



HAL
open science

Robot humanoïde bioinspiré: Conception et expérimentation

Morgan Langard

► **To cite this version:**

Morgan Langard. Robot humanoïde bioinspiré: Conception et expérimentation. Autre. Université d'Angers, 2023. Français. NNT: 2023ANGE0079 . tel-04612753

HAL Id: tel-04612753

<https://theses.hal.science/tel-04612753v1>

Submitted on 14 Jun 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITÉ D'ANGERS

ÉCOLE DOCTORALE N° 641
*Mathématiques et Sciences et Technologies
de l'Information et de la Communication*
Spécialité : *Automatique, productique et robotique*

Par

Morgan LANGARD

« Robot humanoïde bioinspiré - Conception et expérimentation »

Thèse présentée et soutenue à « Polytech Angers », le « 18/12/2023 »

Unité de recherche : Laboratoire Angevin de Recherche en Ingénierie des Systèmes (LARIS)

Rapporteurs avant soutenance :

Olivier STASSE Directeur de recherche CNRS - LAAS Toulouse
Jean-Pierre GAZEAU Ingénieur recherche CNRS HDR - Institut Pprime Poitiers

Composition du Jury :

Attention, en cas d'absence d'un des membres du Jury le jour de la soutenance, la composition du jury doit être revue pour s'assurer qu'elle est conforme et devra être répercutée sur la couverture de thèse

Président :	Christine CHEVALLEREAU	Directrice de recherche CNRS - LS2N Nantes
Examineurs :	Pauline MAURICE	Chargée de recherche CNRS - LORIA Nancy
	Vincent PADOIS	Directeur de recherche INRIA - INRIA Bordeaux
Dir. de thèse :	Nicolas DELANOUE	Maître de conférences HDR - LARIS Polytech Angers
Co-dir. de thèse :	Philippe LUCIDARME	Maître de conférences - LARIS IUT Angers
	Rémy GUYONNEAU	Maître de conférences - LARIS Polytech Angers

HOMMAGE À NICOLAS DELANOUE

Ce manuscrit de thèse est dédié à Nicolas Delanoue, que j'ai eu l'honneur d'avoir comme directeur de thèse, et qui nous a quitté prématurément. Tout au long de ce doctorat, Nicolas m'a épaulé et aidé à m'intégrer à l'équipe et au laboratoire. Il s'est toujours montré disponible pour répondre à mes questions, et souriant lors de nos discussions.

Nicolas faisait preuve d'un optimisme à toute épreuve et valorisait chaque avancée, même minime. Il faisait également preuve d'une réactivité sans pareil, surtout lors de mes (trop nombreux) déboires administratifs. Nicolas était un chercheur ambitieux et une âme formidable, et son départ a été (et est toujours) un choc. Il était impliqué à tous les niveaux, que cela soit dans ses enseignements, dans ses recherches ou encore dans l'école doctorale. Le comparer à une pile électrique serait dévalorisant, car Nicolas était tout simplement inépuisable. Il m'a montré ce qu'étaient à la fois un grand chercheur et une grande personne. Nicolas est et restera un exemple à suivre, prouvant que tout est possible dès lors que nous faisons preuve de détermination.

Encore merci pour tout Nicolas.

REMERCIEMENTS

Cette thèse s'est déroulée de septembre 2019 jusqu'à septembre 2022. Durant cette période, des rencontres ainsi que certains évènements ont pu influencer cette thèse pour le meilleur comme pour le pire. J'aimerais donc remercier comme il se doit tout ce beau monde.

Tout d'abord, je tiens à remercier toutes les personnes m'ayant aidées ou soutenues durant la réalisation de cette thèse.

Je remercie le laboratoire du LARIS, ainsi que l'équipe ROBIBIO de m'avoir accueilli et offert l'opportunité d'effectuer cette thèse dans un domaine que j'adore. Plus précisément, je remercie mon codirecteur de thèse Philippe Lucidarme. Que cela soit durant le développement du simulateur ou de l'algorithme d'optimisation, il a toujours été présent et disponible pour répondre à mes questions avec le sourire. Je garderai particulièrement en mémoire la mise en place du cluster de calcul et le paramétrage de ces 16 ordinateurs. Que cela soit l'installation des systèmes d'exploitation et de matlab ou le câblage sur le réseau, c'était intéressant et amusant dans une période de confinement morose.

Je voudrais aussi citer Franck Mercier et Rémy Guyonneau, avec qui ce fut un plaisir de travailler pour comparer nos résultats. Franck a notamment été très présent afin de répondre à mes questions sur le code existant lors du début de la thèse, et lors du développement de la première version du simulateur. Rémy s'est beaucoup investi lors de la phase de vérification des résultats obtenus et a accepté de prendre le temps pour m'expliquer l'analyse par intervalle, et de fournir en un temps record un programme pour réaliser une analyse par intervalle.

Je remercie également Christine Chevallereau, Philippe Wenger et Yannick Aoustin de l'équipe ReV du LS2N. Ils se sont impliqués tout au long du travail de recherche afin de consolider les résultats obtenus et de proposer des pistes d'évolution. Ils sont particulièrement restés attentifs aux avancées, et-ce en dépit d'une fréquence relativement faible des réunions entre nos deux équipes dû aux confinements. Je remercie aussi les membres du CSI pour le temps consacré au suivi de cette thèse ainsi que pour leurs remarques et suggestions. Par ailleurs, je tiens à mentionner mes collègues de bureau, les doctorants du LARIS, pour les multiples discussions autour de nos sujets de recherche et les sorties

faites en dehors du travail. Plus particulièrement, je voudrais remercier Jérémy Chopin, Patty Coupeau et Guilherme Winck pour ces 3 années passées ensemble, que cela soit pour le travail, ou aller au restaurant Beaussier et au café Etienne. Merci notamment à Patty d'avoir supporté mon régime alimentaire composé de steak/frites et de calzones, et Jérémy et Guilherme de m'avoir suivi dans mon amour démesuré pour la calzone du Beaussier.

Pour finir, je voudrais dédicacer ce manuscrit à la crise de la Covid-19, qui m'a offert l'incroyable opportunité de tester mes limites physiques et mentales dans une situation d'absence d'interaction sociale régulière. Je remercie cette crise de m'avoir fait expérimenter la réalisation d'enseignements en distanciel avec des criquets, ou bien de réaliser le même cours au même moment, mais dans deux salles situées à des étages différents (NB : en cas de situation similaire, assurez-vous d'avoir une salle informatique permettant de faire 1 ordinateur sur 2 pour le respect des distances de sécurité). Enfin, j'aimerais remercier mes chats Ween et Jazz d'avoir bien voulu se laisser adopter durant cette période, et de m'avoir probablement sauver de la crise nerveuse à rester seul dans un 60m² sans contact (ou pire, d'une boulimie de caramel au beurre salé).

RÉSUMÉ

En robotique humanoïde, la marche bipède est encore un sujet de recherche riche : développement de loi de commande [1], génération de trajectoires de marche [2], conception d'architectures originales [3], etc.

Les robots bipèdes utilisent généralement des moteurs rotatifs pour l'actionnement [4]. Ces actionneurs sont couplés à un système de réduction afin de fournir les couples requis, et nécessitent d'aligner l'axe de sortie sur l'axe articulé. Ce couple moteur-réducteur induit une faible réversibilité, impliquant une absorption limitée des impacts. Une alternative possible est le moteur linéaire à entraînement direct, mécaniquement réversible. Avec ce type de moteur, un couple sur une articulation est généré par une force via un bras de levier. Il reste donc à déterminer un placement optimal et compatible à la fois avec les capacités du moteur linéaire et le couple requis. De plus, ceci permet d'envisager un placement bi-articulaire du moteur linéaire. Aujourd'hui, les moteurs linéaires sont peu utilisés en robotique, exception faite d'un ensemble moteur rotatif-vis-mère ayant donc une faible réversibilité.

Afin d'étudier l'intérêt des moteurs linéaires réversibles, une évaluation de l'utilisation de cette technologie pour concevoir un robot bipède planaire est proposée dans ce manuscrit. La première contribution est une comparaison de plusieurs architectures de robot bipède planaire utilisant des moteurs linéaires pour l'actionnement, ceci pour différents positionnements des moteurs et pour différents mouvements. Cette comparaison a pu être réalisée grâce à une seconde contribution : un simulateur. Ce logiciel permet, à partir d'un jeu de trajectoires, d'une architecture et du positionnement des actionneurs, de calculer la faisabilité du mouvement par le robot. Ce critère de faisabilité vérifie la capacité d'une architecture à réaliser un mouvement défini. À partir de cette conception, la troisième contribution est la réalisation d'un prototype de robot bipède planaire actionné par des moteurs linéaires.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	7
1 Introduction	13
1.1 Contexte et motivations	13
1.1.1 Explosion combinatoire des solutions envisagées	15
1.1.2 Impacts	15
1.1.3 Choix des actionneurs	16
1.2 Méthodologie de conception	19
1.3 Organisation du manuscrit	22
1.4 Contributions	23
2 État de l'Art	25
2.1 Robots humanoïdes	25
2.1.1 Robot Honda P2 (1998)	25
2.1.2 BIP (1998) et la Plateforme robotique ORHRO (2020)	27
2.1.3 Humanoïd Robotic Platform : HRP2 (2002)	28
2.1.4 Robot bipède (2005)	29
2.1.5 Robots bipèdes sans cheville RABBIT (2003) et MABEL (2009)	30
2.1.6 Robot humanoïde LOLA (2009)	31
2.1.7 Robots humanoïdes CHARLI-L (2011) et SAFFIR (2013)	32
2.1.8 Robot ATLAS (2015)	33
2.1.9 Robots THOR et ESCHER (2015)	34
2.1.10 VALKYRIE (2015)	36
2.1.11 Robot Kengoro (2016)	37
2.1.12 Jambe robotique GOAT (2017)	38
2.1.13 WALK-MAN (2017)	39
2.1.14 Robot ARTEMIS (2023)	40
2.2 D'autres robots marcheurs	41
2.2.1 Hexapode RHex(2001)	41

2.2.2	Robot sauteur MOWGLI (2007)	42
2.2.3	Robot quadrupède BIGDOG (2008)	43
2.2.4	Robot quadrupède CHEETAH (2013)	44
2.2.5	Robot quadrupède simiesque (2014)	45
2.2.6	Robots bipèdes CASSIE (2019), DIGIT (2023) et BIRDBOT (2022)	46
2.2.7	Robot quadrupède SOLO (2020)	47
2.3	Objectifs	48
2.4	Conclusion	49
3	Moteur linéaire à entraînement direct	53
3.1	Moteurs existants	53
3.2	Spécificités des moteurs linéaires	54
4	Problématique	59
4.1	Réversibilité	61
4.2	Bi-articularité	62
4.3	Redondance	63
4.4	Mouvements envisagés	65
4.5	Conclusion	66
5	Design optimal et calcul de force	67
5.1	Modélisation	67
5.2	Terminologie	69
5.2.1	Architecture	69
5.2.2	Géométrie	70
5.2.3	Configuration	71
5.3	Architectures et géométries admissibles	71
5.4	Mouvements étudiés	75
5.5	Modèle	76
5.5.1	Jacobienne	77
5.5.2	Transposée de la jacobienne	79
5.5.3	Calcul des termes j_n^m	81
5.5.4	Forces en fonction des couples	84
5.6	Simulateur et workflow	85
5.7	Conclusion	90

6	Optimisation	91
6.1	Modèle mathématique du problème d'optimisation	91
6.1.1	Formulation générique	91
6.1.2	Variables de décision	92
6.1.3	Critère d'optimisation	93
6.2	Protocole	95
6.2.1	Pré-sélection des mouvements	96
6.2.2	Contrainte d'anthropomorphisme	100
6.2.3	Cluster de calculs	101
6.3	Résultats	104
6.3.1	Architectures spécialisées	104
6.3.2	Architectures génériques	105
6.4	Conception Assistée par Ordinateur.	107
6.5	Conclusion	109
7	Expérimentation	113
7.1	Réalisation matérielle	113
7.2	Expérience	116
7.3	Discussion	119
8	Conclusion	121
8.1	Conclusion et perspectives	121
	Annexes	125
A	Calcul de l'angle à partir de l'élongation du moteur	125
A.1	Problème direct - calcul de α	126
A.2	Problème inverse - calcul de la Distance AB	126
B	Fichiers de conception du Prototype	128
	Bibliographie	149

INTRODUCTION

Ce manuscrit a pour objectif la conception d'un robot bipède marchant dans le plan et utilisant des moteurs linéaires à entraînement direct, afin de déterminer s'ils constituent une alternative pertinente aux solutions actuelles, notamment dans la réalisation de mouvements statiques et dynamiques.

1.1 Contexte et motivations

Selon l'hypothèse Darwinienne, les individus évoluent et conservent les mutations et mécanismes les plus adaptés à leur survie dans leur milieu [5], que cela concerne la pigmentation de la peau ou encore la production de composés toxiques. L'un des aspects les plus importants et visibles est l'aptitude à évoluer dans son environnement, ce qui va conditionner de nombreux enjeux comme la recherche de nourriture ou l'évitement de dangers. Si l'on s'appuie sur cette hypothèse, notre système locomoteur est le plus adapté afin d'évoluer dans notre environnement. Ce constat est renforcé par notre mode de vie : l'Homme ne se contente plus de vivre dans son environnement, mais le façonne pour répondre à ses besoins, ce qui implique que notre environnement immédiat est désormais spécifiquement adapté à notre vie quotidienne.

En effet, le corps de l'être humain lui permet de se mouvoir efficacement, que cela soit horizontalement ou verticalement, et ce même sur des terrains accidentés. Une conséquence directe est la conception d'infrastructures dans la verticalité (les immeubles et l'utilisation d'escaliers) adaptées à nos capacités de déplacement, le tout afin de maximiser l'espace disponible localement.

De ce fait et à la même manière que l'Homme, le système locomoteur d'un robot mobile a une grande importance afin qu'il puisse réaliser efficacement les tâches qui lui

sont confiées. La plupart des robots mobiles disponibles actuellement utilisent un système à roues ou bien à chenilles afin de se déplacer (Fig.1.1). Ces stratégies de déplacement supposent un terrain suffisamment aplani, ce qui n'est en pratique applicable que dans des environnements aménagés au préalable par l'humain. Environ 50% des terrains terrestres ne sont pas compatibles avec ce type de système de locomotion [6]. Ceci implique des perspectives d'utilisation limitées pour ce type de robot mobile. C'est ce constat qui a en partie motivé la conception de robots mobiles ayant des capacités motrices semblables à l'Homme, notre environnement immédiat étant directement influencé par nos capacités motrices. Ces robots humanoïdes ont donc vocation à pouvoir se déplacer avec autant d'aisance qu'un humain lambda.

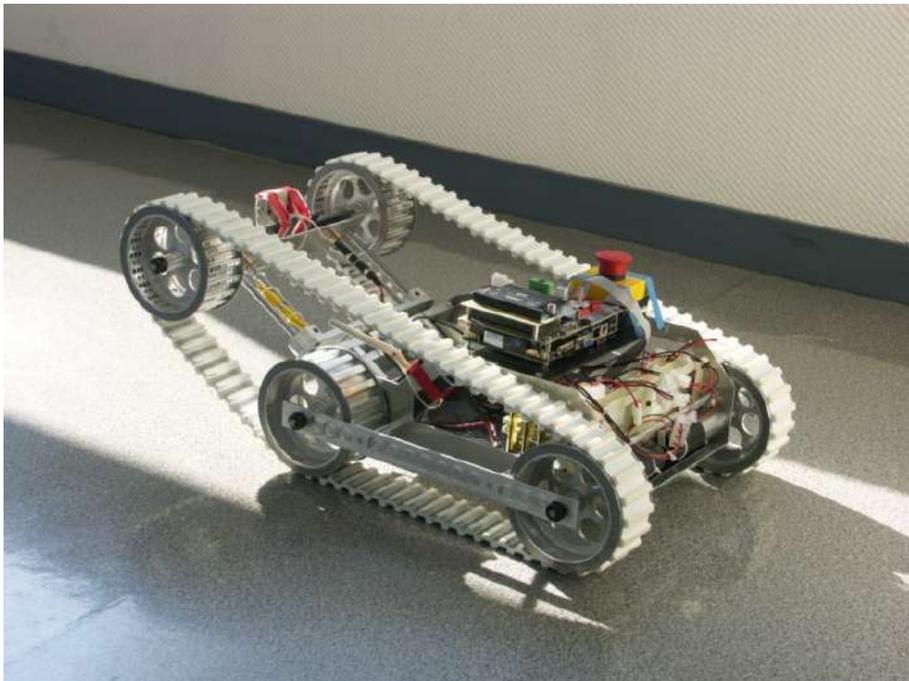


FIGURE 1.1 – B2P2 Un robot à chenille à géométrie variable.

Comme cela sera montré dans l'état de l'art, de nombreux modèles de robots bipèdes humanoïdes ont déjà été conçus durant les dernières décennies. Certains modèles sont développés pour étudier des mouvements précis, ou bien pour un objectif de performance plus globale dans le cadre d'une compétition (DARPA, MAGIC[7],etc...). Les différents bipèdes mis en avant présenteront les évolutions dans ce domaine ainsi que les problèmes et limitations apparus au fil des progrès.

1.1.1 Explosion combinatoire des solutions envisagées

Avant de parler des architectures robotiques envisageables, il est important de mettre en avant la multiplicité des problèmes à résoudre. En effet, il existe pour un même mouvement de multiples possibilités de vitesse d'exécution. À cela s'ajoute les nombreux mouvements possibles comme le squat, la course ou bien encore des déplacements latéraux qui peuvent nécessiter des couples importants sur les articulations ainsi que des impacts à anticiper. Du côté conception, s'ajoute le choix du nombre et du placement des articulations (architecture), le placement des actionneurs (géométrie), leur type et leur capacité (puissance, couple, force), et finalement la stratégie d'actionnement (loi de commande). On note un fort couplage entre les paramètres géométriques du robot et les mouvements visés. En effet, la géométrie et l'architecture choisies affectent la répartition des masses de la structure, et donc les couples requis sur les différentes articulations. Finalement, selon les missions et objectifs du robot, il faut donc choisir optimalement parmi une très grande famille de solutions, une architecture de jambe adaptée ainsi qu'un actionnement en adéquation.

1.1.2 Impacts

Un autre aspect est le besoin de prendre en compte les impacts. Ces impacts peuvent provenir du contact avec le sol ou bien d'une collision avec un obstacle. D'un point de vue modélisation, la force extérieure appliquée au système mécanique est un Dirac. Le système musculo-squelettique humain étant semi-rigide, cette absorption s'effectue naturellement à travers les articulations et tissus mous. À l'heure actuelle, les technologies disponibles ne permettent d'envisager un mécanisme avec ce niveau de complexité. Les premiers modèles prennent peu en compte les impacts et comptent sur la solidité inhérente à l'architecture pour les absorber. Seulement ceci implique un effort mécanique sur la structure d'intensité et de fréquence variable, pouvant aboutir à la casse. Une première solution pour tolérer ces impacts dans le cycle de marche consiste à les "effacer" en rajoutant comme contrainte une vitesse nulle à l'instant de l'impact. Cependant, cela a pour conséquence une démarche "freinée" car le robot doit ralentir avant chaque contact avec le sol. Une deuxième possibilité, afin de répondre au problème d'impact, est l'ajout de systèmes d'absorption passifs ou actifs (*active or passive compliance* en anglais). Les tolérances passives utilisent des ressorts ou des mécanismes élastiques pour assister les articulations en cas de surplus d'effort. Concernant les systèmes de tolérance actifs, ils

sont le plus souvent matérialisés par un couplage entre un capteur et un actionneur, associés à une loi de commande adaptée. Contrairement aux solutions précédentes, nous choisissons de directement intégrer cette capacité d'amortissement dans l'actionnement. Pour ce faire, nous utilisons des moteurs ayant pour caractéristique d'être *réversibles*. Un moteur possédant une bonne réversibilité peut plus facilement absorber un choc qu'un moteur peu réversible. Ce paramètre est en partie lié à la conception de l'actionneur lui-même. Par exemple, un moteur rotatif associé à un réducteur, donc avec des engrenages intermédiaires, est moins propice à absorber une perturbation extérieure qu'un système à vis-mère, lui-même moins efficace qu'un actionneur linéaire à la transmission directe. Aujourd'hui, les moteurs avec la meilleure réversibilité sont les moteurs à transmission direct, aussi appelés à entraînement direct (*Direct-Drive actuator* en anglais). Des détails complémentaires sur ce type de moteur sont donnés dans la section 3.2.

1.1.3 Choix des actionneurs

Un moteur électrique transforme l'énergie électrique en énergie mécanique. Ces caractéristiques sont les suivantes :

- diamètre ou taille,
- couple ou force maximal,
- inertie du rotor,
- nombre de pôles,
- courant instantané maximal,
- courant continue maximal,
- masse,
- constante du moteur K_M , exprimé en $N.m/\sqrt{W}$,
- réversibilité.

