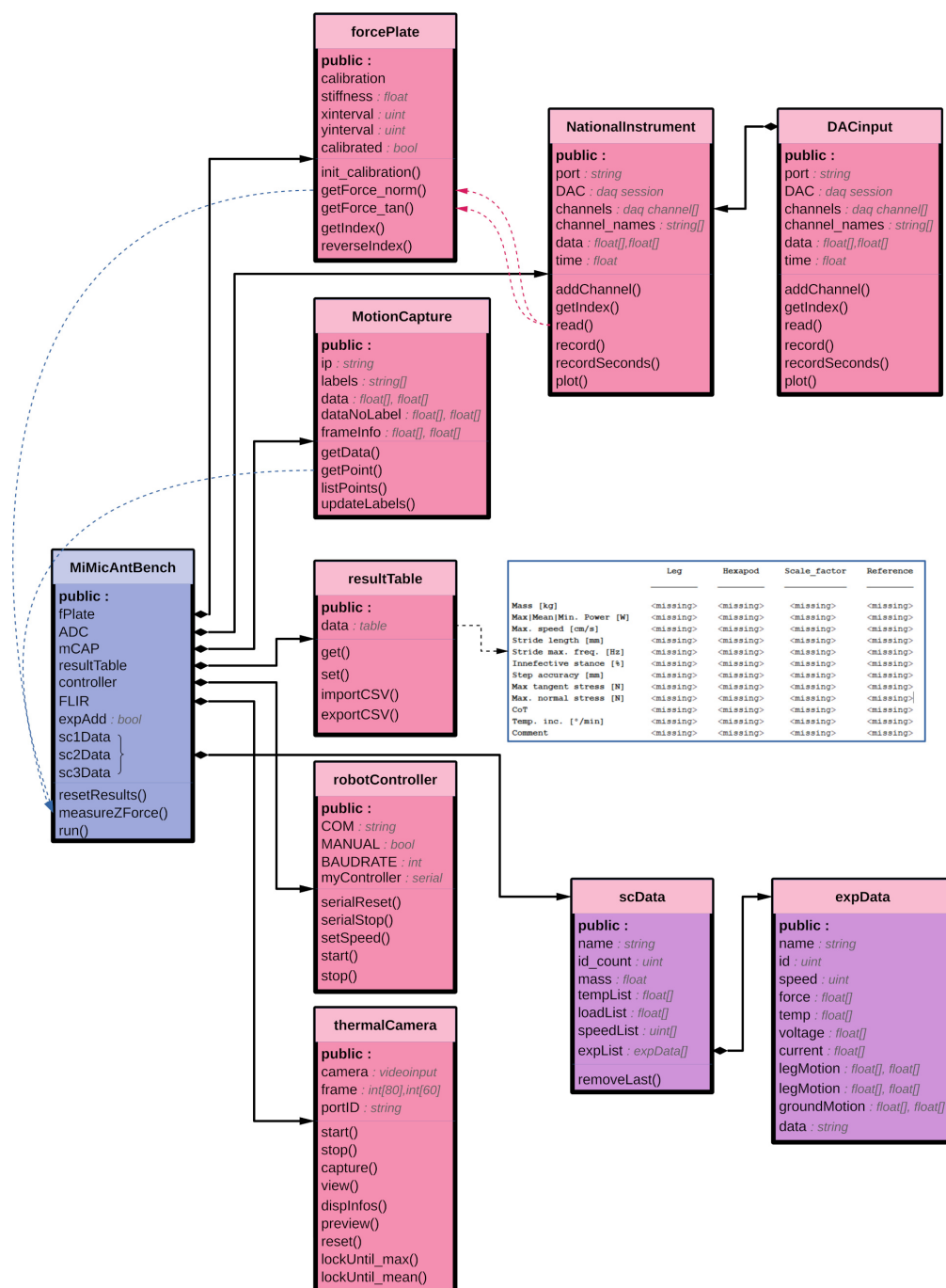


FIGURE 14. – Diagramme de classes du programme principal du banc de test

Q. Exemple de calcul de la fonction $L(t)$

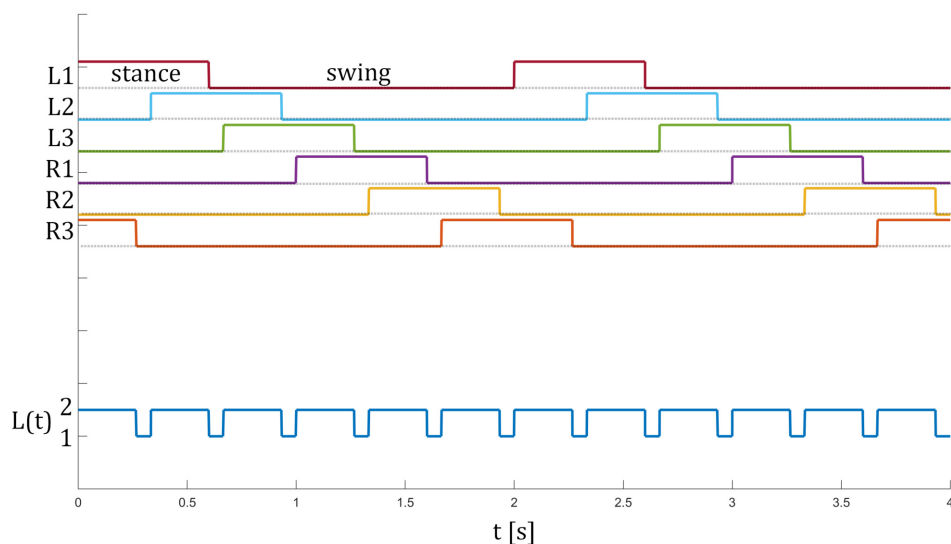


FIGURE 15. – Exemple de calcul de la fonction $L(t)$, pour un patron *wave* et un rapport cyclique de 0,3