Ces différentes grandeurs permettent de sélectionner ou concevoir le moteur adéquat en vue d'une tâche spécifiée. Historiquement, les robots bipèdes utilisent des moteurs rotatifs, notamment car leurs caractéristiques techniques sont connues par leur utilisation en robotique industrielle. On peut citer comme exemple le robot PUMA dans les années 70 et plus tard le robot HONDA P2 [8](Fig.1.2). Les moteurs rotatifs permettent une rotation articulaire illimitée et peuvent être combinés à un système de réduction afin d'accroître le couple en sortie. Cependant, ces moteurs rotatifs possèdent des inconvénients : l'axe en sortie doit être aligné sur l'articulation concernée et la réversibilité est réduite dès lors qu'un réducteur est utilisé. Des alternatives ont été étudiées au fil des années, comme



(a) robot PUMA (1978).



(b) robot Honda P2 (1998).

FIGURE 1.2 – Premiers robots industriel (a) et bipède (b).

l'utilisation d'actionneurs pneumatiques ou encore hydrauliques [9][10]. Une solution plus récente consiste à concevoir des robots intégrant des moteurs à entraînement direct ou "Direct-Drive (DD)" [11], qui possèdent une grande réversibilité et un couple important comparativement aux moteurs à courant continu classique. Ce type de moteur électrique élimine tous les inconvénients du moteur à courant continu classique : problèmes de commutation au niveau du collecteur, inertie du rotor, refroidissement (les pertes joules étant situées au stator, elles sont plus faciles à évacuer), puissance massique nettement plus grande. Malgré tous ces avantages, en robotique bipède ils sont souvent combinés à un réducteur à faible ratio. En effet, la double spécification encombrement-couple requis nécessite l'utilisation d'un réducteur, pénalisant ainsi la réversibilité du système d'actionnement. Finalement, un compromis entre la taille des moteurs, la réversibilité, la bande passante ainsi que le couple maximal doit être trouvé. De notre point de vue, la réversibi-

lité est un critère déterminant, puisque c'est celui qui offre une architecture naturellement capable d'absorber les impacts. De plus, ce type de moteur peut être contrôlé pour se comporter comme un ressort de raideur variable. Cela permet de potentiellement combiner l'actionnement actif des articulations et un système passif élastique en charge de l'absorption des impacts au sein d'un unique dispositif.



FIGURE 1.3 – Un exemple de moteur linéaire à entraînement direct.

Ce manuscrit se propose d'évaluer un type de moteur jusqu'ici peu étudié en robotique humanoïde : les moteurs linéaires à entraînement direct (Fig.1.3). En effet, ce type de moteur possède plusieurs propriétés qui justifient l'étude de leur utilisation dans la conception d'un robot humanoïde bipède.

Premièrement, ils offrent la possibilité de placer les moteurs en dehors de l'axe de l'articulation et une réversibilité naturelle contrairement à des moteurs pneumatiques ou encore hydrauliques. Deuxièmement, leur fonctionnement correspond à celui du système musculaire humain, ce qui en fait un choix potentiellement pertinent dans la conception d'un bipède devant reproduire nos capacités motrices. Via leur réversibilité naturelle, les moteurs linéaires à entraînement direct peuvent être commandés comme un moteur ou un amortisseur actif. Ceci permet de ne plus développer une loi de commande évitant les impacts avec le sol lors d'un mouvement de marche. Une première preuve de concept exploitant uniquement un moteur linéaire à entraînement direct actionnant l'articulation du genou a été réalisée au début de la thèse. L'idée était d'utiliser la réversibilité naturelle de l'actionneur afin d'amortir, au niveau de l'articulation, un impact suite à une chute libre du dispositif (Fig. 1.4). Une vidéo de l'expérience est disponible à l'adresse suivante : <https://perso-laris.univ-angers.fr/~delanoue/b4d2/720p.mp4>.

Troisièmement, ce type de moteur offre l'opportunité de placer des moteurs en position bi-articulaire. Ce dernier terme renvoie à un moteur actionnant deux articulations consécutives, contrairement à un moteur placé de manière standard qui n'aura d'effet que sur une unique articulation. Cette utilisation des moteurs permet d'éviter un éventuel doublement des moteurs sur certaines articulations en permettant à un autre moteur de compenser ponctuellement un manque de couple. D'un point de vue bio-mimétisme, on



FIGURE 1.4 – Preuve de concept.

peut noter un parallèle entre la position bi-articulaire d'un moteur et certaines parties du système musculaire humain [12], comme les muscles bi-articulaires des ischio-jambiers. De plus, recourir à la bi-articulation laisse imaginer des architectures potentiellement redondantes pour certaines articulations. La loi de commande de ce type d'architecture est probablement plus complexe et doit être évaluée en amont afin d'avoir une vision précise de l'intérêt de ce type de moteur.

1.2 Méthodologie de conception

L'objectif final est de concevoir un robot bipède planaire utilisant des moteurs linéaires pour son actionnement. La conception consiste à choisir un ensemble de solutions techniques dans le but de répondre à une spécification. Dans notre cas, la spécification est de réaliser un robot capable d'effectuer différents mouvements humanoïdes. On peut noter que chaque mouvement souhaité peut être vu comme une spécification particulière. Parmi

les solutions envisagées ici, on se restreint à l'utilisation de moteurs linéaires pour la réalisation d'un robot anthropomorphe. Comme il sera présenté dans la section 5.3, il existe un ensemble de 14 architectures anthropomorphes différentes (voir Fig.1.5). De plus, pour chaque architecture A , il est possible de choisir la position P des points d'accroche des moteurs. Afin d'assurer le caractère anthropomorphe du prototype, les emplacements des points d'accroche sont aussi contraints. Toutes ces contraintes sont compilées dans une équation de la forme $h(A, P) \leq 0$. Notre approche de conception consiste tout d'abord à définir un problème d'optimisation pour lequel la solution optimale donnera le meilleur candidat. Afin d'évaluer cette fonction coût qui quantifie la faisabilité d'un mouvement (Éq. 6.2), nous avons développé un simulateur. À postériori, les valeurs optimales obtenues pour chacune des architectures pourront servir à les comparer entre-elles.

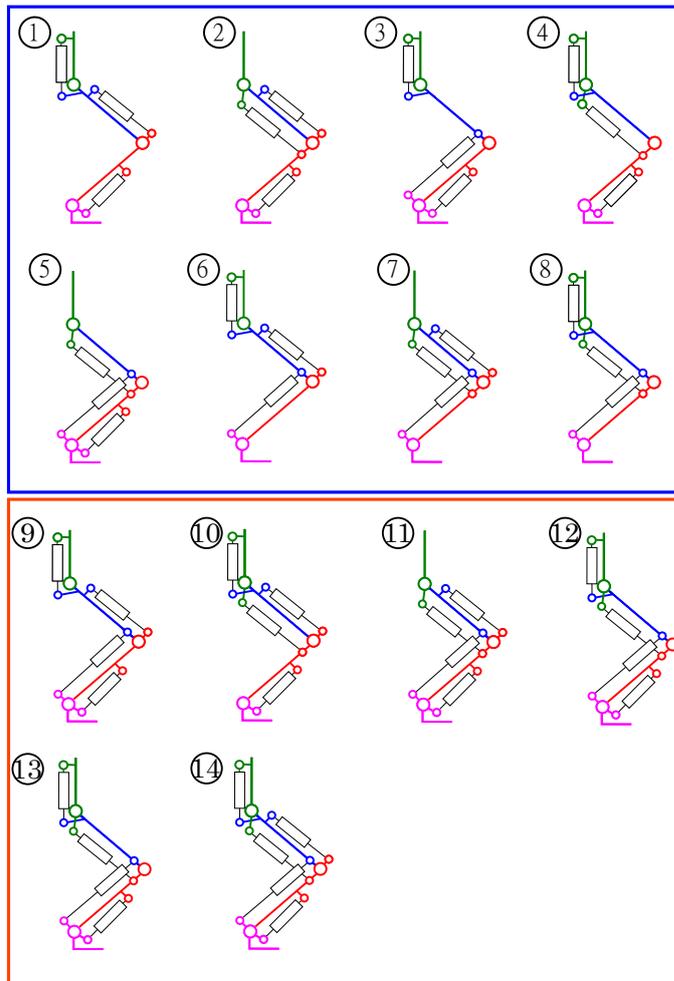


FIGURE 1.5 – Architectures étudiées (bleu : non-redondant / orange : redondant).

Fort de cette modélisation via un problème d’optimisation, un algorithme de type descente de gradient est exécuté pour déterminer le meilleur placement des fixations des moteurs. Les variables de décision de ce problème d’optimisation sont donc l’architecture et la géométrie, et paramétré par un ensemble de mouvements, *i.e.* la spécification. Pour l’optimisation, le critère est la faisabilité $f_\gamma(A, P)$ du jeu de mouvements γ par l’architecture A utilisant la géométrie P . La contrainte h permet d’imposer l’anthropomorphisme du robot. La faisabilité $f_\gamma(A, P)$ est un nombre réel compris entre 0 et 1, et est maximale lorsque l’architecture A utilisant la géométrie P peut réaliser entièrement le mouvement γ . Finalement, la conception se ramène à la résolution du problème d’optimisation suivant :

$$\begin{aligned} \max_{A, P} f_\gamma(A, P) \\ h(A, P) \leq 0 \end{aligned} \tag{1.1}$$

Le problème d’optimisation 1.1 est un problème d’optimisation mixte. En effet, les variables de décisions sont pour certaines des variables continues (les points d’accroche des moteurs), et pour d’autres des variables discrètes (l’architecture). On peut noter que nous ne générons pas de trajectoire optimisée spécialement pour le prototype, le problème (1.1) étant déjà complexe. Plus précisément, les trajectoires proviennent d’une base de donnée d’individus ayant réalisé ces mêmes mouvements (capturés par Motion-Capture). De plus, afin de ne pas avoir à résoudre le modèle dynamique inverse du robot à chaque évaluation de la fonction coût, les couples articulaires correspondant à chaque trajectoire sont calculés en amont à partir des matrices d’inertie d’un humain moyen. Cette hypothèse simplificatrice suppose que le modèle dynamique du prototype est similaire à celui d’un être humain.

Pour résoudre le problème (1.1), un optimiseur maximise la fonction coût $P \mapsto f_\gamma(A, P)$ pour chaque architecture A . Les résultats de chacune de ces optimisations sont compilés dans les colonnes du tableau (Fig.1.6). Les colonnes séparent les différentes expériences, avec pour chaque expérience une trajectoire γ différente. Ensuite, pour chaque expérience, chaque ligne montre la valeur optimale de la fonction coût obtenue pour la géométrie optimale correspondant à l’architecture. Finalement, le croisement ligne/colonne du tableau (1.6) affiche le pourcentage de faisabilité obtenu par une architecture pour une trajectoire. La lecture de ce tableau permet donc de comparer les différentes architectures (avec leur géométrie optimale) selon le mouvement envisagé.

	Hip	Knee	Ankle	Hip-knee	Knee-ankle	Architecture	Expe 007	Expe 004	Expe 005	Expe 006	Expe 008
							Squat	Walking 1m/s	Walking 1.5m/s	Walking 2m/s	Running 2m/s
3 motors						1	73,74%	82,23%	72,16%	72,65%	59,41%
						2	68,23%	75,02%	62,62%	50,59%	60,08%
						3	87,47%	80,44%	66,98%	66,95%	66,88%
						4	95,35%	81,10%	68,74%	70,82%	60,36%
						5	76,20%	97,96%	86,15%	68,66%	64,94%
						6	90,29%	98,25%	84,30%	84,55%	81,83%
						7	76,07%	99,10%	85,34%	80,39%	82,70%
						8	98,29%	97,57%	82,30%	82,87%	85,33%
4 motors						9	92,66%	99,92%	99,79%	96,99%	96,63%
						10	100,00%	82,60%	84,27%	87,17%	68,04%
						11	90,46%	99,85%	99,79%	96,85%	96,77%
						12	100,00%	100,00%	99,92%	98,94%	100,00%
						13	100,00%	99,58%	98,41%	87,41%	86,64%
5 motors						14	100,00%	100,00%	99,90%	99,90%	100,00%

FIGURE 1.6 – Faisabilités maximales de chaque architecture après optimisation pour un mouvement unique.

Les détails de la méthodologie sont présentés dans les chapitres 5 et 6.

1.3 Organisation du manuscrit

Ce manuscrit est articulé de la manière suivante. Le chapitre 2 est consacré à l'état de l'art dans le domaine de la conception robotique, et plus précisément des différentes stratégies d'actionnement et de réalisation d'une marche. Le principe d'un moteur linéaire à entraînement direct est expliqué dans le chapitre 3. Les concepts de réversibilité, bi-articularité et redondance sont présentés et discutés dans le chapitre 4. Le chapitre 5 détaille le problème d'optimisation permettant la conception. L'algorithme d'optimisation mis en place ainsi que les résultats obtenus pour les différents scénarios étudiés sont donnés dans le chapitre 6. Le chapitre 7 expose la réalisation du prototype de robot bipède ainsi que l'expérience réalisée avant une discussion sur les résultats obtenus. Finalement, une conclusion de ces travaux est exposée, ainsi que les perspectives à court et moyen termes et les potentielles difficultés associées.

1.4 Contributions

Ces travaux ont abouti à une première publication concernant la méthodologie employée, dans un journal traitant des problèmes mathématiques en ingénierie, ainsi qu’une présentation dans une conférence nationale.

- **Langard, M.** Lucidarme, Ph. Delanoue, N. Guyonneau, R. Mercier, F. Chevallereau, C. Wenger, Ph. Aoustin, Y. “Design and Optimization of a Planar Biped Leg Based on Direct Drive Linear Actuators”. *Mathematical Problems in Engineering*, issn 1024-123X, 2022-06-28
- “Robot bipède bio-inspiré : Etude et optimisation”. **Morgan Langard**, Nicolas Delanoue, Philippe Lucidarme, Rémy Guyonneau, Franck Mercier, Christine Chevallereau, Philippe Wenger, Yannick Aoustin, *Journées Nationales de la Robotique Humanoïde*, Exposé le 18 juin 2021 à Angers

ÉTAT DE L'ART

Ce chapitre montre les différentes avancées et évolutions réalisées dans le domaine de la robotique humanoïde. Bien qu'il existe également des recherches mettant l'accent sur la génération de trajectoire ou bien la loi de commande, cet état de l'art se concentre sur la présentation de différents prototypes et leurs caractéristiques. Une présentation détaillée de ces problématiques est disponible dans des ouvrages comme [13] et [14].

La section 2.1 présente différents modèles de robots humanoïdes conçus durant les deux dernières décennies et leurs spécificités. La section 2.2 s'étend sur les robots non-humoïdes mis au point durant la même période. Ces deux sections se focaliseront sur les robots marcheurs, voire sauteurs. Le but est de mettre en évidence l'évolution des problématiques et des réflexions autour de la marche robotique au fil des avancées. Bien que de nombreuses conceptions soient montrées, cet état de l'art ne se prétend pas exhaustif. En effet, il existe d'autres projets non-présentés dans cette section (systèmes passifs ou semi-passifs, à récupération d'énergie, basés sur robots industriels 6 axes[15],.). Par souci d'efficacité, seuls certains exemples parlant sont détaillés. Enfin, un tableau synthétique est disponible dans la section 2.4 regroupant les différents robots présentés.

2.1 Robots humanoïdes

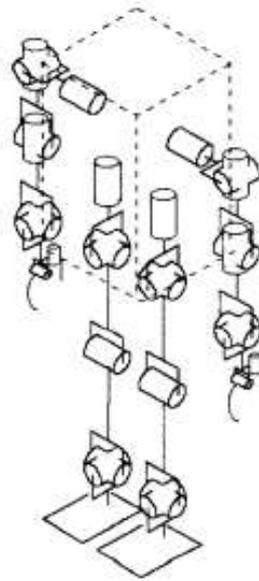
Cette section se concentre sur les modèles humanoïdes qui ont pu être conçus au cours de l'histoire (relativement courte) des robots marcheurs.

2.1.1 Robot Honda P2 (1998)

Les premiers robots humanoïdes sont apparus durant les années 90, avec notamment le robot P2 développé par Honda [8]. Le design de P2 est directement inspiré de l'être humain, certaines expérimentations ayant comme modèle les chercheurs eux-mêmes. Cela se traduit par la définition de règles de conception qui sont encore utilisées de manière



(a) robot Honda P2 (1998).



(b) représentation schématique de l'Honda P2.

FIGURE 2.1 – Robot Honda (a) et sa vue schématique (b).

standard aujourd'hui. D'un point de vue structurel, la position des articulations, leurs angles de rotation, leur dimension ainsi que le centre de masse ont été choisis afin d'être équivalents aux caractéristiques d'un être humain (Fig.2.1 (b)). Cependant, certains éléments n'ont pu être fidèlement retranscrits, comme l'actionnement du poignet. En effet, le corps humain possède pas moins de 28 degrés de liberté pour un seul bras (des doigts à l'épaule) [16]. Pour simplifier le modèle, le nombre d'articulations ainsi que leur degré de liberté a été réduit au strict minimum, pour un mouvement de marche. Cela donne une modélisation d'une jambe à l'aide de respectivement trois, une, et deux articulations pour la hanche, le genou et la cheville. Le modèle possède donc 12 degrés de liberté pour 2 jambes. Dans ce modèle, une articulation est forcément pivot, selon un axe correspondant au mouvement « classique » réalisé par l'humain. Un raisonnement similaire pour le haut du corps conduit à un modèle avec 14 degrés de liberté répartis sur deux bras. En ajoutant une rotation au niveau du cou, cela abouti à un modèle à 28 degrés de liberté.

Bien que le modèle du prototype soit directement inspiré de l'humain, ses dimensions restent conséquentes. En effet, le robot P2 pèse 210 kg pour une taille de 1.82 m et une largeur de 0.6 m. Concernant l'actuation du robot, celle-ci est réalisée par des moteurs à courant continu rotatifs fixés aux articulations. Pour réaliser le mouvement de marche, le

modèle du pendule inversé (ou ZMP pour Zero Moment Point) est utilisé [17]. Il consiste à commander les différents moteurs afin de s'assurer que le centre des forces de réaction du sol correspond au point d'équilibre du robot. À cela s'ajoute le suivi d'une trajectoire articulaire semblable à la marche humaine.

2.1.2 BIP (1998) et la Plateforme robotique ORHRO (2020)



FIGURE 2.2 – La plateforme ORHRO inspiré du robot BIP.

Dans la même temporalité que P2, le robot bipède BIP [18] a été conçu. Celui-ci ne possède pas de partie supérieure comme P2 (voir Figs.2.1 (a) et 2.2), mais possède à la place une articulation entre le pelvis et le tronc. Cette dissociation, grâce à un axe de rotation dans le plan vertical, permet d'ajouter une rotation du tronc lors de la marche (similaire à l'homme) pour améliorer l'équilibre en mouvement. Cela permet également de réduire le fléchissement de la jambe lors d'une montée ou descente d'escalier, ce qui réduit la charge sur la cheville et le genou. L'actionnement de BIP est réalisé par un moteur à vis-mère, actionnant un bras de levier fixe. Une autre particularité est l'actionnement de la cheville par deux moteurs linéaires parallèles. Les capacités du robot n'ont pu être testés en condition réelle au moment de la publication de cet article. Enfin, le robot BIP atteint un poids de 95 kg pour une hauteur de 1.70 m.

Suite à cela, le projet ORHRO (Open Robotics Humanoid RObot) [19] s'est attelé à

réaliser un rétrofit du robot BIP afin de pouvoir tester la faisabilité et l'efficacité d'un contrôleur industriel pour opérer un robot humanoïde. Cette démarche a permis de réduire le poids du robot par rapport à la première version en dimensionnant les actionneurs nécessaires pour réaliser un cycle de marche. Le robot a pu réaliser des mouvements de squat et de balancement dans le plan frontal.

2.1.3 Humanoïd Robotic Platform : HRP2 (2002)



FIGURE 2.3 – Robot humanoïde HRP2.

Dans le sillage direct du robot P2, Le ministère de l'Économie, du Commerce et de l'Industrie du Japon (METI) a financé le projet HRP de 1997 à 2002. L'aboutissement de ce projet est le robot nommé HRP2 [4], un robot humanoïde à 30 degrés de liberté et mesurant 1.55 m pour un poids de 54.1 kg. De la même manière que P2, la théorie du ZMP est classiquement utilisée afin d'assurer l'équilibre du robot. Cependant, contrairement à

son prédécesseur P2, des degrés de liberté ont été ajoutés, notamment deux degrés au niveau de la taille. L'ajout de ces articulations permet au robot de pouvoir se redresser en cas de chute. Un système passif est également présent pour l'absorption des impacts. Une autre particularité dans le design du robot est de permettre des amplitudes angulaires supérieures aux articulations humaines. L'objectif est de permettre à HRP2 de réaliser des actions avec une agilité équivalente, voire supérieure aux capacités humaines. Enfin, l'actionnement de HRP2 est réalisé à l'aide de moteurs rotatifs positionnés au niveau des articulations impactées.

2.1.4 Robot bipède (2005)

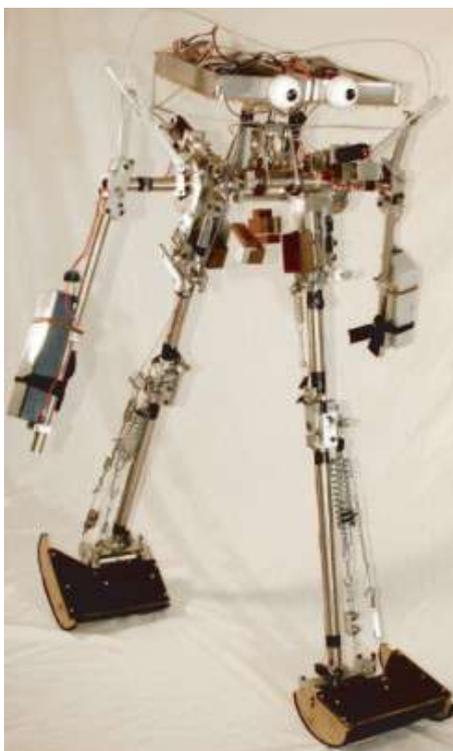


FIGURE 2.4 – Robot bipède basé sur des systèmes passifs.

Suite au robot P2, d'autres architectures de robots bipèdes ont été développées (2.4), par exemple avec un actionnement passif via un système de ressorts [20]. Ici le modèle du bipède est simplifié par rapport au robot P2, avec seulement 5 degrés de liberté : 1 pour la hanche, 2 pour les genoux qui sont périodiquement bloqués, et enfin 2 pour les chevilles. De plus, les bras du prototype sont rigidement attachés aux jambes. Ce robot

pèse 12.7 kg et mesure moins d'1 m.

Une autre originalité de ce robot est la présence d'un système de blocage des genoux. En effet, lors du mouvement de marche et lorsque la jambe est tendue, le genou se bloque afin de servir de support pendant la phase de balancement. Enfin, la consommation d'énergie globale du bipède est grandement réduite grâce à l'envoi d'une impulsion à un instant critique lors de la phase de contact du talon avec le sol. Le prototype est capable de se déplacer en ligne droite à une vitesse de 0.44 m/s et une durée de pas d'environ 0.85 s. Sur l'aspect énergétique, ce robot est approximativement 15 fois plus efficace que le robot P2 montré précédemment.

2.1.5 Robots bipèdes sans cheville RABBIT (2003) et MABEL (2009)



(a) robot RABBIT (2001).



(b) Robot MABEL (2009).

FIGURE 2.5 – Robos RABBIT (a) MABEL (b).

Un autre design de robot a été proposé en 2001 avec le robot RABBIT [21], puis en 2009 avec le robot MABEL [22]. Une particularité de ces robots, visible directement sur la Fig.2.5, est l'absence d'articulation pour la cheville. Un autre élément notable, cette fois propre à MABEL, est le placement des moteurs dans le tronc du robot, afin de réduire au maximum le poids des jambes du prototype. Cela aboutit à deux systèmes

d'actuation différents. RABBIT utilise des moteurs rotatifs classiques fixés aux articulations concernées, tandis que MABEL utilise un système de ressort tendu par un moteur dont le fonctionnement est similaire à un système câble-poulie. Cependant, ces robots possèdent des limites. En effet, RABBIT est capable de marcher, seulement il ne parvient pas à atteindre un cycle de marche stable [23]. Pour MABEL, il peut atteindre un cycle de marche stable, mais le robot nécessite une impulsion initiale. Enfin, dans les deux cas, le robot ne peut qu'avancer et ne peut pas s'arrêter, car l'absence d'articulation à la cheville rend l'équilibre statique difficile à atteindre.

2.1.6 Robot humanoïde LOLA (2009)

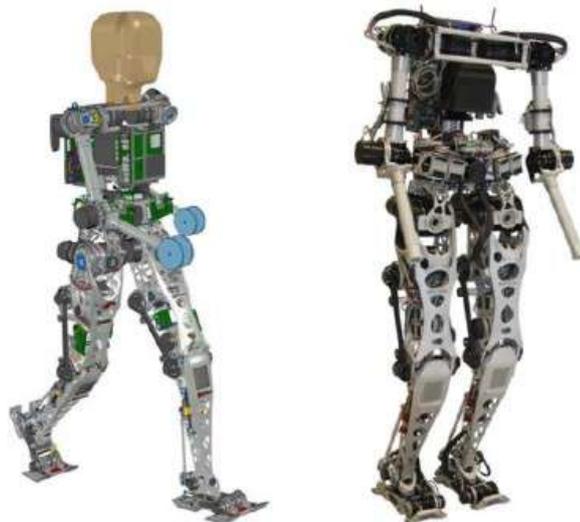


FIGURE 2.6 – modèle CAD (gauche) et photographie (droite) du robot LOLA.

LOLA [24] est un robot bipède conçu en 2009, dans la continuité du robot JOHNNIE développé par le Technical University of Munich entre 1998 et 2003 [25]. Dans la lignée de robots tels que HRP2 ou bien ASIMO, LOLA reprend un design anthropomorphe, avec notamment la prise en compte du torse et des bras durant la conception. Cela se traduit par un robot pesant environ 55 kg pour une hauteur de 1.8 m. Enfin, LOLA est capable de marcher à une vitesse d'environ 1.4 m/s. Ce robot se distingue de plusieurs manières, l'une d'elles étant l'ajout d'une articulation au pied pour imiter le fonctionnement des orteils. En effet, la plupart des robots bipèdes possèdent uniquement une articulation au niveau de la cheville (lorsque le pied est présent). Cependant, cela impose des conditions sur la trajectoire et empêche l'extension « totale » de la jambe tel qu'un humain le réalise lors

d'une marche, réduisant la vitesse maximale possible. Une autre nouveauté est l'utilisation de moteurs linéaires et rotatifs pour le système d'actionnement, ainsi que leur placement. Plus précisément, bien que la hanche soit actionnée par des moteurs rotatifs « classiques », le genou ainsi que la cheville sont mis en mouvement à l'aide d'un système linéaire. Ce système repose sur le principe d'une vis-mère, où un moteur rotatif fait tourner la vis afin d'effectuer une translation selon l'axe de la vis. Ce système offre la possibilité d'éloigner le moteur de l'axe impacté, ce qui pour LOLA permet de rapprocher les moteurs de l'axe de la hanche pour réduire au maximum la masse et donc l'inertie des jambes. Un dernier point notable, et similaire à d'autres robots ([4],[18],etc...), est la mise en place d'une redondance, notamment pour l'articulation de la cheville, ce qui permet une réduction du pic maximal requis pour les moteurs d'environ 35 %.

2.1.7 Robots humanoïdes CHARLI-L (2011) et SAFFIR (2013)

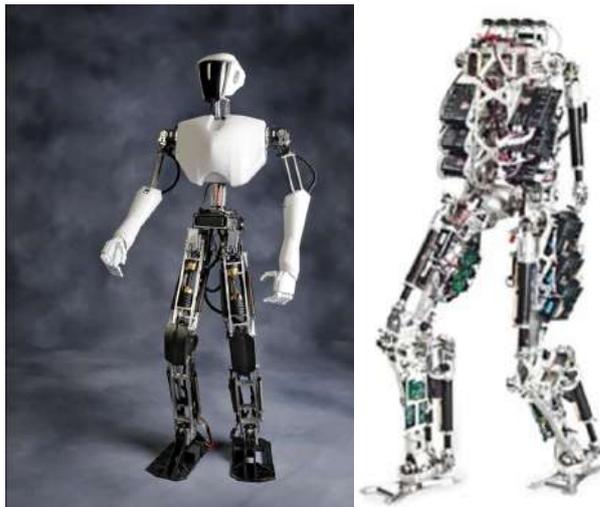


FIGURE 2.7 – Robot CHARLI-L (gauche,) et le robot SAFFIR (droite).

Contrairement aux exemples précédents, les robots CHARLI-L [26] et SAFFIR[27] utilisent une architecture parallèle afin d'actionner le bipède.

Pour CHARLI-L, les jambes sont réalisées avec des systèmes à 4 barres placés en série. Chaque système 4-barres est composé de deux moteurs rotatifs agissant en parallèle sur l'articulation ainsi que des ressorts passifs. Le principe de cette architecture est de synchroniser les moteurs en parallèle afin de pouvoir générer un couple équivalent à un moteur plus grand. L'intérêt principal est de pouvoir utiliser des actionneurs plus compacts

et moins puissants ainsi que de se passer de mécanisme de réduction pour l'actionnement. Un autre point intéressant est la possibilité de réduire le nombre de degrés de liberté de 6 à 5. En effet, en utilisant cette architecture pour la cuisse et le tibia et en considérant un sol plat, l'articulation de la hanche est contrainte d'être parallèle à la cheville. Enfin, cette architecture permet d'insérer un ressort dans la diagonale du système afin d'aider l'actionnement et de réduire encore le couple requis des moteurs. Le prototype final mesure 1.4 m pour un poids de seulement 12,7 kg et peut marcher de manière stable. Cependant cette marche est lente et requiert un terrain plat. Le robot SAFFIR [27](Fig.2.7) est quant-à lui similaire dans sa conception à LOLA. Alors que LOLA utilisait une combinaison de moteurs linéaires et rotatifs, ici SAFFIR est entièrement actionné grâce à des moteurs linéaires. Ces moteurs sont couplés à un système élastique placé en série[28]. Ces éléments positionnés en série forment un module SEA (Serie Elastic Actuator). Ce type d'architecture permet un contrôle en force plus stable ainsi que la possibilité de stocker de l'énergie, au détriment d'une bande passante réduite pour un contrôle en position des moteurs. Ensuite, chaque articulation est impactée par plusieurs moteurs placés en parallèle afin de réduire la force maximale nécessaire auprès des moteurs. Ceci conduit à un prototype aux dimensions semblables à RABBIT, avec SAFFIR qui pèse approximativement 40 kg et mesure 1.6 m. Ce robot met en lumière une problématique spécifique aux moteurs linéaires : la gestion du bras de levier entre l'axe du moteur et l'articulation impactée. En effet, il est impératif d'avoir les moteurs en décalage de l'axe de l'articulation afin de pouvoir transformer la force des moteurs linéaires en un couple au niveau de l'articulation. Le prototype visé ayant une architecture similaire à SAFFIR, cette contrainte devra être prise en compte dans notre travail.

2.1.8 Robot ATLAS (2015)

Un autre modèle notable de robot humanoïde est le robot ATLAS (Fig.2.8)[10] développé par Boston Dynamics. ATLAS est la suite du robot PETMAN développé par la même entreprise, pour notamment participer au Darpa Robotic Challenge (DRC). La particularité de ce bipède est d'être actionné par un système hydraulique. En effet, plutôt que d'utiliser des moteurs purement électriques comme les exemples précédents, ici le choix s'est porté sur un système de pompe hydraulique électrique. Ce choix constitue d'ailleurs l'une des principales limites d'ATLAS, ce dernier devant être alimenté par un courant tri-phasé de 480 Volts fournis par un système tiers. Ensuite, une fois la pompe alimentée, il est possible de transmettre une force aux articulations en commandant l'envoi



FIGURE 2.8 – Robot humanoïde ATLAS durant le DARPA challenge.

de fluide (ici une huile haute-pression) dans les actionneurs. Un défaut du robot méritant d'être soulignée est une imprécision des capteurs d'angle des différentes articulations. Cette imprécision peut atteindre jusqu'à 5 degrés, rendant l'utilisation de méthodes de compensations nécessaires. Ce robot possède 28 degrés de liberté pour la totalité de l'humanoïde, dont 6 pour chaque bras et jambe, 1 pour le cou et 3 pour le pelvis. Enfin, le robot ATLAS atteint un poids de 150 kg pour une hauteur de 1.88 m.

2.1.9 Robots THOR et ESCHER (2015)

À l'instar d'ATLAS d'autres robots ont été développés dans le cadre du DARPA Robotic Challenge (DRC), notamment le robot THOR[29] et son amélioration le robot

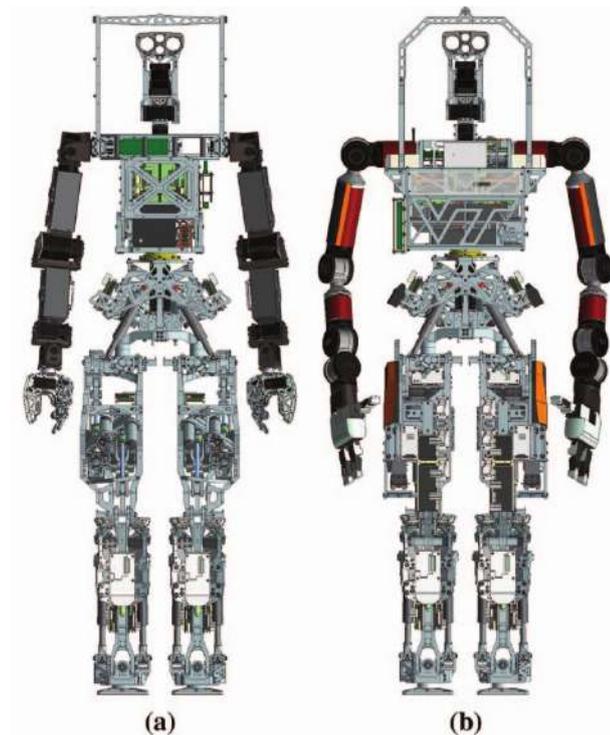


FIGURE 2.9 – Robots bipèdes THOR (gauche) et ESCHER (droite).

ESCHER[30]. Ces derniers utilisent pour leur actionnement des moteurs SEAs [31]. De manière similaire au robot SAFFIR, THOR et ESCHER utilisent un moteur linéaire à vis-mère auquel est attaché un ressort à lame (ou leaf spring) ayant une résistance fixée. Le ressort est rattaché à l'actionneur ainsi qu'au support par une articulation universelle, dont la taille est choisie selon l'amplitude angulaire nécessaire. Ces robots ont également recours au doublement des moteurs de la cheville. Concernant THOR, le robot a participé avec succès aux différentes épreuves du challenge DARPA. Cependant il n'a pas pu fournir les couples nécessaires pour des mouvements sur des terrains irréguliers ou pour monter des escaliers. Cette limite provient principalement de l'articulation du genou, qui atteignait des couples supérieurs aux capacités des moteurs. ESCHER a pu réaliser ces mouvements, notamment monter une marche à une hauteur de 23 centimètres. Pour cela un changement dans l'architecture du fémur a été fait pour mieux répartir l'effort. Concernant les dimensions le robot THOR pèse 61,3 kg pour une hauteur de 1.78 m, tandis que ESCHER pèse 77,5 kg pour une taille identique.

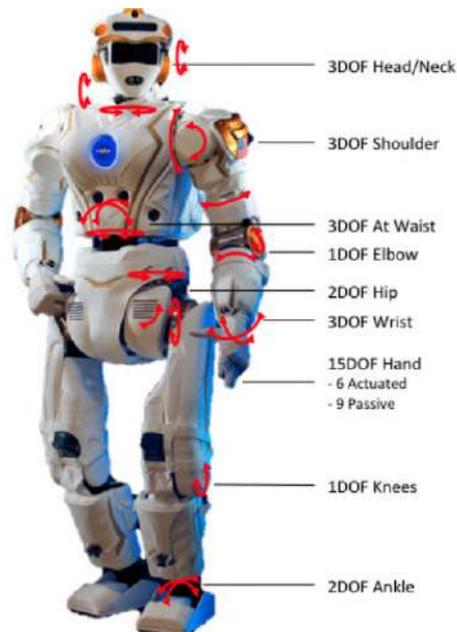


FIGURE 2.10 – Robot bipède VALKYRIE.

2.1.10 VALKYRIE (2015)

VALKYRIE est le premier robot bipède développé par la NASA [32]. L'objectif était de concevoir un robot capable d'assister un astronaute dans des scénarios extraterrestres. Les problématiques et mouvements demandés étant similaires, le cadre du DARPA challenge a été utilisé pour tester le robot. De part ce cadre, VALKYRIE est finalement un robot capable d'opérer aussi bien sur la Terre que dans l'espace. Parmi les particularités de VALKYRIE, sa conception est particulièrement intéressante. En effet, un soin particulier a été apporté à l'architecture du robot avec une modularité poussée à l'extrême. En pratique il est possible de remplacer de nombreuses parties du robot en enlever un connecteur et un boulon. Pour y arriver, chaque membre du robot embarque son propre moteur, ainsi que son système de contrôle et d'alimentation. Une protection en vinyle, elle aussi remplaçable facilement, est ajoutée par dessus pour protéger les composants. Cette modularité permet de considérer chaque bras, jambe, le torse et le pelvis comme des membres équivalents. La motorisation de VALKYRIE utilise quasi-exclusivement des moteurs élastiques en série (SEA), à l'exception de l'articulation du pouce (moteur rotatif avec un réducteur). Ces SEAs sont composé d'un moteur rotatif électrique (type moteur à courant continu) combiné à un ressort placé à la suite, pour obtenir un pseudo-tendon. Bien que tout les moteurs utilisent un moteur rotatif, selon l'articulation impactée un système à vis-mère

est ajouté pour obtenir un moteur linéaire, lui aussi se comportant comme un tendon. Enfin, certaines articulations comme la cheville sont actionnées par deux moteurs placés en parallèle. En tout, le bipède possède 44 degrés de liberté. Ceci en fait un des modèles les plus complets parmi ceux présentés. Concernant ses dimensions, VALKYRIE pèse 129 kg pour une hauteur de 1.87 m, et est capable de marcher ainsi que de monter des marches.

2.1.11 Robot Kengoro (2016)

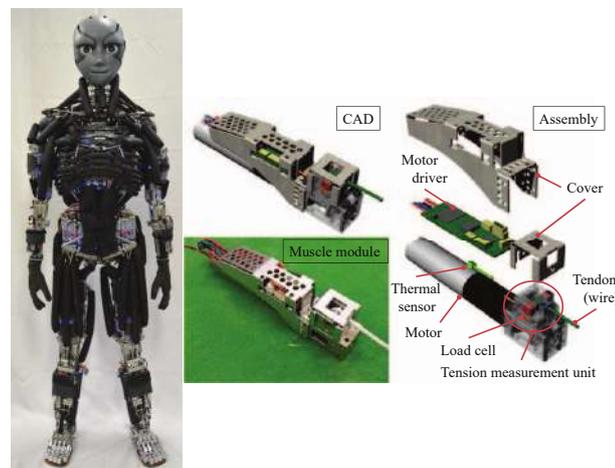


FIGURE 2.11 – Robot bipède KENGORO (gauche) et son module musculaire (droite).

Un exemple particulièrement impressionnant est le robot Humanoïde KENGORO (Fig. 2.11)[33], qui pousse la reproduction du système musculosquelettique presque à l'identique. Pour ce faire, un modèle comprenant 114 degrés de liberté (sans les mains) est utilisé. Ces degrés de liberté sont répartis à raison de 40 degrés pour une colonne vertébrale bio-mimétique, 26 degrés de liberté pour les bras et 48 degrés de liberté pour les jambes. Chaque degré de liberté est commandé par un ou plusieurs actionneurs musculaires[34], au nombre de 105. Ces actionneurs reproduisent le comportement d'un muscle en tendant ou relâchant un câble, à la manière d'une fibre musculaire. Souvent, augmenter le nombre d'actionneurs n'est pas recommandé, car ces derniers représentent la majorité du poids d'un robot humanoïde et peuvent amener à des valeurs élevées (comme ATLAS et ses 150 kg). Cependant, KENGORO parvient à limiter cette valeur via le système d'actionnement (un système tendon est bien plus léger qu'un système hydraulique par exemple), et en optimisant au maximum l'utilisation de l'espace disponible. En effet, la structure osseuse est utilisée à la fois comme support, et pour contenir les batteries et

le système de refroidissement. Pour cela des os artificiels sont conçus pour contenir et évacuer les liquides de refroidissement (à la manière de la transpiration). La structure osseuse spécifique ainsi que les modules musculaires permettent d'obtenir un robot pesant seulement 56 kg pour une hauteur de 1,67 m. De plus, la nature des actionneurs et leur faible encombrement permet d'imiter au mieux le système musculaire humain, notamment en termes d'attaches des dits moteurs. Ceci amène à avoir aussi bien des actionneurs en configuration monoarticulaire que biarticulaire. Enfin, via la complexité de son architecture, le robot est capable de mouvements complexes tels que la marche en extérieur, réaliser des pompes, se retourner en étant au sol ou bien encore de marcher en suivant un mur.

2.1.12 Jambe robotique GOAT (2017)



FIGURE 2.12 – Robot quadrupède utilisant des jambes GOAT.