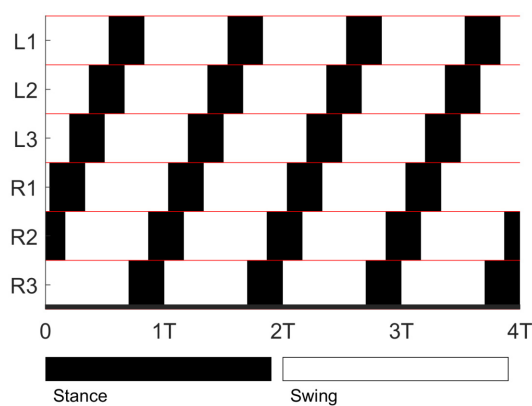


FIGURE 16. – Schéma du patron de marche *wave* avec un rapport cyclique de 0,3

R. Résultat des mesures sur la patte AXLeg et Pohod15Leg

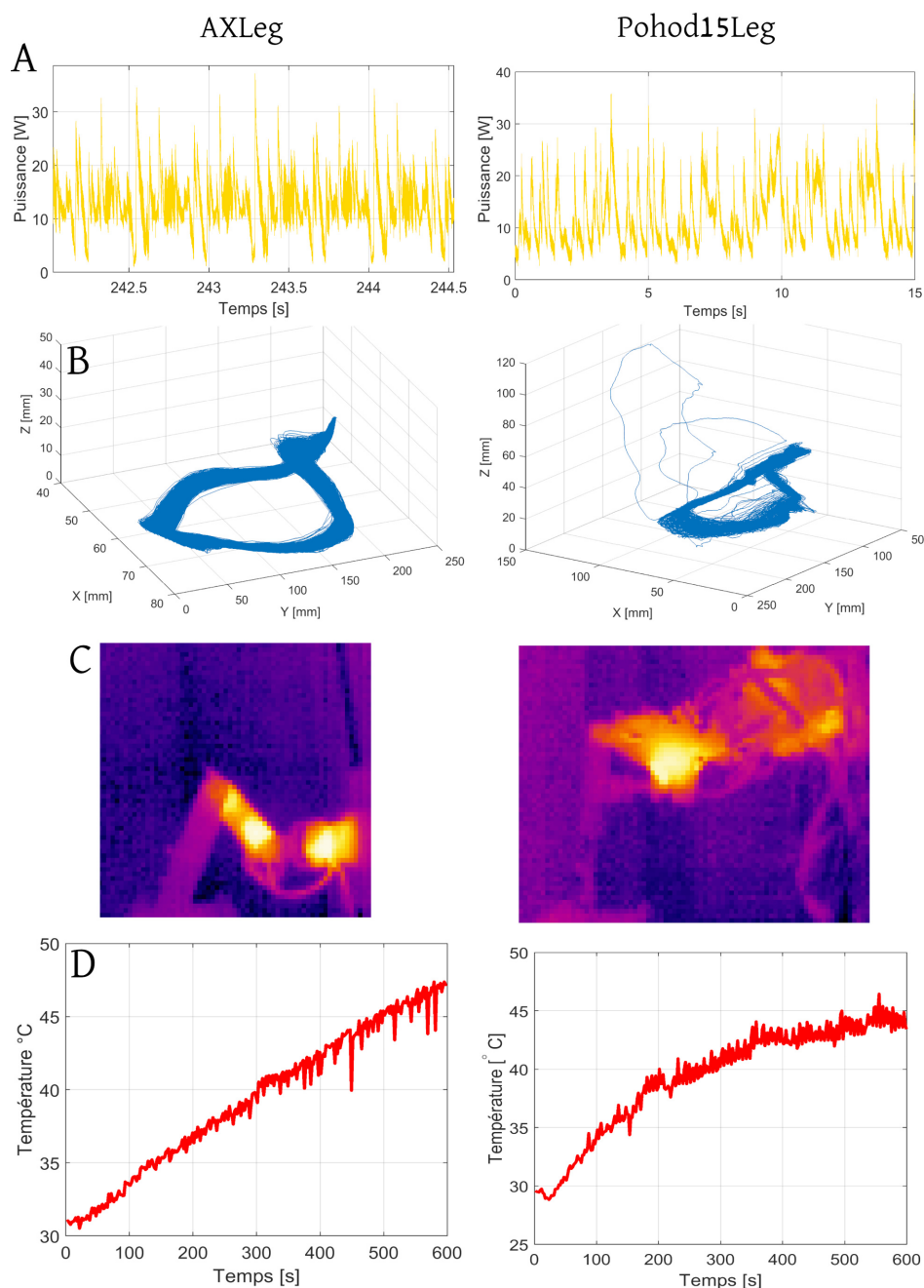


FIGURE 17. – Résultat des mesures sur la patte AXLeg, se déplaçant à 2.5 Hz et Pohod15Leg, se déplaçant à 0,35 Hz. (A) Mesure de la puissance consommée. (B) Trajectoire du bout de patte. (C) Image thermique après 10 min de marche. Les régions claires représentent les températures les plus élevées. (D) Évolution de la température au cours d'une marche de 10 min.

S. Calcul de la force de réaction du support

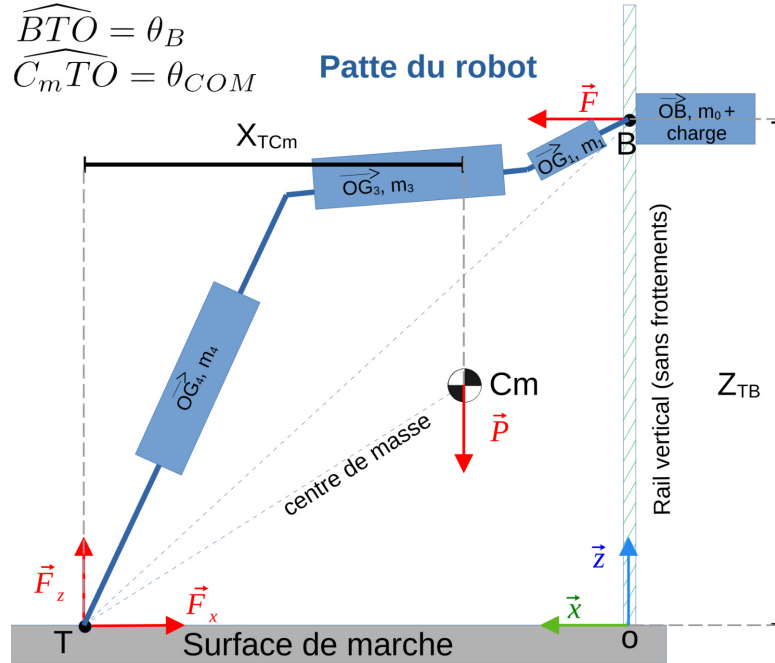


FIGURE 18. – Modèle simplifié d'une patte à trois degrés de liberté fixée à un rail vertical. Chaque segment i possède une masse m_i et un centre de masse \vec{OG}_i . \vec{F}_z et \vec{F}_x , sont les forces de réaction du support normale et tangentielle, respectivement.

Afin d'évaluer la puissance mécanique de sortie d'un robot hexapode, il est nécessaire de calculer les forces de réaction du support. Dans le cas, où le robot marche à une vitesse constante sur un tapis roulant, uniquement deux composantes nous intéressent : la composante normale \vec{F}_z et la composante tangentielle \vec{F}_x .