Un autre angle d'approche possible du problème de marche robotisée est de s'intéresser directement aux performances et aux capacités du système locomoteur. C'est dans cette optique qu'a été développée une architecture de jambe basée sur un robot parallèle [35]. La plupart des robots marcheurs possèdent une architecture sérielle dont l'articulation du genou a un unique degré de liberté. Ensuite, la capacité à générer une trajectoire dans l'espace est le plus souvent atteinte par l'ajout de degrés de liberté au niveau de la hanche et/ou de la cheville. Une architecture parallèle possède plusieurs avantages. Premièrement, le placement des moteurs à la base de l'architecture permet de minimiser l'inertie de la jambe. Cela permet notamment de réduire la puissance des moteurs afin d'actionner l'ensemble de la jambe. Deuxièmement, une architecture parallèle permet un contrôle simultané de la position et de l'orientation du pied. En effet, cela est classique-

ment obtenu en découplant le positionnement du pied (avec des actionneurs affectant le plan sagittal de la jambe) et son orientation (à l'aide de moteurs dédiés à cette tâche). Finalement, ces architectures parallèles autorisent des accélérations importantes, ce qui est très intéressant pour des mouvements tels que le saut. Les tests sur ce type d'architecture ont permis de valider la tolérance aux impacts et particulièrement aux chutes. De plus, cette architecture de jambe permet de réaliser des mouvements omnidirectionnels tout en nécessitant moins de couple par moteur que des architectures standards. Aussi, ce type d'architecture améliore la réversibilité de la jambe, étant donné l'action simultanée des moteurs sur le pied.

2.1.13 WALK-MAN (2017)



FIGURE 2.13 – Robot bipède WALKMAN.

Le robot humanoïde WALK-MAN est le résultat des travaux effectués par l'initiative WALK-MAN de la commission européenne [36]. Le but était de concevoir un robot bipède versatile et puissant. Pour cela trois objectifs ont été sélectionnés. À terme, le robot doit être capable de manipuler des éléments lourds, de se déplacer de manière stable et robuste sur des terrains accidentés (voir ramper sous des débris), et d'être suffisamment résistant

pour l'utilisation d'outils tels que des marteaux-piqueurs. WALK-MAN pèse 132 kg (dont 14 pour la batterie) pour une hauteur de 1.915 m, et possède 17 degrés de liberté pour le haut du corps et 12 pour les jambes. Les moteurs utilisés sont de moteurs élastiques en série (SEAs), composés d'un moteur rotatif à courant continue sans balai, d'un boîtier de réduction avec un ratio allant de 80 :1 jusqu'à 120 :1, et d'une barre de torsion pour la partie élastique. Ce moteur sur-mesure permet d'obtenir d'excellentes performances en puissance, tout en garantissant une grande robustesse lors d'impacts. En terme de performances, le robot a été validé en laboratoire sur des tâches du DARPA Robotic Challenge (DRC). Il a également pu réaliser les tâches de conduite de véhicule ainsi que de l'ouverture d'une porte lors du DRC. WALK-MAN a également validé des mouvements de marche avec des virages.

2.1.14 Robot ARTEMIS (2023)



FIGURE 2.14 – Robot bipède ARTEMIS.

Un robot récent capable de nombreux mouvements dynamique est le robot ARTEMIS(Fig.2.14) [37]. L'architecture du robot est optimisée afin de réduire au maximum la masse distale. Pour ce faire, le modèle s'affranchit d'une rotation autour de la cheville. Cela diminue le nombre de degrés classique de 6 pour arriver à 5 degrés de liberté, et permet de retirer un actionneur au niveau de la cheville. Ce choix d'architecture permet d'avoir une plus grande accélération de la jambe en phase de balancement, au prix d'une impossibilité d'équilibrer le robot sur une seule jambe. Une autre spécificité de l'architecture est l'inclinaison des axes de rotations de la hanche en dehors de l'axe sagittal. Cette inclinaison d'environ 45 degrés offre une meilleure répartition des couples entre les axes

concernés, et permet d'utiliser le même actionneur. De plus, cette modification place les actionneurs vers l'arrière du pelvis, ce qui libère de l'espace au fémur pour se rapprocher encore plus du torse, lors de mouvements comme le squat. Enfin, un système de câble est utilisé afin de pouvoir placer les actionneurs en dehors des axes de rotation impactés. L'actionneur du genou est placé de sorte à être aligné avec celui de la hanche, et celui de la cheville est placé plus proche du genou. Cela permet de minimiser encore la masse distale du prototype en ayant plus de 60% du poids de la jambe au dessus du genou. Concernant les moteurs, ces derniers sont conçus sur-mesure. Le vide entre le stator et le rotor est maximisé (18 millimètres) afin d'offrir sans ajout le facteur de réduction le plus grand possible. De plus, cet actionneur avec un réducteur offre une bien meilleur réversibilité qu'un moteur rotatif classique. En termes de performance, ARTEMIS peut marcher sur place ou bien dans son environnement de manière extrêmement stable, notamment en extérieur sans assistance. La loi de commande développé permet de prendre en compte des perturbations extérieures importantes (comme une poussée) et de maintenir la stabilité du robot. Il est également capable de courir à une vitesse de 1 m/s.

2.2 D'autres robots marcheurs

Bien que plusieurs robots bipèdes aient été conçus pour répondre à la problématique de la marche, il est aussi possible de trouver dans la littérature des exemples s'inspirant du monde animal cette fois. En effet, la marche n'étant pas le propre de l'Homme, il est intéressant de voir les propositions qui ont pu être formulées pour répondre à la problématique de la marche en prenant exemple sur d'autres systèmes locomoteur existant.

2.2.1 Hexapode RHex(2001)

Dans cette logique de reproduction de la marche non pas humaine, mais ici animale, un prototype notable est le robot RHex [38]. Son architecture se base sur le système locomoteur bio-mécanique de l'arthropode. Ce robot possède 6 jambes avec un unique degré de liberté pour chacune d'elles. La mise en mouvement de l'hexapode se fait par la coordination des jambes, considérées ici comme deux tripods séparés pour obtenir un modèle reprenant un pendule inversé chargé d'un ressort. Le principe est de stocker une partie de l'énergie cinétique produite durant le mouvement afin de pouvoir le réutiliser au moment opportun.

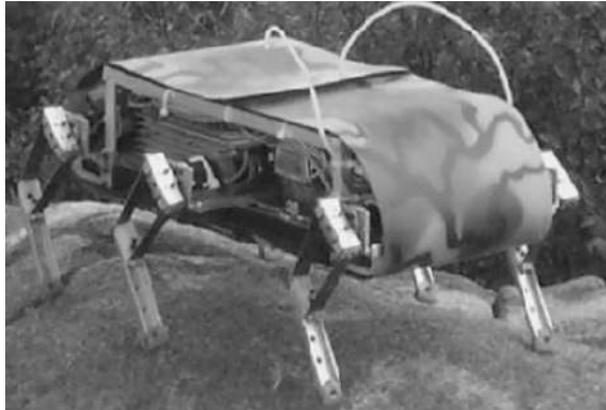
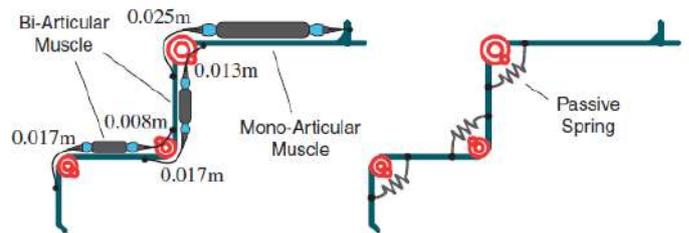


FIGURE 2.15 – Le robot RHex.

2.2.2 Robot sauteur MOWGLI (2007)



(a) robot MOWGLI (2007)



(b) représentation schématique de MOWGLI

FIGURE 2.16 – Robot MOWGLI (a) et sa vue schématique (b).

Un autre robot notable est le robot sauteur MOWGLI, conçu en 2007 [9]. Le but de ce modèle était de réaliser un robot le plus bio-inspiré possible, tout en étudiant le rôle de l'ensemble du corps pour réaliser des mouvements explosifs. Du point de vue de la conception, nous pouvons voir sur la figure 2.16a que le robot s'inspire de la grenouille. Ce robot considère uniquement un saut dans le plan, ce qui se traduit par un unique degré de liberté pour les articulations de la hanche, du genou et de la cheville. L'originalité du prototype tient à son système d'actionnement. En effet, plutôt que d'utiliser un moteur rotatif comme pour le cas de P2, MOWGLI se base sur un système de moteurs pneumatiques placés en position bi-articulaire (Fig.2.16). Le système utilise 3 moteurs pour 3 articulations, il n'y a donc pas de sur-actuation. Il est important de noter une redondance locale, car chaque articulation est affectée par 2 moteurs. Concernant les di-

mensions du robot, ce dernier pèse environ 3 kg pour une longueur totale de 0.9 m (en extension). MOWGLI est capable de réaliser des sauts jusqu'à 0.5 m et de gérer la phase d'atterrissage. L'élément déterminant pour atteindre ces performances est la nature des moteurs. En effet, les moteurs pneumatiques possèdent un grand ratio puissance/masse et les propriétés mécaniques de l'air (bonne compression et faible viscosité) permettent une contraction rapide.

2.2.3 Robot quadrupède BIGDOG (2008)

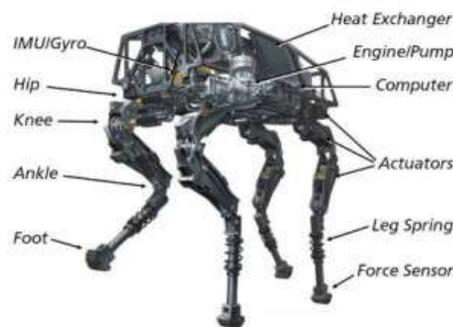


FIGURE 2.17 – robot marcheur quadrupède BigDog.

Dans la continuité des robots marcheurs non-bipèdes, un exemple est BigDog [39], un robot est développé par Boston Dynamics dans le cadre d'un projet de la DARPA. L'objectif est la réalisation d'un robot autonome capable de se déplacer en environnement accidenté et capable de transporter du matériel. Pour y arriver, BigDog utilise un moteur à combustion de 15 chevaux qui sert lui-même à alimenter une pompe hydraulique. En retour, la pompe délivre une pression à des actionneurs hydrauliques opérant les jambes du quadrupède. Bigdog datant de 2008, nous pouvons constater que ce choix a directement impacté la conception du robot ATLAS (voir section 1.1.7). En effet, les deux robots se basent sur le même système hydraulique pour mouvoir le robot, à ceci près qu'ATLAS n'utilise plus un moteur à combustion mais un moteur électrique. Chaque jambe est commandée par 4 actionneurs, et possède un autre degré de liberté passif pour un total de 5 par jambe. Un autre élément original est le nombre de capteurs transportés par BigDog. En effet, pour réaliser des tâches allant du contrôle de la position et de la force aux articulations, jusqu'à la coordination des 4 jambes lors des déplacements, BigDog embarque une cinquantaine de capteurs. Ces nombreux capteurs servent notamment à estimer et réguler les forces de réaction du sol, ainsi que la vitesse et l'altitude du robot

en mouvement. Cela permet notamment à BigDog de pouvoir absorber les perturbations extérieures comme des poussées et de rester en équilibre dans ces conditions. Les tests ont montré la capacité du quadrupède à réaliser des marches ainsi que des courses, jusqu'à une vitesse de 2 m/s. Concernant les dimensions du prototype, le gabarit est proche de celui de P2 en termes de ratio masse/dimension, avec un poids d'environ 109 kg pour une hauteur d' 1 m, une longueur de 1,1 m et une largeur de 0.3 m.

2.2.4 Robot quadrupède CHEETAH (2013)

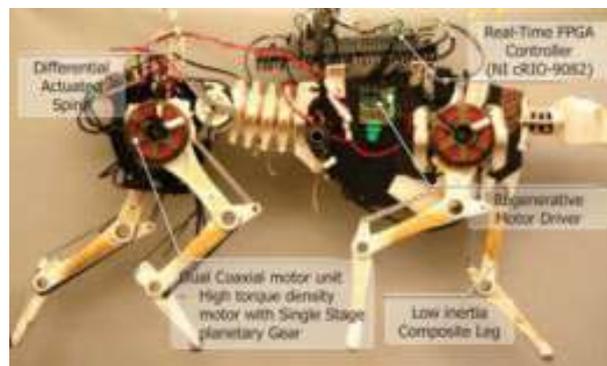


FIGURE 2.18 – Robot CHEETAH.

Le robot CHEETAH développé en 2013 [40], propose une conception minimisant la consommation énergétique. Cela se traduit de plusieurs manières, notamment par l'utilisation de moteurs ayant un important ratio couple/densité. Une autre conséquence de cet objectif se retrouve sur plusieurs aspects dans le design des jambes du robot. L'un est l'utilisation de moteurs rotatifs capables de fonctionner en mode générateur. En effet, il a été montré que lors d'un cycle de marche, il arrivait que le travail d'une articulation soit négatif [41]. En se basant sur ce résultat, un moteur a été conçu afin de pouvoir « inverser » son fonctionnement et convertir une force mécanique en électricité lorsque les conditions sont réunies. Cela permet au robot d'avoir une réversibilité de ses actionneurs. Par ailleurs, la conception de la jambe en elle-même a été pensée pour réduire l'énergie nécessaire. En effet, un système "os-tendon" a été mis en place, inspiré des animaux quadrupèdes, entre le pied et le genou. Ce système repose sur l'hypothèse que la structure rigide de la jambe (l'os) supporte principalement des forces de compression telles que la gravité, tandis que la partie souple (le tendon) va supporter en priorité des forces de traction. L'introduction de ce tendon passif, dont le fonctionnement peut être assimilé à un

ressort, permet de réduire le stress appliqué à la structure rigide. Enfin, le placement des moteurs suit le même raisonnement que pour le robot MABEL : la masse musculaire est répartie en priorité au plus proche du haut de la jambe. Cela se traduit par le placement des moteurs en priorité au niveau de l'épaule/hanche pour le quadrupède CHEETAH. En effet, les moteurs de l'épaule et du genou sont placés tous deux au niveau de l'épaule. Pour motoriser l'articulation du genou, un système à 4 barres est utilisé pour agir de manière similaire au système câble-poulie du robot MABEL. Grâce à cela, l'inertie des jambes est limitée, ce qui permet de limiter le couple nécessaire pour la mise en mouvement. Ces différents éléments permettent au robot CHEETAH d'atteindre une vitesse de 6 m/s, soit plus de 4 fois la vitesse du robot LOLA.

2.2.5 Robot quadrupède simiesque (2014)

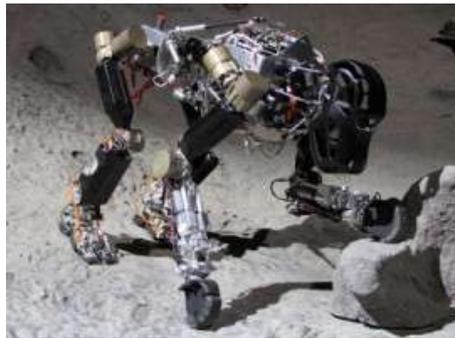


FIGURE 2.19 – robot quadrupède simiesque avec une colonne vertébrale active.

D'autres recherches en robotique bio-inspiré se focalisent sur l'agilité du robot plutôt que sur son système d'actionnement. C'est le cas par exemple d'un robot simiesque [42] actionné par des moteurs rotatifs pour ses déplacements, mais utilise une posture quadrupède ainsi qu'une colonne vertébrale active pour gérer une évolution en terrain accidenté. Les vertébrés utilisent activement leur colonne vertébrale, que cela soit pour l'absorption de chocs, le stockage et relâchement d'énergie mécanique ou bien pour augmenter la palette de mouvements possibles. Cependant, et comme vu sur les exemples précédents, lorsque la partie supérieure du corps est prise en compte, cette dernière est le plus souvent représentée comme un bloc rigide et statique. Cela contraint les mouvements possibles afin de maintenir l'équilibre du tronc, ce dernier se mouvant passivement. Il est aussi intéressant de noter que plutôt que d'utiliser plusieurs moteurs rotatifs en série pour simuler la colonne vertébrale, il a été choisi d'adopter une structure hexago-

nale similaire à une plateforme à 6 degrés de liberté commandée par un robot parallèle. Concernant ses dimensions, le prototype final pèse environ 22 kg pour une hauteur de 1.3 m en configuration bipède.

2.2.6 Robots bipèdes CASSIE (2019), DIGIT (2023) et BIRDBOT (2022)



(a) robot CASSIE.



Digit

(b) Robot DIGIT.



(c) Robot BIRDBOT.

FIGURE 2.20 – Robots CASSIE (a) et DIGIT (b) développés par Agility Robotics, et BIRDBOT (c).

Enfin, d'autres robots bipèdes se basent sur les oiseaux coureurs. On peut notamment citer les robots CASSIE [3] et son successeur DIGIT[43], développés par Agility Robotics, ainsi que le robot BIRDBOT[44]. L'une des originalités directement remarquables à propos de ces robots est le design utilisé (voir Fig.2.20), rappelant des animaux comme l'autruche. Pour CASSIE, l'objectif initial était « simplement » de réaliser un robot bipède

avec des performances supérieures aux autres modèles existants. Au cours de son développement, le choix a été fait de s'éloigner du modèle humanoïde classique pour s'intéresser au système locomoteur des oiseaux coureurs, notamment l'autruche. Cela se traduit directement dans la structure de la jambe : plutôt que d'avoir 3 articulations, CASSIE en possède 5. De nouveaux membres ont été ajoutés au squelette de la jambe, avec notamment un tibio-tarse et un méta-tarse entre l'articulation du genou et celui de la cheville. La distance hanche-genou est très faible en comparaison de la distance genou-cheville. Malgré le nombre d'articulations plus élevé, chaque jambe ne possède toujours que 3 articulations actionnées : la hanche (3 degrés), le genou (1 degré) et la cheville (1 degré). Les degrés de liberté supplémentaires, notamment la rotation dans le plan sagittale entre le tibo-tarse et le méta-tarse, sont actionnés passivement ou bien à l'aide d'un ressort. Enfin, un ressort est placé entre la hanche et le début du méta-tarse. Ce robot CASSIE est donc un bipède sous-actionné (i.e, il possède moins de moteurs que de degrés de liberté). L'actionnement de CASSIE est réalisé avec des moteurs rotatifs. Concernant ses performances, CASSIE a pu réaliser des mouvements de marche en atteignant une vitesse de 1.4 m/s. Les robots DIGIT et BIRDBOT ont une architecture très proche (BIRDBOT) voir identique (DIGIT) et les mêmes observations peuvent être faites.

2.2.7 Robot quadrupède SOLO (2020)



FIGURE 2.21 – robot Solo12 proposé par PAL Robotics (Open Dynamic Robot Initiative).

Un autre exemple récent de robot quadrupède est le robot SOLO[45](voir Fig.2.21), développé dans le cadre du projet Open Dynamic Robot Initiative (ODRI). Ce projet résulte d'une collaboration entre les laboratoires du LAAS-CNRS, l'Institut Max-Planck pour les Systèmes Intelligents et l'école Tandon d'ingénierie de l'Université de New-York. L'objectif de l'ODRI est de permettre la réalisation de robots à partir de pièces issues d'une imprimante 3D et de composants peu coûteux. Le robot SOLO est un exemple de

robot marcheur réalisé à partir de ces éléments. La motorisation est assurée par un module d'actionnement simplifié composé d'un moteur rotatif (BLDC) et d'une transmission à faible ratio. Le module pèse 150g pour une longueur de 160mm, ce qui permet au final au robot SOLO de ne peser que 2.2 kg en considérant les 4 jambes et le tronc. En termes de conception, chaque jambe possède 2 degrés de liberté, ce qui amène à un robot complet possédant 8 degrés de liberté. De plus, un capteur de contact est installé sur chaque pied pour détecter les impacts. Concernant les capacités de SOLO, des essais de robustesse ont montré que le robot est capable d'obtenir une raideur comprise entre 20 et 360N/m. SOLO peut également supporter une chute de 0.24 m. Pour finir, des tests de saut ont été réalisés, montrant que le robot pouvait sauter jusqu'à 0,65 m de hauteur, pour une hauteur debout de 0,24 m. Cela correspond approximativement à 2 fois la longueur des jambes, et 2,7 fois la longueur en position de repos.

L'ensemble du projet est disponible via ce lien : <https://open-dynamic-robot-initiative.github.io/>

2.3 Objectifs

Une fois l'état de l'art réalisé, il convient de discuter concrètement des éléments nous intéressants et de nos objectifs. Tout d'abord en termes de performance, l'objectif final est d'atteindre un mouvement de marche stable, voir de course dans l'environnement. Ceci correspond à la mobilité observée sur la plupart des robots présentés. Concernant le système d'actionnement, notre solution, qui constitue notre principale démarcation par rapport à la littérature, est l'utilisation de moteurs linéaires à entraînement direct. Nous pensons pouvoir simplifier la motorisation d'un robot bipède ainsi que sa loi de commande de cette manière. En effet, ce type de moteur permet de ne pas recourir à des éléments comme un boîtier de réduction, une vis-mère ou encore un ressort placé en série. L'absence de ces éléments ainsi que la nature des actionneurs doit également permettre une meilleure réversibilité que sur les modèles de la littérature. De plus, nous voulons éviter des moteurs placés en parallèle lorsque nécessaire en ayant recours à la bi-articulation. Enfin, nous voulons obtenir une architecture la plus anthropomorphe possible, en évitant des systèmes 4-barres, à câbles ou sous-actionnés pour s'approcher au plus près du modèle un membre-un muscle/moteur.