Le modèle de la patte utilisée est défini suivant Tab. 1.

Articulation i	Type	Longueur [mm]	Masse [g]	Centre de masse O_iG_i [m]	Matrice d'inertie au point du centre de masse [kg.m ²]
0 – thorax (pas de charge)	-	-	148	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	-
1 – coxa-trochanter	Pivot	53	15	$\begin{bmatrix} -0.0265 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 5.8935e-06 & 3.2000e-10 & 0 \\ 3.2000e-10 & 5.0617e-05 & 0 \\ 0 & 0 & 4.6509e-05 \end{bmatrix}$
2 – fémur	Pivot	83	112	$\begin{bmatrix} -0.0406 \\ 0 \\ -0.0010 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3.2764e-05 & 1.6000e-09 & -1.8525e-05 \\ 1.6000e-09 & 8.4231e-04 & 2.7390e-07 \\ -1.8525e-05 & 2.7390e-07 & 8.5125e-04 \end{bmatrix}$
3 – tibia	Pivot	146	39	$\begin{bmatrix} -0.0747 \\ 0 \\ 0.0041 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.6836e-05 & 1.4000e-10 & 0 \\ 1.4000e-10 & 9.5062e-05 & 0 \\ 0 & 0 & 8.4081e-05 \end{bmatrix}$

TABLEAU 1. – Tableau des caractéristiques de la patte AXLeg.

• S. Calcul de la force de réaction du support

La position du centre de masse de la patte entière doit être calculée à chaque instant suivant l'Eq. .60 :

$$\frac{1}{\sum_{i=0}^{i=3} m_i} \cdot \sum_{i=0}^{i=3} m_i \cdot {}^0T_i \cdot O\vec{G}_i \quad (.60)$$

Avec 0T_i la matrice de transformation entre le repère de l'articulation i et le repère d'origine $(B, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$.

En écrivant les équations d'équilibre statique dans le cas de non glissement, on obtient :

Équilibre des quantités de mouvement :

$$\sum_i \vec{F}_i = \vec{0} \quad (.61)$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \text{sur } \vec{x}: & F = F_x \\ \text{sur } \vec{z}: & F_z = P = (m_{patte} + m_{charge}) \cdot g \end{cases} \quad (.62)$$

Équilibre des moments statiques :

$$\sum_i \vec{M}_i = \vec{0} \quad (.63)$$

$$T\vec{C}_m \wedge \vec{P} + T\vec{B} \wedge \vec{F} = \vec{0} \quad (.64)$$

En projection sur \vec{y} :

$$X_{TC_m} \cdot P = Z_{TB} \cdot F_x \quad (.65)$$

Cette équation peut aussi être reformulée en fonction des angles définis Fig. 18 :

$$F_x = P \cdot \frac{\cos(\theta_{COM})}{\sin(\theta_B)} \quad (.66)$$

Une fois le vecteur des forces de réaction du support définis $[F_x \ 0 \ F_z]$ dans le repère d'origine, il est nécessaire de l'exprimer dans le repère de l'articulation du tibia. Pour cela, nous utilisons la matrice de rotation (extraite du modèle cinématique direct de la patte) :