2.4 Conclusion

Les tableaux des figures 2.1, 2.2 et 2.3 reprennent et résument les différents éléments mis en avant sur les robots présentés.

Suite aux exemples présentés dans cette section, il est possible d'observer qu'un nombre important de prototypes ont été conçus afin de répondre à la problématique d'une marche dynamique et robuste. Chaque robot met en évidence les différentes possibilités afin de répondre à ce problème, que cela passe par des architectures humanoïdes ou animales, ou encore l'ajout ou la suppression de certains degrés de liberté comme l'articulation de la cheville. Au-delà du nombre de degrés de liberté utilisés, l'architecture elle-même des différents robots varie : il est possible d'avoir un modèle de jambe basé sur un robot parallèle (GOAT), sous-actionner le système (CASSIE), ou encore utiliser des éléments élastiques passifs comme des ressorts ou bien des tendons [46][40]. De plus, il existe de nombreux choix de motorisations possibles, avec des moteurs rotatifs[40], à vis-mère [24], des systèmes hydrauliques [10] ou bien pneumatiques [9]. Cependant, certains éléments sont peu étudiés, tels que l'utilisation de moteurs linéaires (le plus souvent un « système linéaire » est mis en place à partir d'un moteur rotatif), ou la possibilité de recourir à la bi-articulation (MOWGLI utilise ce principe, mais principalement par bio-mimétisme). De plus, l'absorption des impacts lors d'une marche (le contact entre le talon et le sol par exemple) est le plus souvent introduite dans la commande, et reste finalement une problématique peu prise en compte lors de la conception (LOLA possède une architecture intéressante du point de vue de ce critère, mais cela vient principalement d'un objectif de diminution de l'inertie des jambes). En effet, dans les différents articles qui ont pu être cités, la notion de « réversibilité des actionneurs » apparaît rarement, alors que celle-ci peut permettre une prise en compte beaucoup plus simple des impacts, voire d'optimiser la consommation énergétique en autorisant des systèmes de capture/restitution d'énergie (en couplant cela avec des composants élastiques). Cet aspect énergétique est d'autant plus important que certains exemples, comme le robot ATLAS, ne peuvent pas embarquer leur propre système d'alimentation (la dernière itération du robot a corrigé ce problème). Hors, la marche robotique ayant pour objectif une évolution dynamique dans l'environnement, ce qui peut directement être entravé par ce type de limite.

Globalement, notre objectif est de proposer une nouvelle architecture de robot bipède anthropomorphe marcheur, n'utilisant que des moteurs linéaires à entraînement direct.

Robot	Actionnement	Nature des mouvements	Spécificité(s)
P2[8]	moteurs rotatifs	marche	non
BIP[18], ORHRO[19]	moteurs linéaires	marche balancement	moteur à vis-mère actionnement parallèle de la cheville
HRP2[4]	moteurs rotatifs	marche	similaire à P2 ajout de DoFs pour la chute
Robot bipède (2005) [20]	passif (ressorts)	marche à 0.44 m/s	modèle simplifié blocage des genoux
RABBIT[21]	moteurs rotatifs	marche, course non stable	pas de cheville
MABEL[22]	moteurs rotatifs	marche stable si impulsion initiale	moteurs dans le tronc système de câble- poulie Pas de cheville
LOLA[24]	moteurs linéaires et rotatifs	marche à 1.4 m/s	articulation pour les orteils système à vis-mère redondance
SAFFIR[27] CHARLI-L[26]	moteurs linéaires	marche	motorisation paral- lèle et ajout de ressorts
ATLAS[10]	moteurs hydrau- liques	marche course sur terrain plat et non-plat	problèmes de cap- teur
THOR[29] ESCHER[30]	moteurs linéaires	marche et monter de marches (ESHER)	actionneurs SEAs motorisation paral- lèle
VALKYRIE[32]	moteurs linéaires	marche monter de marches	actionneurs SEAs motorisation paral- lèle grande modularité

TABLE 2.1 – Tableau des différents robots présentés.

Robot	Actionnement	Nature des mouvements	Spécificité(s)
KENGORO[33]	moteurs hydrauliques	marche monter de marches et non-plat	problèmes de capteur
GOAT[35]	moteurs rotatifs	omnidirectionnels et saut	architecture parallèle Test de la tolérance aux impacts
WALKMAN[36]	moteurs linéaires (système vis-mère)	marche avec virage conduite ouverture de porte	actionneurs SEAs résistant aux chocs
ARTEMIS[37]	moteurs rotatifs	marche sur place course saut	inclinaison des axes de rotation de la hanche
Rhex[38]	moteurs rotatifs	marche	6 jambes avec un unique DoF
MOWGLI[9]	moteurs pneumatiques	saut jusqu'à 0.5 m course sur terrain plat et non-plat	bi-articulation
BIGDOG[39]	moteurs hydrauliques rotatifs	marche course jusqu'à 2 m/s	quadrupède amorti des impacts via logiciel grâce à 50 capteurs embarqués
CHEETAH[40]	moteurs rotatifs	marche course jusqu'à 6 m/s	quadrupède système "ostendon" et 4 barres moteurs réversibles

TABLE 2.2 – Tableau des différents robots présentés (suite).

Robot	Actionnement	Nature des mouvements	Spécificité(s)
robot simiesque[42]	moteurs rotatifs colonne vertébrale active	gestion d'obstacles et de contacts im- prévus	quadrupède architecture hexa- gonale pour la co- lonne répartition des im- pacts entre les 4 points de contact
DIGIT[43] CASSIE[3] BIRDBOT[44]	moteurs rotatifs	marche à 1.4 m/s	sous-actionné architecture proche de l'autruche
SOLO[45]	moteurs rotatifs	saut jusqu'à 0.65 m chute de 0.24 m	quadrupède architecture simpli- fiée

TABLE 2.3 – Tableau des différents robots présentés (fin).

Une architecture de base similaire aux robots P2, ORHRO ou encore ATLAS (ie. une jambe avec les articulations de la hanche, du genou et de la cheville) est choisie. Ensuite, le nombre et le positionnement des moteurs est décidé via l'utilisation d'un algorithme d'optimisation. Cet algorithme maximise la faisabilité d'un mouvement tout en cherchant à minimiser la consommation énergétique. C'est donc ce constat qui a motivé l'étude d'un potentiel robot bipède actionné exclusivement à l'aide de moteurs linéaires réversibles, ainsi que l'utilisation de la bi-articularité afin d'optimiser le travail des actionneurs au cours d'un mouvement de marche. La prochaine partie va expliciter les différents concepts abordés dans ce manuscrit, ainsi que les problématiques sous-jacentes.

MOTEUR LINÉAIRE À ENTRAÎNEMENT DIRECT

L'état de l'art présente un large éventail de solutions pour permettre l'actionnement d'un robot bipède. Cependant, l'utilisation de moteurs linéaires à entraînement direct demeure marginale. [47][48] proposent une première version d'actionneur linéaire à entraînement direct pour une jambe similaire au robot CHEETAH. Cependant l'utilisation de balais comme pour un moteur rotatif induit des frictions, et l'actionnement d'un robot marcheur complet reste à faire. Le but de ces travaux est donc d'évaluer plus en détails la performance de ce type d'actionneur, pour déterminer s'ils constituent une alternative pertinente aux solutions déjà existantes. Ce chapitre va rappeler brièvement les principaux types d'actionneurs utilisés en robotique humanoïde, avant de présenter les spécificités des moteurs linéaires à entraînement direct.

3.1 Moteurs existants

De manière générale, un moteur se caractérise par son mode d'alimentation ainsi que par la nature du mouvement produit. L'alimentation d'un moteur peut se faire par de l'air comprimé[49], un liquide (souvent de l'huile) sous pression[50], ou bien encore de l'électricité[8]. Une fois le mode d'alimentation fixé, le moteur est aussi caractérisé par le mouvement généré, qui peut être soit rotatif soit linéaire. De nombreuses solutions industrielles sont disponibles dans le commerce [51], et d'autres sont des actionneurs réalisés sur mesure lors de la conception d'un robot ([31],[34],etc.). Concernant les actionnements rotatifs, ces derniers possèdent quelques inconvénients. En effet, ces derniers ne produisant que des couples, l'axe du moteur doit être aligné sur l'axe de l'articulation impactée. Hors ceci impose une inertie importante à l'architecture, car les moteurs représentent en moyenne 30% du poids total d'un robot. Cela induit donc des efforts supplémentaire pour générer un mouvement (de marche par exemple).[52] propose une motorisation n'utilisant

pas de réducteur. Une autre solution consiste à placer les moteurs rotatifs au plus près du centre de masse. Cependant ceci impose une architecture spécifique pour le robot bipède. En effet, un système câbles-poulies doit être mis en place, ce qui complexifie le mécanisme d'actionnement. De plus, les moteurs rotatifs doivent généralement être associés à un système de réduction afin d'atteindre un couple de sortie suffisant [40]. Hors cela ajoute des éléments intermédiaires et imposent de trouver un compromis entre la réversibilité, la vitesse, le couple de sortie et la bande passante. Il existe également des moteurs linéaires, mais ces derniers sont le plus souvent composés d'un moteur rotatif associé à un système de vis-mère pour générer le mouvement de translation. Cela permet d'obtenir des couples satisfaisants, mais réduit encore la réversibilité du système et de la vitesse de l'actionnement[28]. Pour résoudre ce problèmes tout en se rapprochant de la biomécanique humaine, une alternative a été développée : les moteurs élastiques en série (SEA : Serial Series Actuators). L'objectif est de combiné les actionneurs linéaires usuels avec un élément flexible (généralement un ressort[29][28]) afin de pouvoir stocker mécaniquement l'énergie superflue lors de l'actionnement. Le but derrière cela est de pouvoir récupérer cette énergie pour aider les moteurs lorsque cela est nécessaire. Un avantage et de pouvoir lisser l'effort fourni par les actionneurs et de réduire la consommation énergétique du système. Enfin, certains systèmes utilisent des tendons artificiels [53][34] pour obtenir des résultats similaires.

3.2 Spécificités des moteurs linéaires

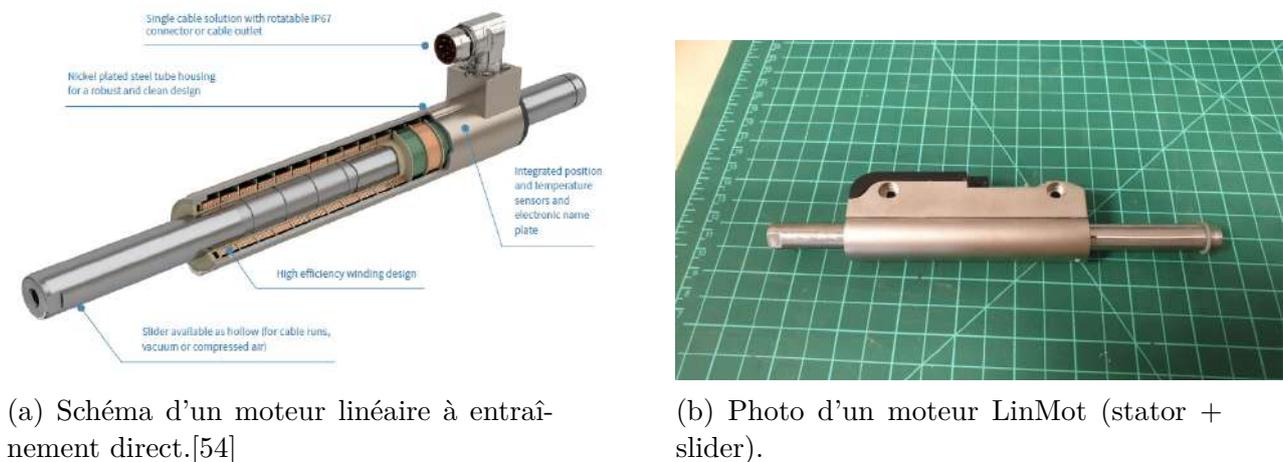


FIGURE 3.1 – Schéma et photo d'un moteur linéaire.

Caractéristique	Unité	Valeur
Amplitude maximale	mm	1830
Force maximale	N	de 44 à 1024
Force nominale	N	de 11 à 354
Vitesse maximale	m/s	6,9
Répétabilité	mm	0,05/0,01
Longueur du stator	mm	de 162 à 409

TABLE 3.1 – Tableau des caractéristiques d’un moteur linéaire à entraînement direct.

Une solution peu étudiée est l’utilisation de moteurs linéaires à entraînement direct. En effet, malgré l’existence dans la littérature de système linéaire (comme la vis-mère[19],[24],[27]), ce type d’actionnement repose principalement sur un moteur rotatif. Un premier développement de moteur linéaire est proposé dans [48], sur le modèle d’un moteur rotatif à balai. Aujourd’hui, il existe des moteurs électriques linéaires à entraînement direct disponibles dans le commerce. Ces moteurs se décomposent en deux éléments : une partie fixe (le stator) et une partie mobile (le slider). Par analogie avec un moteur rotatif, il s’agit d’un moteur sans balai (brushless) déroulé, comme illustré sur la figure 3.2. Le stator se compose d’un ensemble de bobines qui, une fois traversées par un courant, vont générer un champ électromagnétique. La figure 3.1 montre une vue schématique ainsi qu’une photo d’un tel moteur. Ce champ va ensuite directement impacter le slider qui est composé d’aimants (Fig.3.3), et lui permettra de se déplacer le long du stator. Cette méthode possède plusieurs avantages concomitants : de faibles frottements, une réversibilité naturelle de l’actionneur, ainsi que la possibilité de contrôler le moteur en force ou bien en position. En effet, bien que ce type de moteur fournisse une force de la même manière qu’un moteur rotatif fournit un couple, il est possible de le commander et de fixer la position du slider. Cela permet notamment d’imiter par logiciel le fonctionnement d’un ressort dont le coefficient de raideur serait variable et commandé en temps réel. [55] et [56] proposent des solutions pour obtenir justement ces raideurs variables. Avec cette technologie, il devient donc possible de prendre naturellement en compte les effets d’amortis et d’impacts. Le tableau 3.1 montre la plage de caractéristiques de ce type de moteur. Nous pouvons remarquer la vitesse importante de ces dernier, ainsi qu’une plage de force pouvant monter jusqu’à 1024 Newton selon le modèle d’actionneur. Un dernier élément intéressant est l’amplitude maximale, qui peut être adaptée selon les besoins en

sélectionnant un slider plus ou moins long. Ces éléments permettent d'envisager une utilisation pour un robot bipède, une marche dynamique demandant des couples importants et une vitesse minimale des actionneurs.

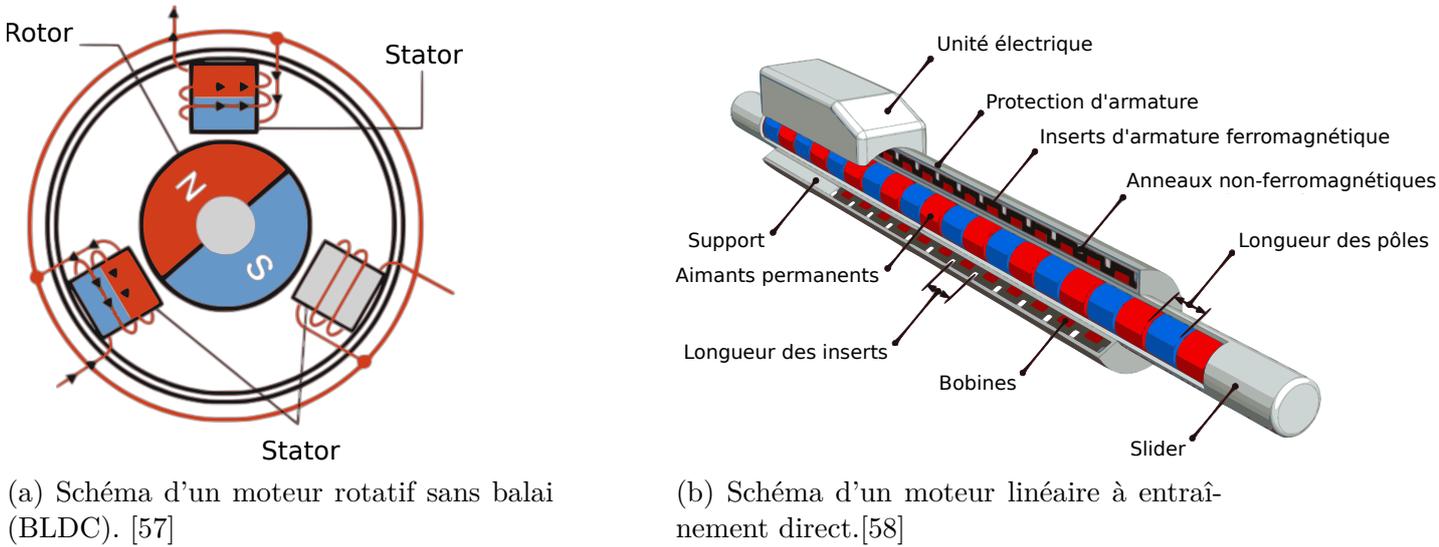


FIGURE 3.2 – Schémas d'un moteur rotatif et linéaire

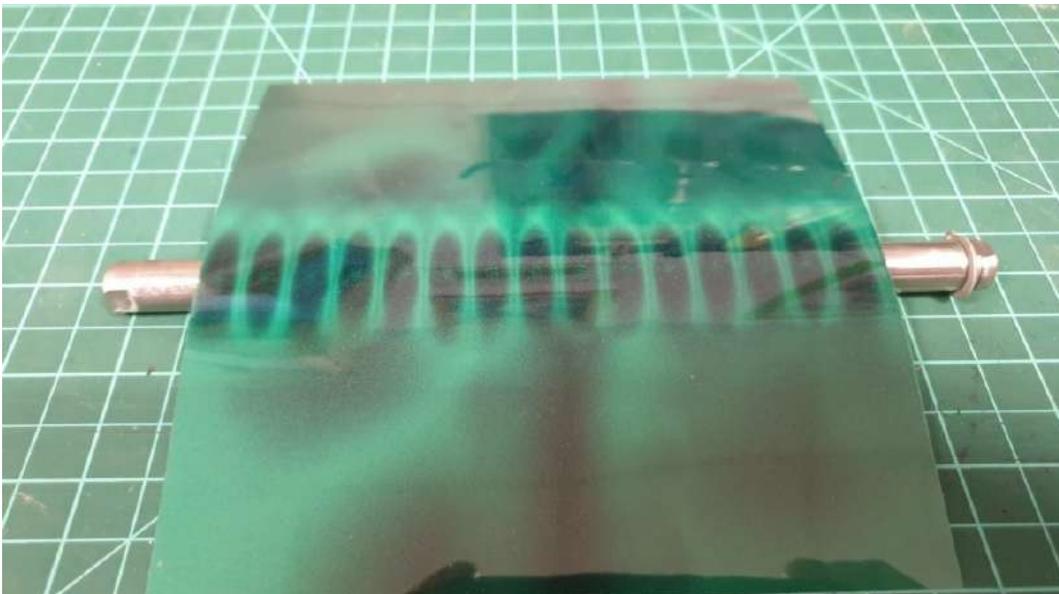


FIGURE 3.3 – Visualisation du champ magnétique du slider d'un moteur linéaire.

Un autre élément important est le positionnement possible de ce type d'actionneur. Contrairement à un moteur rotatif qui doit être placé au niveau de l'axe commandé, un

moteur linéaire produit un couple via un bras de levier, ce qui autorise un placement « plus libre ». On peut noter que le fonctionnement des moteurs linéaires est très similaire à celui du système musculaire humain qui ne fonctionne qu'en traction. Cependant, là où l'humain utilise des muscles antagonistes, un moteur linéaire est capable de fournir une force dans deux directions opposées, ce qui permet de n'utiliser potentiellement qu'un seul moteur par articulation.

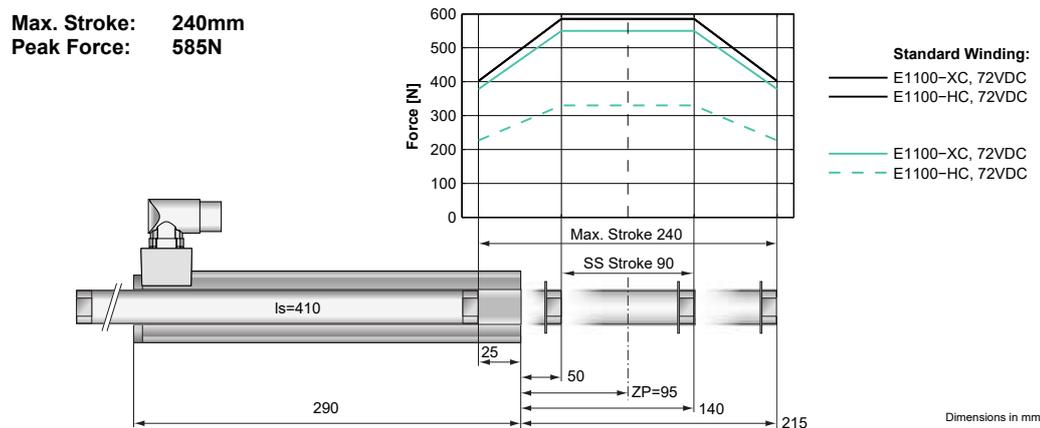


FIGURE 3.4 – Caractéristiques d'un moteur linéaire à entraînement direct standard (P01-48x240/30x240 De LinMot®).