$$F_{support} = {}^3R_1 \cdot [F_x \ 0 \ F_z]^T \quad (.67)$$

T. Algorithme de calcul des puissances du robot hexapode

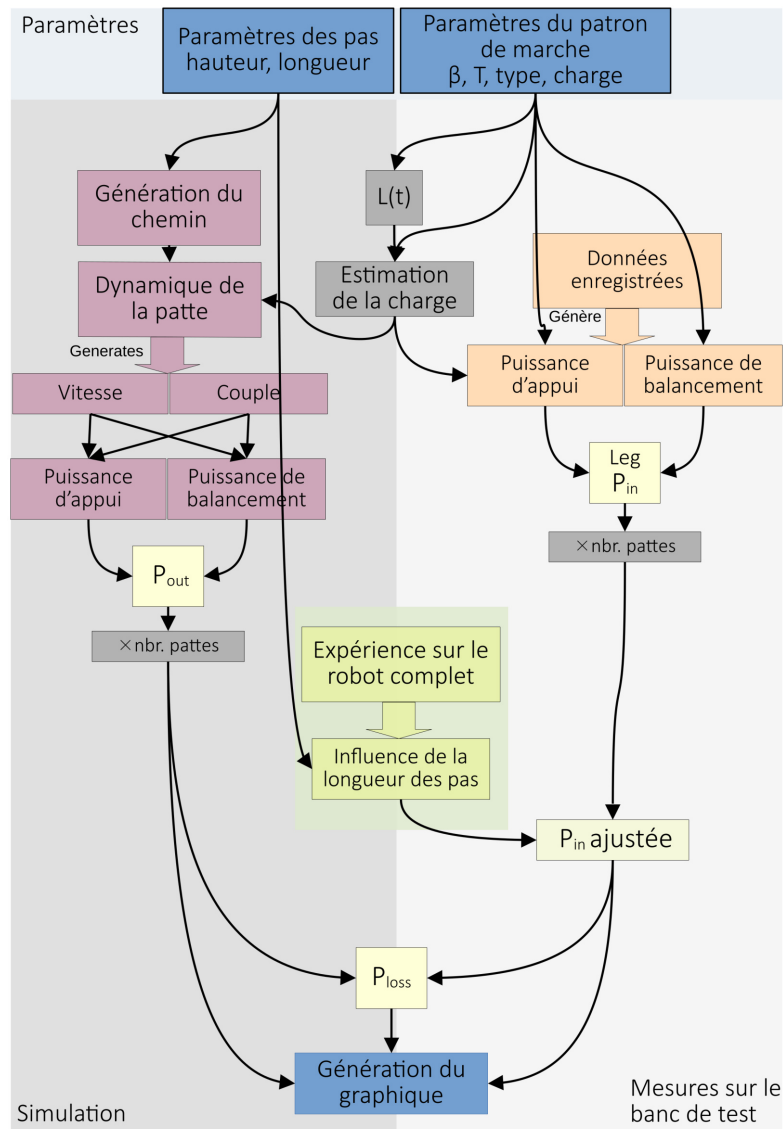
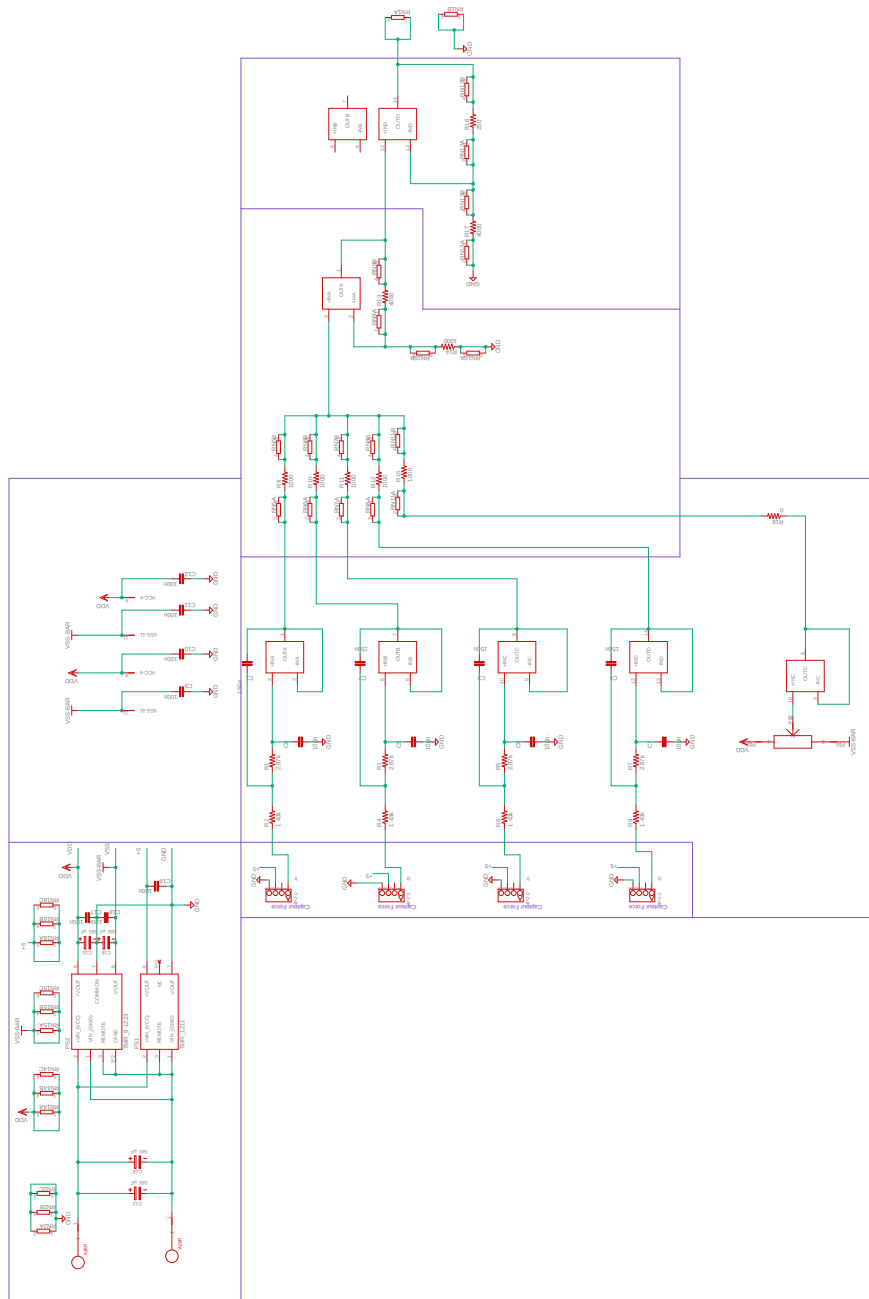
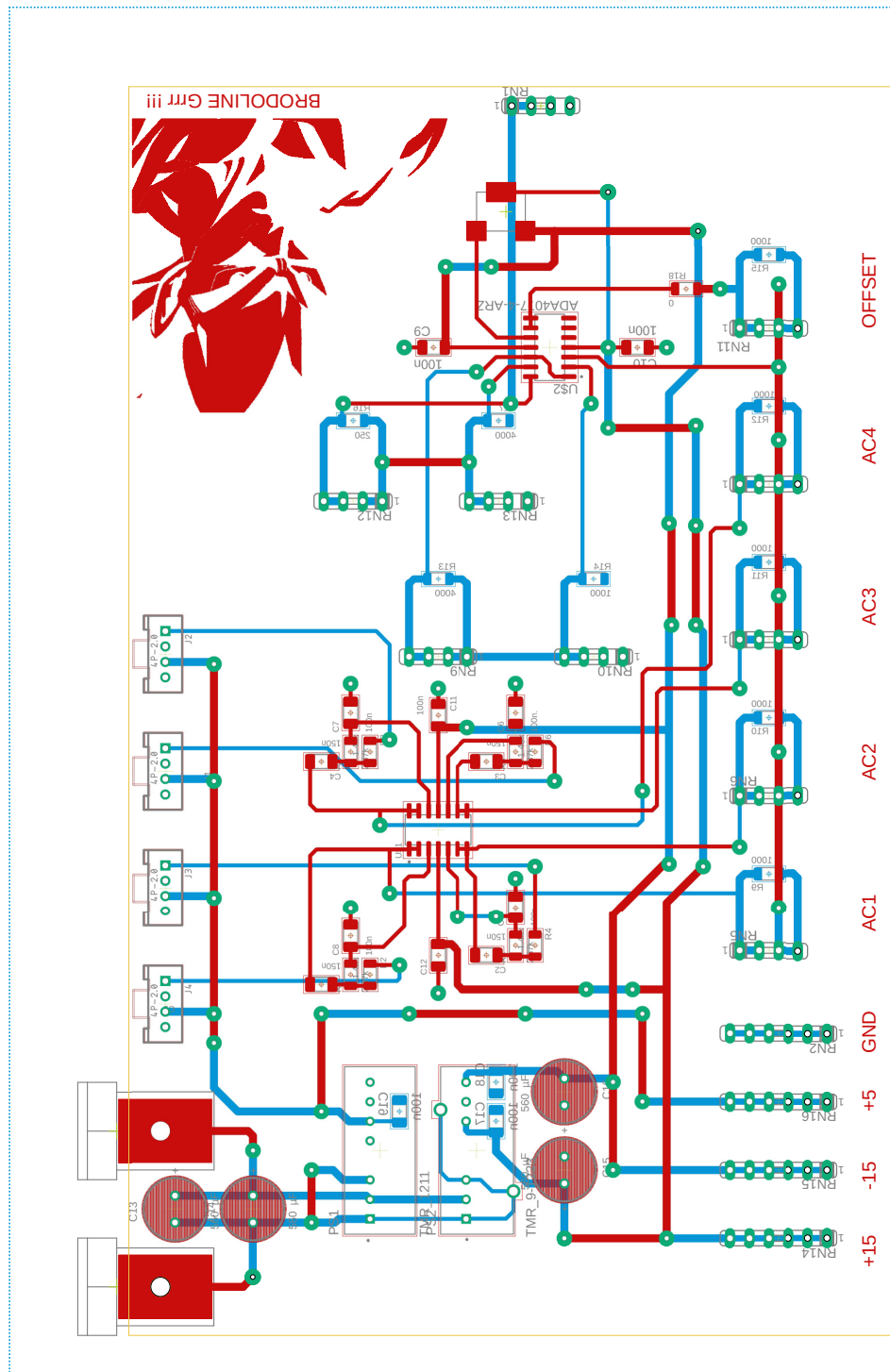