Bien que les moteurs linéaires possèdent des propriétés intéressantes, ces derniers possèdent aussi quelques défauts. Une limite impactante est l'existence de zones de fonctionnement. En effet, lorsque le slider se déplace à l'intérieur du stator, il finit par sortir de ce dernier. Cela implique que plus le slider sort du stator, moins celui-ci sera impacté par le champ électromagnétique généré par le bobinage. Une conséquence directe est une perte de la force maximale générable en fonction de l'éloignement du slider par rapport au stator. Il existe une zone optimale de fonctionnement du moteur, où il sera possible de fournir la force maximale théorique (voir Fig.3.4). Une fois trop éloigné, une perte de force en sortie de l'actionneur se fait sentir. In fine, un moteur linéaire peut être assimilé à un moteur brushless déroulé. Enfin, un moteur linéaire à entraînement direct ne fournissant un couple que via un bras de levier (Fig.3.5), cela impose d'avoir un décalage entre l'axe de l'actionneur et l'articulation impactée. Pire, dès lors que les axes du moteur et de l'articulation se croisent, une singularité apparaît et empêche de fournir le moindre couple. Cette zone de fonctionnement ainsi que la présence de singularité sont donc des éléments critiques qui vont déterminer le positionnement des actionneurs, sous

peine d'être en incapacité de fournir la force requise à chaque instant.

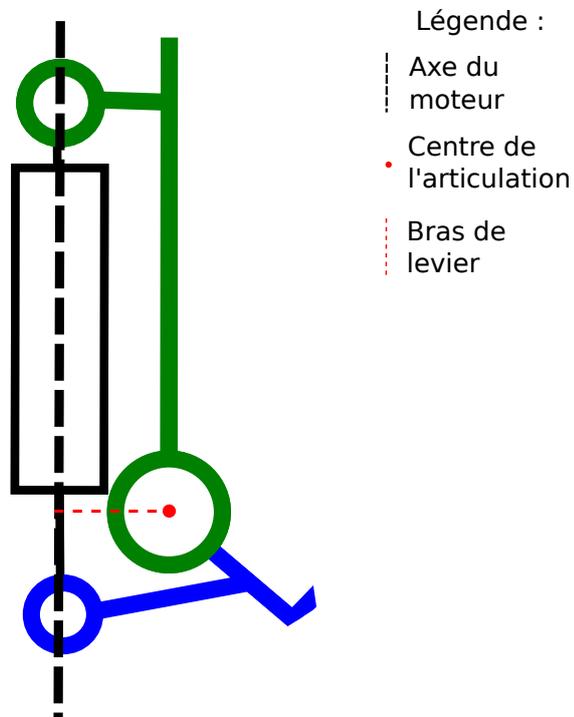


FIGURE 3.5 – Bras de levier d'un moteur linéaire

PROBLÉMATIQUE

Comme vu dans le chapitre sur l'état de l'art, il existe de multiples solutions afin de réaliser un robot marcheur. Chacune de ces solutions, déjà réalisées, se focalise généralement sur un aspect particulier : gestion des impacts, marche dynamique, saut, mouvement en 2 ou 3 dimensions, tout en essayant de conserver une certaine polyvalence. L'objectif général de ces travaux est de réaliser un robot ayant les deux caractéristiques suivantes :

1. anthropomorphe, c'est-à-dire ayant une architecture semblable au corps humain,
2. et capable de marcher dynamiquement.

Premièrement, pour réaliser une architecture anthropomorphe, il est nécessaire d'utiliser des actionneurs intégrables, c'est-à-dire que leurs caractéristiques techniques et physiques permettent d'envisager leur intégration à l'architecture. Cette relation est illustrée par la figure 4.1. Par exemple, un moteur rotatif d' $1m^3$ n'est pas intégrable pour actionner le genou d'un robot bipède de taille humaine. L'état de l'art propose différents actionneurs, tous intégrables, avec notamment des moteurs linéaires à vis-mère, hydrauliques, pneumatiques, ou encore rotatifs. Cette thèse choisit de se focaliser sur l'utilisation d'actionneurs linéaires à entraînement direct. Ces derniers sont évidemment intégrables. Ces moteurs permettent en outre un placement en dehors de l'axe de rotation de l'articulation, contrairement à un moteur rotatif. De plus, ce choix de moteur linéaire offre l'avantage d'envisager relativement facilement des positionnements en bi-articulation. À contrario, l'utilisation, par exemple, de moteurs rotatifs dans un système bi-articulaire, impliquerait le placement mécanique de systèmes de transmission supplémentaires.

Deuxièmement, concernant la marche dynamique, les actionneurs doivent nécessairement satisfaire les contraintes suivantes :

- une bonne réversibilité afin de gérer les impacts et perturbations,
- une vitesse et une accélération suffisamment grandes pour envisager ce type de mouvement.

Pour satisfaire ces contraintes, notre choix s'est porté sur les moteurs à entraînement direct qui bénéficient naturellement d'une bonne réversibilité. Les moteurs rotatifs sans balai sont des exemples de ce type de moteur. Attention, ce type d'actionneur ne doit pas être couplé à un réducteur, sous peine de perdre en réversibilité, même si cela permettrait une augmentation du couple. La figure 4.2 donne sous forme de diagramme de Venn les relations existantes entre ces différents ensembles.

La problématique principale consiste donc, pour réaliser notre prototype anthropomorphe capable de marche dynamique, à trouver une architectures ainsi qu'un positionnement des moteurs satisfaisant l'intersection des deux diagrammes montrés précédemment. La figure 4.3 illustre cette approche.

Les aspects formels tels que la réversibilité, la bi-articulation et la redondance, sont discutés dans ce chapitre. Sont ensuite présentées, les caractéristiques physiques et mécaniques des moteurs linéaires à entraînement direct que nous avons pré-sélectionnés. Finalement, l'ensemble des mouvements faisant partie de la famille des mouvements dynamiques est donné dans la section 4.4.

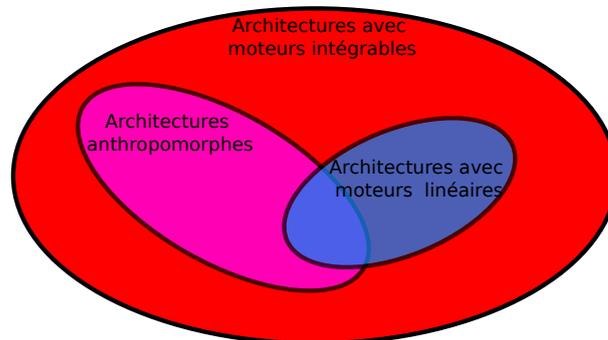


FIGURE 4.1 – Zone de recherche du premier objectif.

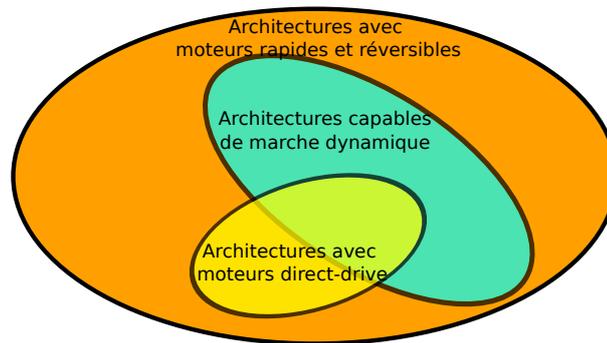


FIGURE 4.2 – Zone de recherche du second objectif.

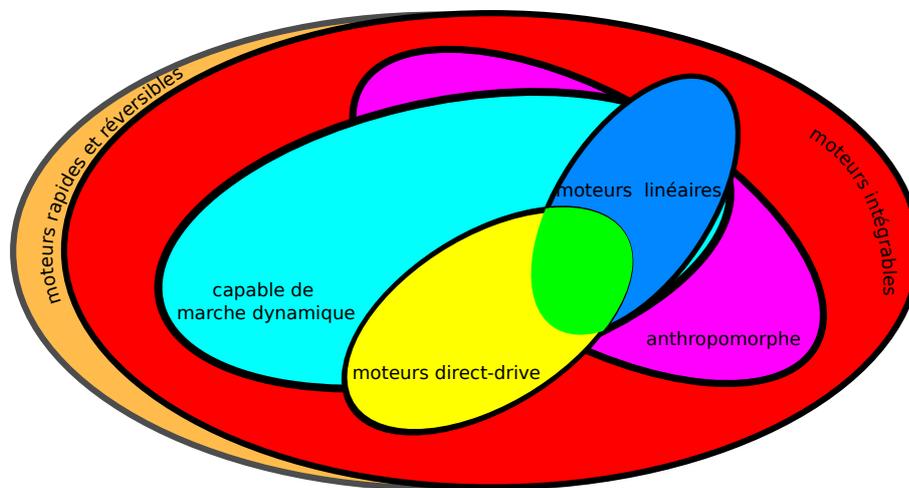


FIGURE 4.3 – Combinaison des zones de recherche des objectifs.

4.1 Réversibilité

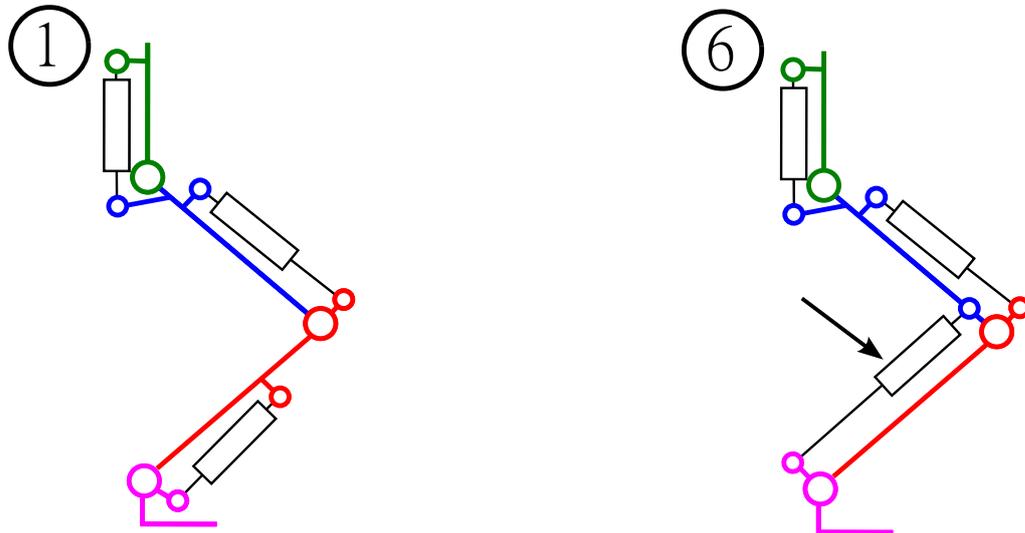
Une caractéristique importante des moteurs est leur nature réversible ou non, et plus exactement leur **réversibilité mécanique**. La notion de réversibilité peut être définie, comme proposée en [59], par « la facilité de transmission d'un mouvement généré à l'axe de sortie, de l'axe de sortie jusqu'à l'axe d'entrée ». Une formulation similaire est la capacité d'un système motorisé à être affecté en interne par une perturbation en sortie du système. Un robot actionné par des moteurs possédant une bonne réversibilité pourra plus facilement absorber un choc externe comme un impact avec le sol qu'un moteur peu réversible. La réversibilité d'un actionneur est donc une caractéristique importante, car il peut conduire à une limite matérielle d'absorption des perturbations. À l'inverse, prendre en compte la réversibilité dès la conception peut permettre d'améliorer significativement la robustesse aux perturbations. Il convient de ne pas confondre cette réversibilité mécanique

avec une réversibilité énergétique. En effet, ici, il n'est pas question d'une éventuelle capacité à accumuler de l'énergie pouvant être utilisée plus tard (à l'image d'une batterie de voiture se rechargeant lors d'un freinage), mais bien d'une capacité à recevoir une force extérieure sur le matériel en permettant au moteur de l'absorber directement. Seulement, la réversibilité est un aspect dont la définition varie dans la littérature, et est régulièrement laissée au second plan pour privilégier d'autres critères de performance, comme la vitesse de déplacement du robot ou bien le rapport masse/couple. Dans le cadre d'un actionneur électrique, deux éléments peuvent brider la réversibilité : les forces magnétiques liées au fonctionnement du moteur et les forces mécaniques (principalement les frottements). La force magnétique étant intrinsèque au fonctionnement d'un moteur électrique, cet élément est difficilement réductible. Cela n'est pas le cas des frottements mécaniques. Il est possible de réduire les frottements internes pour améliorer la réversibilité ainsi que les pertes énergétiques. Par exemple, un moteur rotatif est souvent utilisé en association avec un réducteur afin d'augmenter le couple en sortie. Seulement, c'est justement ce réducteur qui va induire une quantité importante de frottements. Pour effectuer un mouvement dynamique, la réversibilité constitue donc un critère important.

4.2 Bi-articularité

En plus de la réversibilité, un autre élément important est la possibilité (ou non) d'installer les moteurs en position bi-articulaire. En effet, il faut définir où et comment sont installés les actionneurs. Cela implique d'étudier la possibilité de recourir à des moteurs placés en position bi-articulaire. Cela correspond à une situation où un actionneur impacte deux articulations souvent consécutives (Fig.4.4b). Néanmoins, la bi-articulation est une stratégie encore peu étudiée. En effet, peu d'exemples sont disponibles dans la littérature [9][53], et sont généralement des choix réalisés en amont de la conception plutôt qu'après une comparaison avec des architectures sans bi-articularité. Ceci est dommageable, car la bi-articulation peut permettre la redistribution de forces/couples selon les besoins des articulations. Cette stratégie d'actionnement permet aussi de se rapprocher du modèle humain. Ce dernier ayant lui-même certains muscles impactant plusieurs articulations, comme les ischio-jambiers. Enfin, cela ouvre de multiples options concernant le nombre d'actionneurs. En prenant l'exemple d'une jambe, il est intéressant d'étudier l'utilisation d'un moteur impactant le genou et la cheville, à la manière des ischios-jambiers présent chez l'être humain. Globalement, la bi-articulation peut permettre d'obtenir un résultat

comparable à un doublement des actionneurs, le tout en limitant leur ajout. Ceci permet d'obtenir un compromis entre l'encombrement et les capacités du robot. Une première étude sur le sujet est proposée dans [60].



(a) Architecture sans moteur bi-articulaire.

(b) Architecture bi-articulaire (mollet).

FIGURE 4.4 – (a) architecture utilisant 3 moteurs en position mono-articulaire. (b) architecture avec le moteur inférieur en position bi-articulaire impactant les articulations genou/cheville.

Il est important de noter que l'utilisation de moteurs bi-articulaires ne doit pas être confondue avec l'ajout d'une redondance. En effet, il existe des architectures comme celle visible sur la figure 4.4b. Nous pouvons voir sur cet exemple que malgré l'utilisation d'un moteur placé en position bi-articulaire, il n'y a pas de sur-actionnement. En effet, nous avons 3 moteurs pour actionner 3 articulations. Le principal intérêt est de pouvoir obtenir une redondance localisée sur une articulation, pour pouvoir fournir une aide ponctuelle lorsque nécessaire, et cela sans rajouter d'actionneur. Enfin, il est parfaitement possible de combiner des moteurs en position bi-articulaire avec l'ajout d'une redondance pour augmenter encore les possibilités de répartition des efforts entre les différents actionneurs.

4.3 Redondance

Dans le prolongement de la bi-articularité, la redondance de l'actionnement est également un élément à prendre en compte pour le positionnement des moteurs. Lorsque celle-ci

est présente, elle consiste majoritairement à doubler le nombre de moteurs impactant une articulation. Il s'agit de la principale alternative pour obtenir un résultat comparable à la bi-articulation. Sur des robots comme ESCHER[30], SAFFIR[27] ou bien LOLA[24], l'objectif est souvent de renforcer l'articulation de la cheville. Le principal avantage de la redondance est de permettre de réduire l'effort maximum demandé aux actionneurs en permettant de répartir la charge[61]. Cependant, l'intégration de moteurs supplémentaires peut poser des problèmes en termes de réversibilité (si les moteurs doivent effectuer des mouvements contradictoires entre eux), et implique d'augmenter les forces/couples à fournir à cause de la masse supplémentaire induite. C'est dans cette situation que la bi-articulation permet d'envisager une redondance flexible. En effet, avec un moteur bi-articulaire impactant deux articulations, il peut être mis à contribution à la fois pour commander une articulation et fournir ponctuellement une assistance sur l'autre articulation impactée lorsque cela est nécessaire. Cela peut permettre de limiter l'ajout de moteurs lorsqu'un sur-actionnement devient obligatoire. Sur l'exemple de la figure 4.5b, la matrice de transformation reliant les forces produites par les actionneurs aux couples articulaires est une matrice de taille 3×5 . Les détails de modélisation de ce type d'architecture sont donnés dans le chapitre 5.

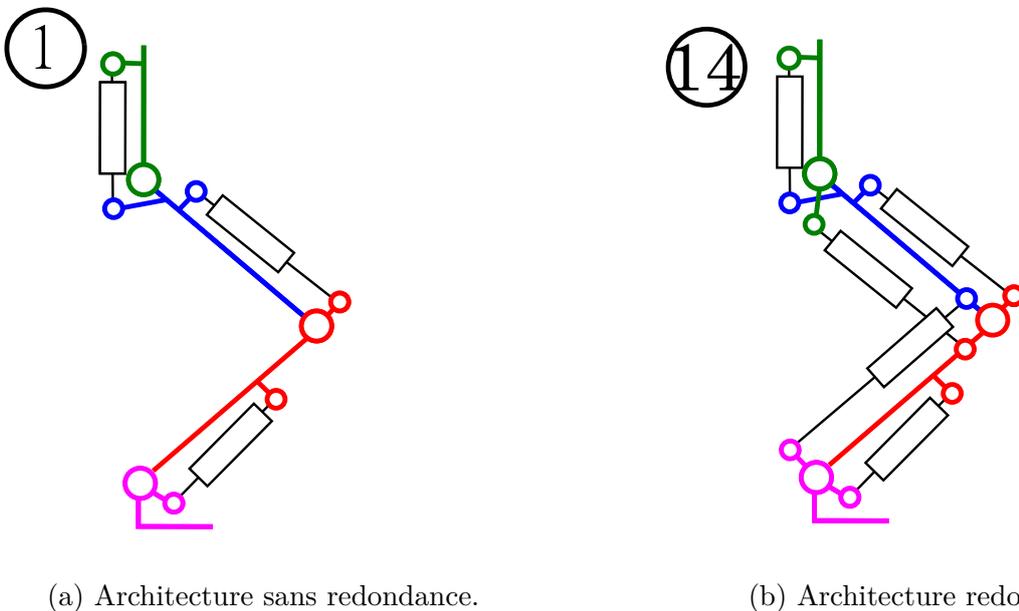


FIGURE 4.5 – (a) Architecture sans redondance et (b) un exemple d'architecture redondante.

4.4 Mouvements envisagés

Enfin, en plus de la stratégie d'actionnement du robot, il faut spécifier la nature des mouvements envisagés pour un robot bipède. L'objectif de la communauté étant la construction de robots ayant des capacités motrices avancées. Il est donc important de prendre en compte de multiples mouvements (marche, course, saut, squat, équilibre sur une jambe, ...). Nos travaux s'inscrivent dans cette ligne directrice : nous envisageons un ensemble de mouvements à la fois raisonnables et ambitieux, quitte à en exclure ou ajouter à posteriori. Concrètement, les données de mouvements peuvent être synthétiques ou bien issus de mesures (capteurs). Sur un autre axe, ces trajectoires peuvent être exprimées dans l'espace articulaire, ou dans un repère global de l'environnement. Par ailleurs, et pour simplifier, il est aussi possible de réduire le modèle en ignorant certaines articulations, ou encore en projetant un modèle 3D dans le plan sagittal du robot pour obtenir un modèle 2D. En effet, la gestion de mouvements en 3D amène une grande complexité, notamment par la prise en compte de la rotation du tronc ou bien de celle des jambes. Il est également possible qu'une trajectoire souhaitée ne soit pas réalisable mécaniquement. Dans ce cas, la trajectoire originale est modifiée pour s'accommoder aux capacités du robot. Par exemple, certains bipèdes actuels ne prennent pas en compte les impacts avec le sol, et évitent ce problème en contraignant le pied à atteindre le sol avec une vitesse nulle. Nous considérons donc comme un jalon important la réalisation dynamique de plusieurs mouvements planaires. Ainsi, cela suppose que les mouvements retenus soient compatibles entre eux avec une unique architecture.

La plupart des robots bipèdes utilisent le modèle d'un pendule inversé pour générer une trajectoire de marche stable. Une autre possibilité pour la génération de trajectoires est l'utilisation de trajectoires articulaires de sujets via la capture vidéo de mouvements, que cela soit pour l'humain[62] ou bien l'animal [71]. Ce choix permet théoriquement d'obtenir un mouvement le plus anthropomorphe possible puisqu'il reproduit directement celui d'un individu. Dans notre cas, ces trajectoires proviennent de sujets humains grâce à un système de capture de mouvements [63]. Plus précisément, le jeu de mouvements retenu se compose de mouvements de marche et course à différentes allures, ainsi que d'un mouvement de squat. Le détail des données utilisées est expliqué dans la section 5.4. On peut noter que ce travail de recherche est facilement transposable à un autre jeu de mouvements.

4.5 Conclusion

L'objectif final est de concevoir un robot bipède anthropomorphe capable de marche dynamique. Ce chapitre a permis d'expliquer que les moteurs linéaires à entraînement direct offrent le potentiel d'atteindre cet objectif. À partir de là, il reste à choisir l'architecture et le positionnement des actionneurs. Pour faire ce choix, nous avons décidé d'optimiser un critère sous contraintes. Pour formuler ce problème d'optimisation sous contraintes, plusieurs questions peuvent être mises en avant :

- Quelle architecture employer : combien de moteurs, où les positionner, leur nature (mono/biarticulaire) ?
- Une fois l'architecture fixée, quelle géométrie choisir, c'est-à-dire comment placer les accroches des moteurs ?
- Quel critère d'évaluation retenir (énergétique, de performance, etc.) ?

Ces questions amènent à écrire le problème d'optimisation sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} x &= \{A, P\} \\ \max f_\gamma(x) \\ h(x) &\leq 0 \end{aligned} \tag{4.1}$$

où x est le robot décrit par A son architecture et P sa géométrie, γ est la famille de mouvements retenue, f_γ est un critère qui reste à définir, et h une contrainte imposant des conditions nécessaires d'anthropomorphisme.

Des propositions de réponses à ces questions sont présentées dans le chapitre suivant, qui détaillent la méthodologie employée et les différents choix théoriques effectués.

DESIGN OPTIMAL ET CALCUL DE FORCE

Le chapitre 4 a présenté les différentes problématiques auxquelles nous tentons de répondre.

Ce chapitre définit les termes utilisés ainsi que les éléments théoriques pour modéliser et calculer les forces des actionneurs. Premièrement, le modèle utilisé est présenté. Deuxièmement, une définition des différents termes apparaissant dans le problème d'optimisation est donnée. Troisièmement, les différentes architectures évaluées sont présentées. Les éléments théoriques nécessaires au calcul de la force des moteurs sont explicités. Enfin, le simulateur mis en place est expliqué ainsi que les différentes hypothèses posées et les choix sous-jacents.

5.1 Modélisation

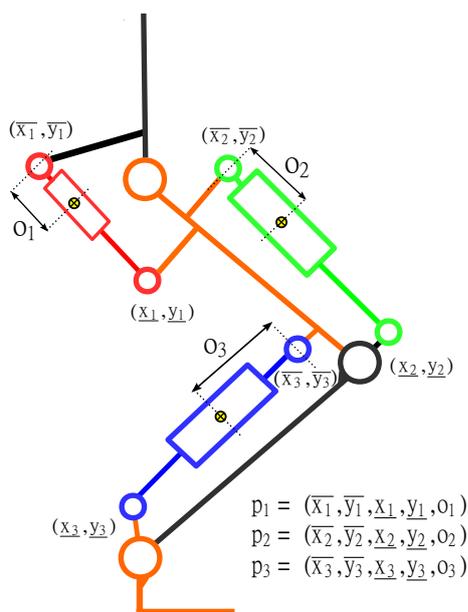


FIGURE 5.1 – Modélisation d'une architecture de jambes, et paramètres géométriques.

L'objectif étant la réalisation d'un robot bipède marcheur, le modèle utilisé se base sur le système locomoteur humain. Pour cela, les trois articulations d'une jambe sont considérées, à savoir la hanche, le genou et la cheville. Pour les dimensions de chaque membre, les valeurs d'un sujet humain sont repris (Tableau 5.1). Cela abouti au modèle visible sur la figure 5.1.

- $(\bar{x}_i, \bar{y}_i) \in [a_i, b_i] \times [c_i, d_i]$ le point d'accroche supérieur,
- $(\underline{x}_i, \underline{y}_i)$ le point d'accroche inférieur,
- et $o_i \in [e_i, f_i]$ le décalage de chaque moteur.

Ces grandeurs forment pour chaque moteur $p_i = (\bar{x}_i, \bar{y}_i, \underline{x}_i, \underline{y}_i, o_i)$, un vecteur combinant les positions 2D des points de fixation et le décalage.

Pour simplifier le modèle et les calculs associés, nous restons sur un robot planaire ne pouvant marcher qu'en ligne droite. Il est important de préciser que le modèle présenté ne montre qu'une seule jambe, mais que le robot en possède bien deux. Nous supposons que les deux jambes sont symétriques l'une par rapport à l'autre. Ceci est bien pris en compte lors de l'évaluation du bipède sur une trajectoire donnée. Concernant les moteurs, ces derniers sont définis le long des membres du modèle par un positionnement dans le plan de leurs points d'accroche, ainsi que par l'élongation initiale des actionneurs.

Segment	Length (m)	Mass (kg)
Head	0.275	3.838
Upper arm	0.248	1.282
Lower arm	0.245	1.061
Thorax	0.228	15.067
Pelvis	Along Y : 0.124 Along Z : 0.187	8.364
Thigh	0.380	8.332
Shank	0.358	2.573
Foot	Along X : 0.121 Along Y : 0.054 Along Z : 0.034	0.570

TABLE 5.1 – Tableau des paramètres HuMoD pour les différents membres.

5.2 Terminologie

Comme mentionné plus tôt, il est important de définir certains termes qui apparaissent régulièrement. Plus spécifiquement, nous allons définir les termes *architecture*, *géométrie* ainsi que *configuration*.

5.2.1 Architecture

Dans ce manuscrit, l'*architecture* est une notion topologique qui renvoie au nombre de moteurs utilisés ainsi qu'à leur champ d'action, c'est-à-dire au nombre d'articulations impactées par un moteur. La figure 5.2 illustre cette définition : l'architecture 1 possède 3 moteurs, tous en position mono-articulaire. Sur cette même figure, on peut également observer l'architecture 6, qui possède aussi 3 moteurs, mais avec le moteur inférieur en position bi-articulaire, et les 2 autres en position mono-articulaire. La combinaison du nombre de moteurs ainsi que la/les articulation(s) impactée(s) correspond donc à l'architecture de la jambe robotique. Il existe un grand nombre d'architectures utilisant 3 moteurs et permettant d'actionner les 3 articulations (cheville, genou, hanche). Certaines d'entre elles ne sont pas anthropomorphes, en effet un moteur reliant le pelvis au pied ne correspond à aucun muscle du corps humain. La liste exhaustive des 8 architectures anthropomorphes utilisant 3 moteurs est présentée sur la figure 5.2.

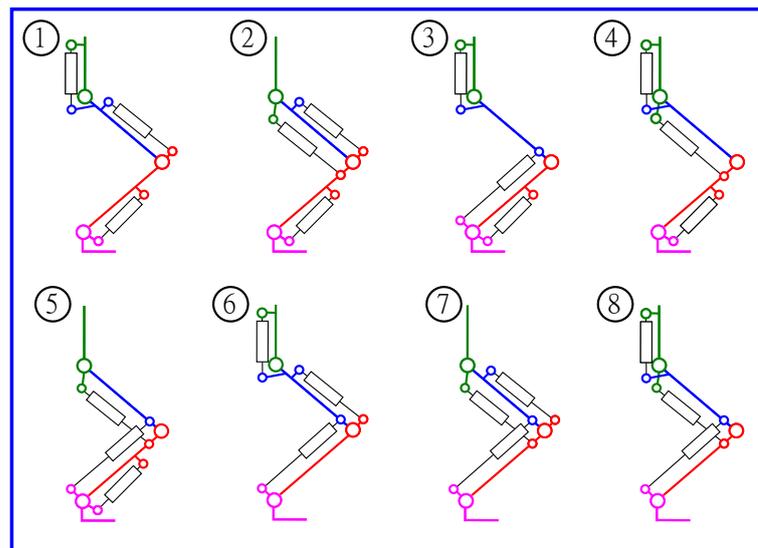


FIGURE 5.2 – Liste exhaustive des architectures anthropomorphes utilisant 3 moteurs linéaires.

Pour chacune de ces architectures, la matrice de transformation reliant les forces des actionneurs aux couples articulaires est une matrice 3×3 . De plus, la seule architecture possédant une matrice diagonale est l'architecture 1.

5.2.2 Géométrie

Une fois l'architecture définie, il convient de discuter de la *géométrie*. La géométrie se réfère uniquement au positionnement métrique des moteurs sur les jambes. En effet, même lorsque le nombre et le champ d'action des moteurs sont fixés, il existe encore de multiples possibilités de positionnement des actionneurs. Par exemple, pour un moteur mono-articulaire impactant le genou, cela peut prendre la forme d'un moteur plus ou moins proche du membre, ou bien situé devant ou derrière. Il est aussi possible de positionner librement l'actionneur autour du fémur, notamment au-dessus ou en dessous, ce qui revient à imiter le fonctionnement des quadriceps ou des ischio-jambiers selon la situation. Deux exemples de géométries possibles pour la même architecture sont présentés sur la figure 5.3. Sur ces deux exemples, chacun des moteurs est en position mono-articulaire, mais placé différemment relativement aux articulations.

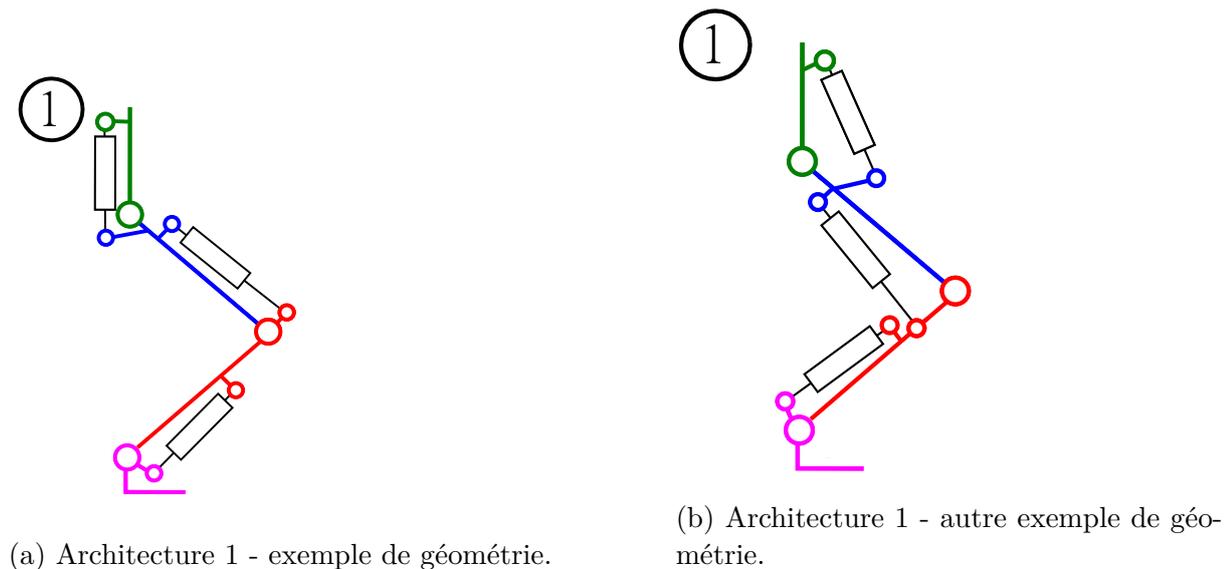


FIGURE 5.3 – Deux exemples de géométries possibles pour l'architecture 1.

5.2.3 Configuration

Enfin, les *configurations* vont concerner les positions articulaires du robot bipède à un instant donné. La configuration correspond au positionnement global dans lequel se trouve la jambe, par exemple en extension totale ou bien en position de squat. Contrairement à l'architecture et à la géométrie, la configuration est l'unique élément évoluant au cours d'un mouvement. Chaque instant de ce mouvement est retranscrit comme une configuration différente. En d'autres termes, un mouvement est une succession d'une infinité de configurations. Formellement, on notera la configuration du robot à l'instant t par $q(t)$. La figure 5.4 présente une jambe robotique dans 3 configurations différentes $q(t_1)$, $q(t_2)$, et $q(t_3)$. Comme cette jambe possède 3 articulations, la configuration $q(t)$ est un vecteur de la forme $(q_1(t), q_2(t), q_3(t))$.

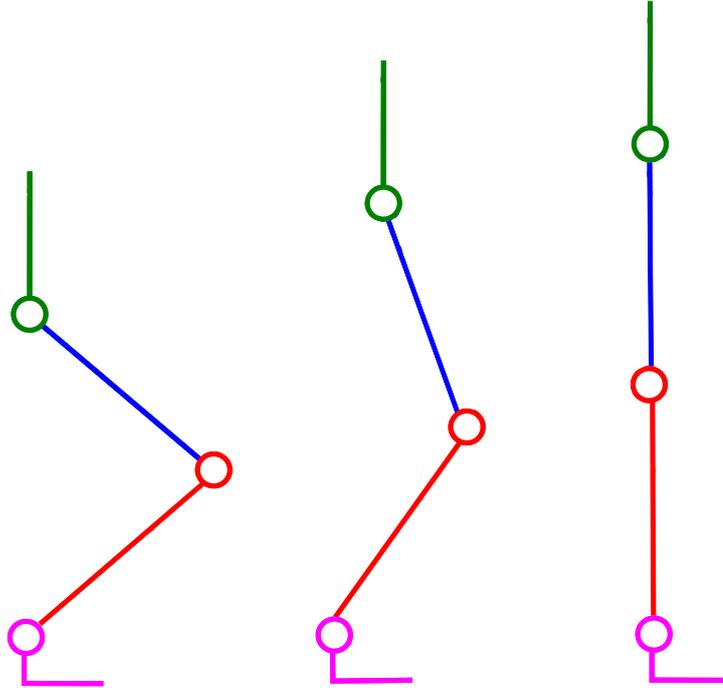


FIGURE 5.4 – Différentes configurations lors d'un mouvement d'extension.

5.3 Architectures et géométries admissibles

L'usage de moteurs linéaires étant notre hypothèse de travail, il convient de déterminer l'architecture et la géométrie optimales à leur utilisation. En effet, avec de tels moteurs, la rotation de l'articulation se fait via l'élongation de l'actionneur. La force est transmise

par bras de levier à l'articulation pour générer le couple désiré. Nous devons donc choisir judicieusement le placement des points d'accroche des actionneurs. Afin de respecter la contrainte d'anthropomorphisme, les principes suivants ont été retenus :

- d'un point de vue bio-mimétique, on s'attache à placer les moteurs dans des positions similaires aux muscles du corps humain,
- le nombre de moteurs est limité dans le but de maintenir un encombrement acceptable, ceci même pour les cas avec redondance bi-articulaire,
- nous prenons comme hypothèse de ne pas doubler les moteurs, pour là-encore limiter l'encombrement et la masse.

Ces trois principes conduisent naturellement à préserver un aspect similaire à une jambe humaine, et constituent de fait la contrainte h de l'équation 6.1. De plus, ces principes imposent au maximum un moteur mono-articulaire pour chaque articulation de la hanche, du genou et de la cheville. Ils autorisent aussi potentiellement deux moteurs en position bi-articulaire qui impactent les paires d'articulations (hanche, genou) et (genou, cheville) respectivement. Ces principes impliquent un maximum de 5 moteurs par architecture. De ces principes, on peut donc déduire de façon exhaustive 14 architectures candidates. Ces architectures peuvent être obtenues à partir des 8 architectures non-redondantes présentées dans [60] et en ajoutant 6 architectures avec redondance. Les architectures numérotées 9 à 13 possèdent chacune 4 moteurs, et l'architecture 14 en possède 5. La liste exhaustive des 14 architectures considérées comme anthropomorphes est visible sur la Fig. 5.5. Cette liste peut également être présentée sous forme de table de vérité (voir Fig. 5.6).

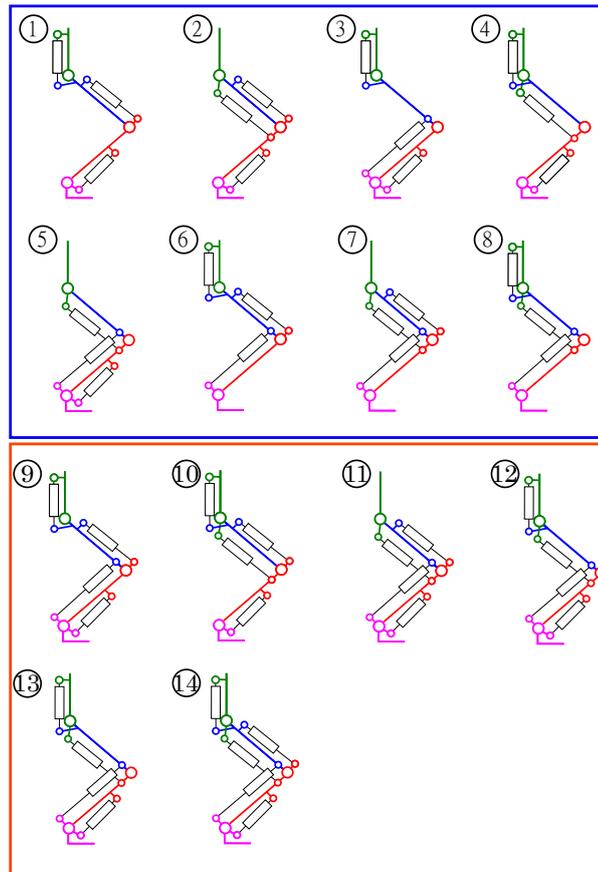


FIGURE 5.5 – Architectures étudiées (1 à 8 : non-redondant / 9 à 14 : redondant).

	Hip	Knee	Ankle	Hip-knee	Knee-ankle	Architecture
3 moteurs	■	■	■			1
		■	■	■		2
	■		■		■	3
	■	■	■			4
			■	■	■	5
	■	■			■	6
		■		■	■	7
	■			■	■	8
4 moteurs	■	■	■		■	9
	■	■	■	■		10
		■	■	■	■	11
	■		■	■	■	12
	■	■		■	■	13
5 moteurs	■	■	■	■	■	14

FIGURE 5.6 – Les moteurs utilisés dans les différentes architectures.

Cependant, il reste à optimiser pour chaque architecture les points d'accroche des moteurs sur les segments du bipède, c'est-à-dire à déterminer la géométrie optimale. Cela a son importance car pour une architecture donnée, la géométrie conditionne la capacité à réaliser le mouvement requis tout en respectant les principes bio-mimétique précédents. L'enjeu est donc de trouver une géométrie respectant l'anthropomorphisme et capable de suivre une trajectoire. Cela amène à définir une zone autour de chaque membre dans laquelle les points d'accroche doivent être placés afin de respecter l'anthropomorphisme (voir Fig.6.8). Cette zone, vue comme une contrainte d'un problème de décision, peut également intégrer les caractéristiques des moteurs linéaires sélectionnés (voir Fig.3.4). On peut noter qu'il n'est pas facile d'obtenir une solution à l'intérieur de cette zone de recherche, de par la présence de potentielles singularités. En effet, lorsque l'axe du moteur est aligné avec l'axe de rotation de l'articulation, aucune force ne peut engendrer un couple. Cela rajoute une complexité supplémentaire, car il faut s'assurer que le moteur puisse fournir le couple requis à chaque instant. La figure 5.7 montre deux exemples de configurations avec et sans singularité ainsi que le bras de levier disponible dans chaque cas.