FIGURE 19. – Algorithme d'estimation des puissances du robot hexapode. P_{out} est la puissance mécanique produite, P_{in} est la puissance électrique consommée, P_{loss} est la puissance perdue, $L(t)$ est le nombre de pattes en contact avec le sol à l'instant t , β est le rapport cyclique, T est la période d'un cycle de marche.

U. Circuit électronique d'amplification des capteurs de force du banc



• U. Circuit électronique d'amplification des capteurs de force du banc



• U. Circuit électronique d'amplification des capteurs de force du banc

Partlist PCB force sensor

Exported from SCF.sch at 10/05/2023 13:35

EAGLE Version 9.6.2 Copyright (c) 1988-2020 Autodesk, Inc.

Assembly variant:

Part	Value	Device	Package	Library	Sheet
C1	150n	GRM31CR60J107ME39L	CAP_1206	Resistor_Capacitor	1
C2	150n	GRM31CR60J107ME39L	CAP_1206	Resistor_Capacitor	1
C3	150n	GRM31CR60J107ME39L	CAP_1206	Resistor_Capacitor	1
C4	150n	GRM31CR60J107ME39L	CAP_1206	Resistor_Capacitor	1
C5	100n	GRM31CR60J107ME39L	CAP_1206	Resistor_Capacitor	1
C6	100n	GRM31CR60J107ME39L	CAP_1206	Resistor_Capacitor	1
C7	100n	GRM31CR60J107ME39L	CAP_1206	Resistor_Capacitor	1
C8	100n	GRM31CR60J107ME39L	CAP_1206	Resistor_Capacitor	1
C9	100n	GRM31CR60J107ME39L	CAP_1206	Resistor_Capacitor	1
C10	100n	GRM31CR60J107ME39L	CAP_1206	Resistor_Capacitor	1
C11	100n	GRM31CR60J107ME39L	CAP_1206	Resistor_Capacitor	1
C12	100n	GRM31CR60J107ME39L	CAP_1206	Resistor_Capacitor	1
C13	560 µF	WCAP-ATG5_8X11.5_860020274012	WCAP-ATG5_8X11.5(DXL)	Würth_Capacitors_WCAP-ATG5	1
C14	560 µF	WCAP-ATG5_8X11.5_860020274012	WCAP-ATG5_8X11.5(DXL)	Würth_Capacitors_WCAP-ATG5	1
C15	560 µF	WCAP-ATG5_8X11.5_860020274012	WCAP-ATG5_8X11.5(DXL)	Würth_Capacitors_WCAP-ATG5	1
C16	560 µF	WCAP-ATG5_8X11.5_860020274012	WCAP-ATG5_8X11.5(DXL)	Würth_Capacitors_WCAP-ATG5	1
C17	100n	GRM31CR60J107ME39L	CAP_1206	Resistor_Capacitor	1
C18	100n	GRM31CR60J107ME39L	CAP_1206	Resistor_Capacitor	1
C19	100n	GRM31CR60J107ME39L	CAP_1206	Resistor_Capacitor	1
J1	4P-2.0	GROVE-CONNECTOR-DIP(4P-2.0)	HW4-2.0	OPL_Connector	1
J2	4P-2.0	GROVE-CONNECTOR-DIP(4P-2.0)	HW4-2.0	OPL_Connector	1
J3	4P-2.0	GROVE-CONNECTOR-DIP(4P-2.0)	HW4-2.0	OPL_Connector	1
J4	4P-2.0	GROVE-CONNECTOR-DIP(4P-2.0)	HW4-2.0	OPL_Connector	1
PS1	TMR_1211	TMR_1211	CONV_TMR_1211	TMR_1211	1
PS2	TMR_9-1223	TMR_9-1223	CONV_TMR_9-1223	TMR_9-1223	1
R1	2.87k	ERJ-8GEY0R00V	RES_1206	Resistor_Capacitor	1
R2	1.43k	ERJ-8GEY0R00V	RES_1206	Resistor_Capacitor	1
R3	2.87k	ERJ-8GEY0R00V	RES_1206	Resistor_Capacitor	1
R4	1.43k	ERJ-8GEY0R00V	RES_1206	Resistor_Capacitor	1
R5	2.87k	ERJ-8GEY0R00V	RES_1206	Resistor_Capacitor	1
R6	1.43k	ERJ-8GEY0R00V	RES_1206	Resistor_Capacitor	1
R7	2.87k	ERJ-8GEY0R00V	RES_1206	Resistor_Capacitor	1
R8	1.43k	ERJ-8GEY0R00V	RES_1206	Resistor_Capacitor	1
R9	1000	ERJ-8GEY0R00V	RES_1206	Resistor_Capacitor	1
R10	1000	ERJ-8GEY0R00V	RES_1206	Resistor_Capacitor	1
R11	1000	ERJ-8GEY0R00V	RES_1206	Resistor_Capacitor	1
R12	1000	ERJ-8GEY0R00V	RES_1206	Resistor_Capacitor	1
R13	4000	ERJ-8GEY0R00V	RES_1206	Resistor_Capacitor	1
R14	1000	ERJ-8GEY0R00V	RES_1206	Resistor_Capacitor	1
R15	1000	ERJ-8GEY0R00V	RES_1206	Resistor_Capacitor	1
R16	250	ERJ-8GEY0R00V	RES_1206	Resistor_Capacitor	1
R17	4000	ERJ-8GEY0R00V	RES_1206	Resistor_Capacitor	1
R18	0	ERJ-8GEY0R00V	RES_1206	Resistor_Capacitor	1
RN1	E2R	SIL4	resistor-sil	1	
RN2	E3R	SIL6	resistor-sil	1	
RN5	E2R	SIL4	resistor-sil	1	
RN6	E2R	SIL4	resistor-sil	1	
RN7	E2R	SIL4	resistor-sil	1	
RN8	E2R	SIL4	resistor-sil	1	
RN9	E2R	SIL4	resistor-sil	1	
RN10	E2R	SIL4	resistor-sil	1	
RN11	E2R	SIL4	resistor-sil	1	
RN12	E2R	SIL4	resistor-sil	1	
RN13	E2R	SIL4	resistor-sil	1	
RN14	E3R	SIL6	resistor-sil	1	
RN15	E3R	SIL6	resistor-sil	1	
		RN16	E3R	SIL6	resistor-sil 1
U\$1	ADA4077-4-ARZ	ADA4077-4-ARZ	ADA4077-4-ARC-SOIC	ada4077-4-arz bis	1
U\$2	ADA4077-4-ARZ	ADA4077-4-ARZ	ADA4077-4-ARC-SOIC	ada4077-4-arz bis	1
U\$3	POTENTIOMETRE	POTENTIOMETRE	POTENTIOMETRE	potentiometre	1
U\$4	BANANE	BANANE	BANANE	banane	1
U\$5	BANANE	BANANE	BANANE	banane	1

V. Calibration du capteur de force

La calibration de la surface d'impact du tapis roulant est réalisée grâce à la mesure du signal des capteurs de force sous différentes masses connues. Nous avons calibré la surface avec cinq masses : 0 g, 105 g, 493 g, 992 g et 1974 g.

Tout d'abord la surface de calibration est segmentée en plusieurs sections. Dans notre cas, nous avons choisi une résolution de calibration de 5 par 10, ce qui revient à des sections d'environ 1x1 cm. Puis, masse par masse, on parcourt la surface du tapis roulant (Fig. 20A). L'interface graphique du logiciel de calibration permet d'identifier les régions pas encore calibrées (Fig. 20B-C).

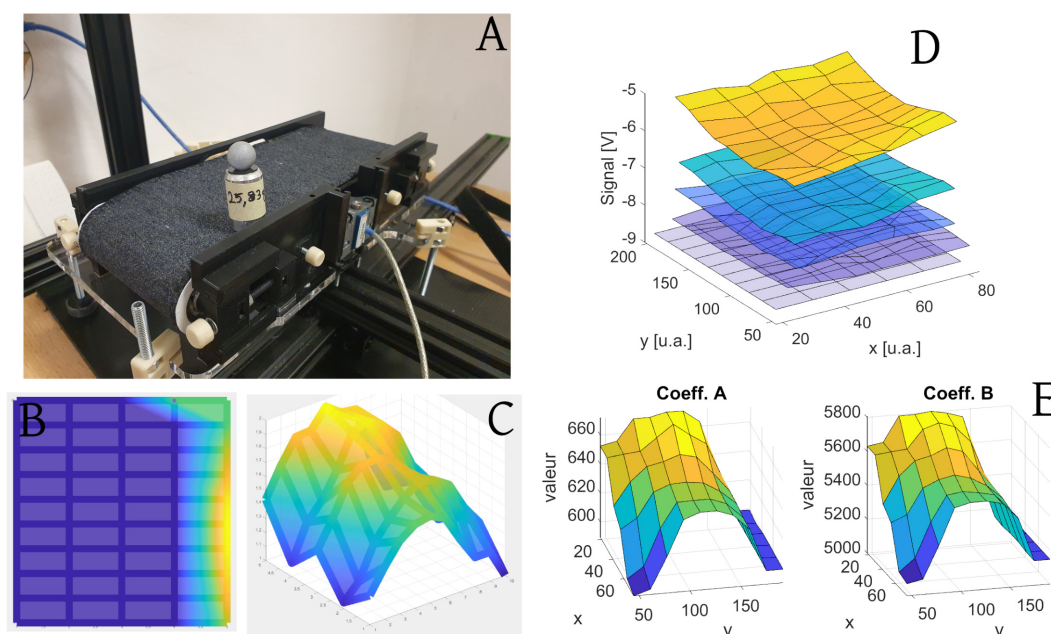


FIGURE 20. – (A) Masse posée sur le banc de test pour effectuer la calibration. (B) Fenêtre du logiciel, indiquant la zone calibrée. (C) Surface correspondante à la calibration du banc pour une masse donnée. (D) Indicateurs de la qualité de la calibration.

Une fois que la valeur du signal des capteurs a été mesurée pour l'ensemble de la surface du tapis (Fig. 20D) et pour chaque masse, une régression linéaire est réalisée. Plus particulièrement, pour chaque section de la surface calibrée, on utilise la valeur de masse et du voltage mesuré pour estimer les coefficients d'une fonction affine. On a donc un coefficients a (la pente de la courbe) et b (le décalage sur l'axe des ordonnées). Ensuite, on réalise deux ajustement de surface (pour les coefficients a et b), en les associant à la position spatiale de chaque section (Fig. 20E). Nous obtenons une première fonction capable de prédire le coefficient a et une seconde le coefficient b , pour une position sur le tapis donnée. En regroupant ces deux fonctions, on peut estimer la masse posée sur le tapis roulant, connaissant sa position via le système de capture de mouvement.