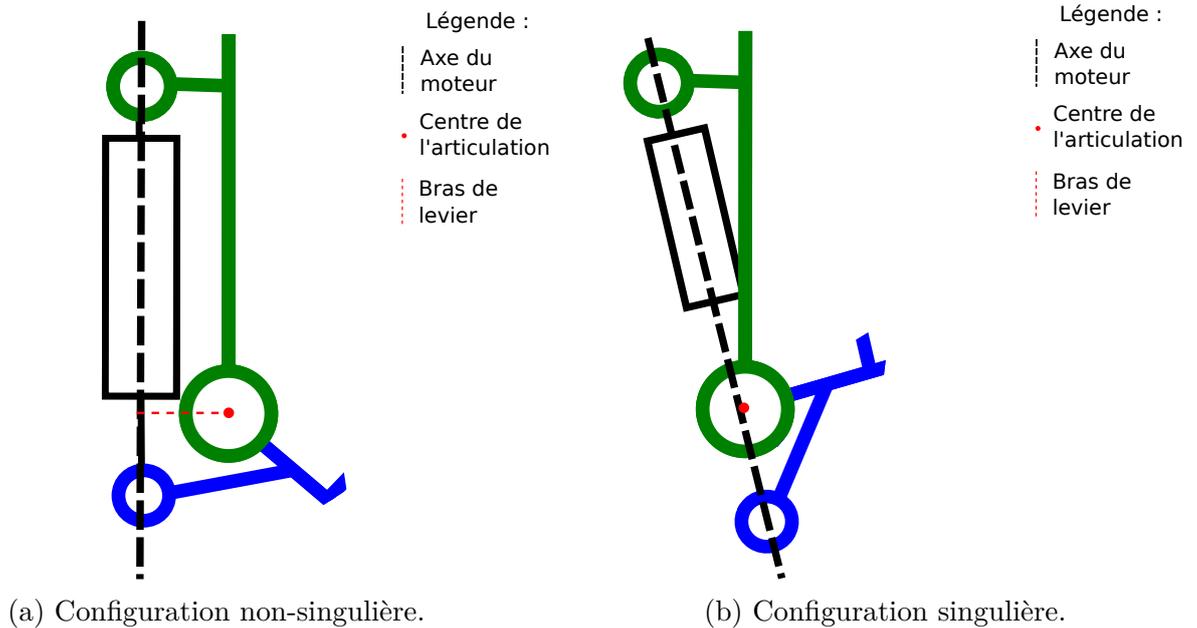


FIGURE 5.7 – Configurations non-singulière et singulière

5.4 Mouvements étudiés

Notre objectif est d'obtenir l'architecture la plus adaptée parmi celle pré-sélectionnées ainsi que sa géométrie optimale afin de réaliser un mouvement donné. Comme le franchissement (ou non) de singularité ainsi que les couples requis vont dépendre des mouvements sélectionnés, l'étude portera sur un ensemble de déplacements. Cet ensemble de mouvements provient de la base de données HuMoD [63], réalisée à partir de sujets humains, ici un homme et une femme. Chaque sujet a réalisé plusieurs mouvements tels que la marche, la course et le squat. Ces mouvements ont été enregistrés grâce à un système de capture de mouvement et un tapis roulant instrumenté avec des capteurs de forces. Ces mesures ont permis de reconstituer temporellement les angles articulaires des sujets. Ces données sont complétées par l'estimation des masses de chaque segment composant la modélisation du corps humain. Pour chaque mouvement, nous avons donc accès aux 36 positions articulaires, ainsi qu'à leurs vitesses et accélérations approximatives. Cet ensemble inclut un mouvement de squat, ainsi que des mouvements de marche et de course à plusieurs allures afin d'avoir suffisamment de scénarios possibles pour un robot bipède. Nos travaux s'appuient sur le modèle féminin disponible dans HuMoD (57.3 kg pour 1.61 m), ainsi que sur les mouvements de squats, de marche allant de 1 m/s à 2 m/s, et enfin de course à

2 m/s. Les longueurs des différents segments ainsi que leurs masses estimées sont présentées dans le tableau (3.1). On peut noter que les mesures présentées sont une moyenne entre les membres droits et gauches, les différents membres pouvant présenter une légère asymétrie. Formellement, cet ensemble de mouvements représente un des paramètres, que nous noterons γ , de l'algorithme d'optimisation qui sera présenté dans la section 6.1.

5.5 Modèle

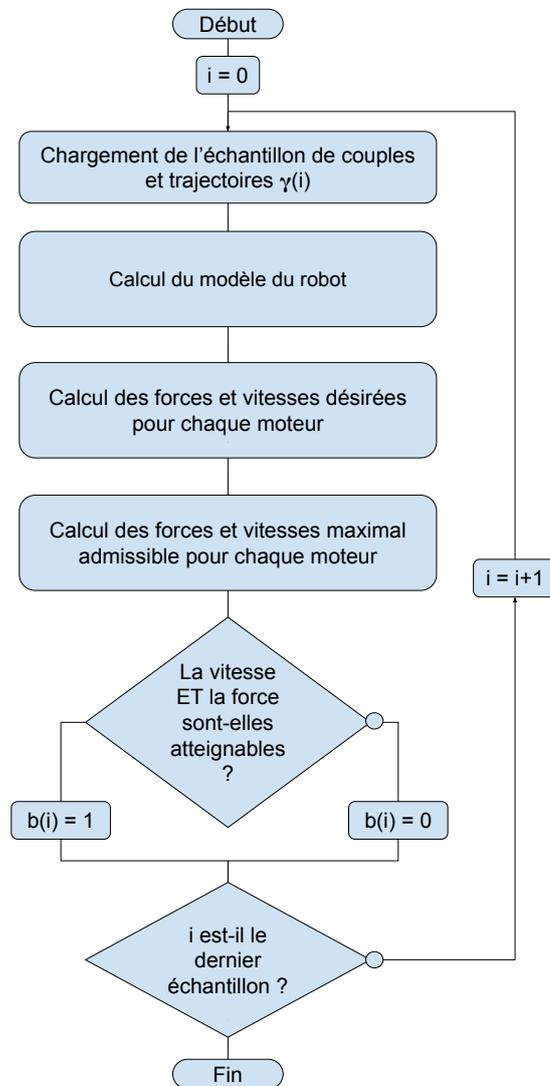


FIGURE 5.8 – Organigramme simplifié du simulateur.

La figure 5.8 présente une version simplifiée de l'algorithme permettant d'estimer la faisabilité d'une géométrie sur une trajectoire donnée. Une version plus détaillée sera présentée ultérieurement (figure 5.14). Pour chaque échantillon de trajectoire, les couples et les vitesses désirés sont calculés. Ils sont alors respectivement comparés à la vitesse maximale et à la force maximale que peut atteindre le moteur. Le résultat de cette comparaison est affecté à un booléen b qui représente la faisabilité de la géométrie sur un échantillon de trajectoire. Afin de pouvoir calculer cet ensemble de vitesses et de forces, il est nécessaire d'exprimer le modèle du robot.

5.5.1 Jacobienne

En robotique, la jacobienne définit classiquement la relation entre les vitesses articulaires et la vitesse cartésienne de l'organe terminal du robot considéré (dans notre situation, il s'agirait du pied). Dans nos travaux, une matrice jacobienne notée J est définie, mais dans le sens général du terme. C'est-à-dire qu'il s'agit *d'une matrices des dérivées partielles du premier ordre d'une fonction vectorielle en un point donné*. Ici, la matrice jacobienne J définit la relation entre les vitesses angulaires des articulations et les vitesses linéaires des points d'application de la force des moteurs, qui s'écrit sous la forme :

$$V_{motors} = J(P, q) \frac{dq}{dt}, \quad (5.1)$$

avec

- V_{motors} le vecteur des vitesses linéaires des actionneurs
- P la géométrie telle que définie à la section 5.2.2
- q la configuration telle que définie à la section 5.2.3
- J la matrice jacobienne
- $\frac{dq}{dt}$ le vecteur des vitesses articulaires.

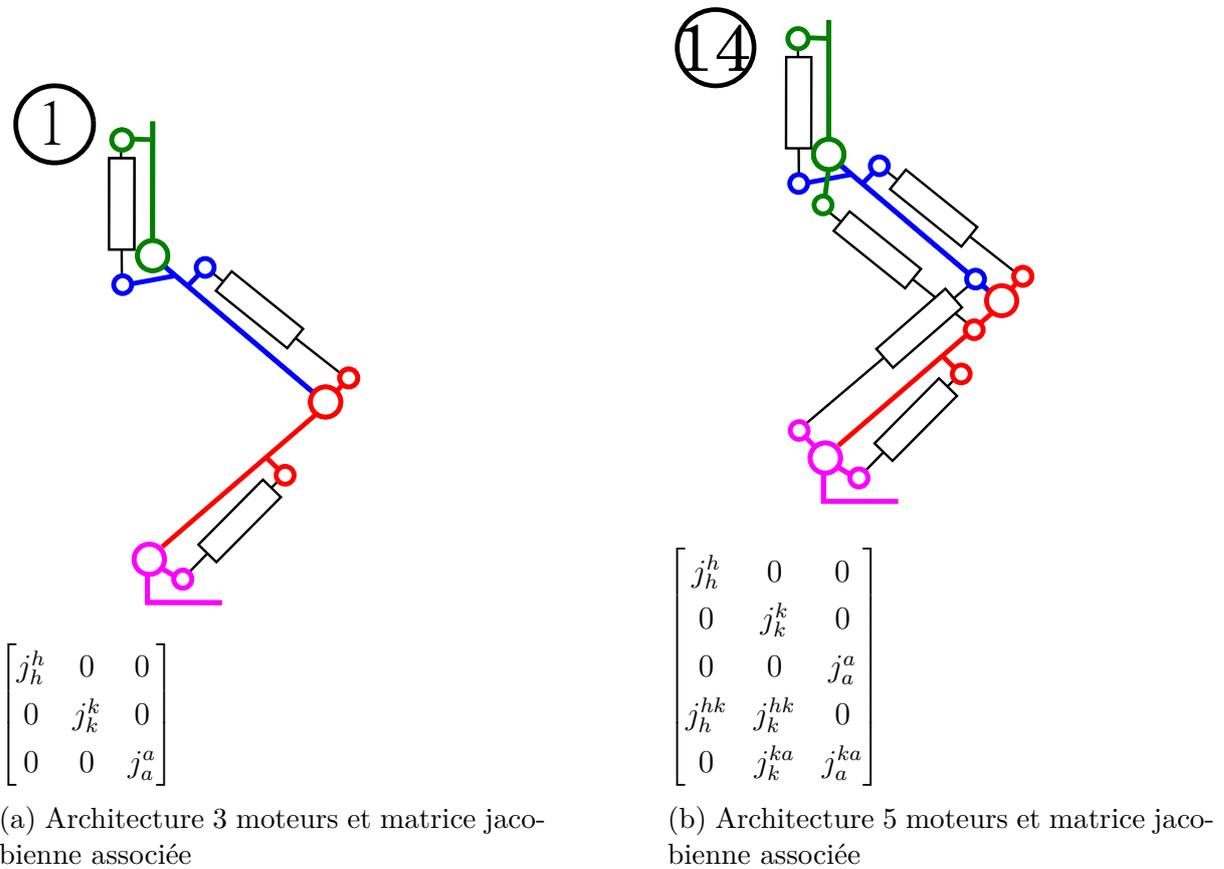
Par soucis de clarté, la suite du manuscrit notera la matrice jacobienne $J(P, q)$ simplement J . Comme expliqué dans [60], lorsque tous les moteurs sont considérés, la relation entre les couples articulaires et les forces correspondantes des moteurs s'écrit comme une matrice de transformation et prend la forme :

$$\begin{bmatrix} V_{motors}^h \\ V_{motors}^k \\ V_{motors}^a \\ V_{motors}^{hk} \\ V_{motors}^{ka} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_h^h & 0 & 0 \\ 0 & j_k^k & 0 \\ 0 & 0 & j_a^a \\ j_h^{hk} & j_k^{hk} & 0 \\ 0 & j_k^{ka} & j_a^{ka} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{dq_h}{dt} \\ \frac{dq_k}{dt} \\ \frac{dq_a}{dt} \end{bmatrix}, \quad (5.2)$$

avec

- V_{motors}^m la vitesse linéaire du point d'application de la force du moteur m
- j_n^m la relation individuelle entre la vitesse angulaire de l'articulation n et la vitesse linéaire du moteur m
- $\frac{dq_n}{dt}$ la vitesse angulaire de l'articulation n .

On peut noter que cette matrice 5×3 représente l'architecture 14, c'est-à-dire celle ayant cinq moteurs pour actionner 3 articulations. Par ailleurs, cette matrice est aussi générique pour l'ensemble des architectures considérées ici. En effet, comme les autres architectures peuvent être obtenues en supprimant un ou plusieurs moteurs, la matrice de transformation J associée peut être obtenue en retirant la ou les lignes correspondantes aux moteurs retirés. Finalement, la taille de la matrice permet directement de distinguer les architectures non-redondantes à trois moteurs (donc une matrice carrée 3×3) des architectures redondantes à quatre ou cinq moteurs (donc une matrice 4×3 ou 5×3 selon l'architecture, voir Fig.5.9).

FIGURE 5.9 – Influence de l'architecture sur la matrice jacobienne J .

5.5.2 Transposée de la jacobienne

Chacun des termes de la matrice J provient de l'équation (5.1), qui donne la relation entre la vitesse articulaire et la vitesse linéaire du moteur associé. En supposant le cas d'un moteur monoarticulaire impactant une articulation, cela donne :

$$V_{moteurs}^m = j_n^m \frac{dq_n}{dt}, \quad (5.3)$$

Avec j_n^m le ratio entre la vitesse articulaire et la vitesse linéaire du moteur. Dans un système à bras de levier comme celui-ci, l'inverse de j_n^m représente le ratio entre la force exercée par l'actionneur et le couple articulaire produit. À partir de l'équation précédente, on peut exprimer la relation entre la force du moteur et le couple articulaire généré :

$$F_{motors}^m = \frac{1}{j_n^m} \Gamma_n, \quad (5.4)$$

ou encore

$$\Gamma_n = j_n^m F_{motors}^m. \quad (5.5)$$

De la même manière que pour la jacobienne J (5.2), il est possible d'exprimer la relation entre l'ensemble des couples articulaires et des forces des actionneurs sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \Gamma_h \\ \Gamma_k \\ \Gamma_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_h^h & 0 & 0 & j_h^{hk} & 0 \\ 0 & j_k^k & 0 & j_k^{hk} & j_k^{ka} \\ 0 & 0 & j_a^a & 0 & j_a^{ka} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_h \\ F_k \\ F_a \\ F_{hk} \\ F_{ka} \end{bmatrix}, \quad (5.6)$$

Cette matrice de transformation correspond à la transposée de la matrice jacobienne J , ce qui permet d'écrire :

$$\Gamma = J^T F \quad (5.7)$$

Il peut être souligné que l'utilisation de moteurs bi-articulaires ne modifie pas la méthodologie du modèle. En effet, lorsqu'un moteur bi-articulaire génère une force, une force de réaction opposée à celle-ci et de même intensité est également produite. Cependant, les couples engendrés ne seront pas les mêmes. Ils vont dépendre des bras de levier avec l'articulation impactée, c'est-à-dire les paramètres P et q de la jacobienne $J(P, q)$. La figure 5.10 ci-dessous montre un moteur placé en configuration bi-articulaire.

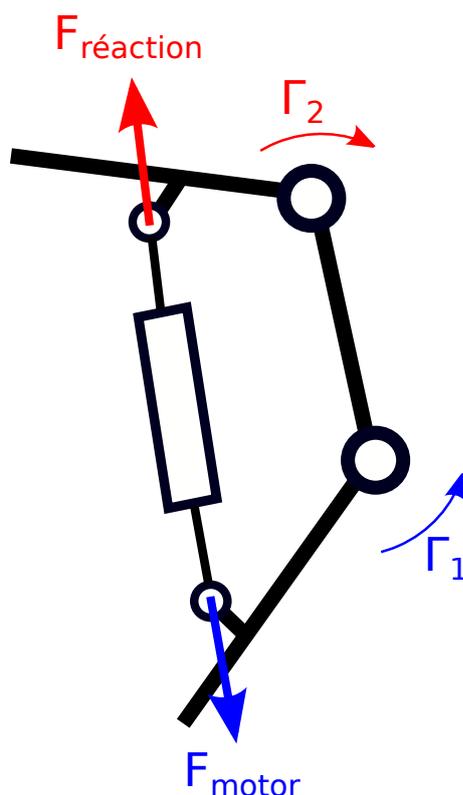


FIGURE 5.10 – Représentation d’un moteur bi-articulaire et forces générées.

En analysant la figure ci-dessus, nous pouvons constater que le couple moteur Γ_1 peut être exprimé en fonction de la force F_{motor} , et cela indépendamment du couple Γ_2 et de la force de réaction $F_{réaction}$. De manière similaire, le couple Γ_2 s’exprime en fonction de $F_{réaction}$, qui est opposée à F_{motor} . Finalement, le calcul des termes de la jacobienne se réduit aux calculs des relations individuelles couples/forces ou vitesses linéaires/vitesses angulaires qui doivent être identiques.

5.5.3 Calcul des termes j_n^m

Cette sous-section se focalise sur le calcul des termes de la matrice jacobienne J , pour calculer la relation entre Γ et F , nécessaire au calcul du critère d’optimisation (voir Fig 5.11). Cette relation peut être obtenue via le calcul d’un bras de levier qui correspond au terme j_n^m .

Les éléments suivants présentent pour une articulation la relation entre la géométrie P , la configuration q et la force requise $F(t)$ permettant de générer le couple $\Gamma(t)$. Comme expliqué dans la partie 5.5.2, les expressions des termes j_n^m pour un moteur bi-articulaire

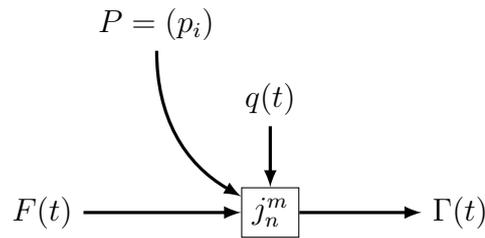


FIGURE 5.11 – Relation entre Γ et F .

sont identiques à celles des moteurs mono-articulaires. Nous allons donc considérer le cas d'un moteur mono-articulaire. Nous fixons deux repères placés au centre de l'articulation. Le premier repère R_1 appartient au membre au dessus de l'articulation, et permet de fixer la première accroche du moteur au point A . Le second repère R_2 appartient au membre situé sous l'articulation et sert de référentiel pour les coordonnées du second point d'accroche au point B . Une fois les deux repères placés, nous définissons l'angle Θ entre les deux repères, qui correspond également à la position angulaire de l'articulation. L'ensemble de ces variables est visible sur la Fig.5.12.

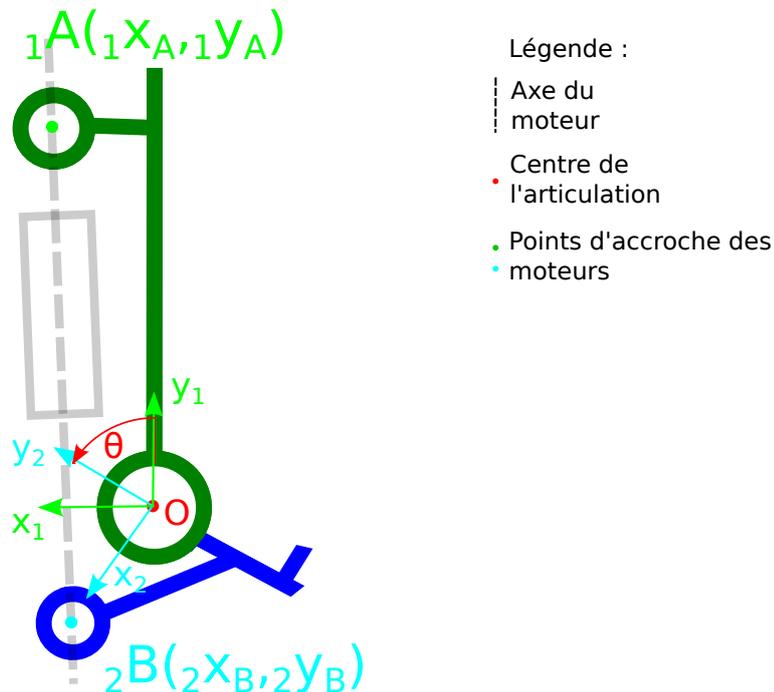


FIGURE 5.12 – Modélisation du calcul de force d'un moteur monoarticulaire pour une articulation.

À titre indicatif, le calcul de l'angle articulaire selon l'élongation du moteur ainsi que

le problème inverse est disponible dans l'annexe A. Pour rappel, la relation entre la force et le couple est donné par :

$$\Gamma_n = j_n^m F_{motor}^m. \quad (5.8)$$

Comme Γ provient des trajectoires pré-sélectionnées, il ne reste qu'à déterminer j_n^m . Comme expliqué précédemment, ce coefficient correspond au bras de levier et s'écrit :

$$j_n^m = \frac{\|\overrightarrow{OA} \times \overrightarrow{AB}\|}{\|\overrightarrow{AB}\|}, \quad (5.9)$$

avec les points O , A , et B décrits par la figure (5.12).

Dans la Figure 5.12, nous avons donc le point A de coordonnées $({}_1x_A, {}_1y_A)$ exprimé dans le repère R_1 , et le point B de coordonnées $({}_2x_B, {}_2y_B)$ exprimé dans le repère R_2 . Nous utilisons ici la notation nX qui signifie que l'élément X est exprimé dans le repère n . Comme chaque point est exprimé dans un repère différent, il faut d'abord les ramener dans un repère commun. Ici, nous choisissons de réécrire B dans le repère R_1 . Les deux repères R_1 et R_2 ayant la même origine, cette réécriture peut être réalisée avec une matrice de rotation autour de l'axe z :

$$\begin{bmatrix} {}_2x_B \\ {}_2y_B \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}_1x_B \\ {}_1y_B \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

Ce qui donne les coordonnées suivantes :

$$\begin{aligned} {}_1A &= ({}_1x_A, {}_1y_A) \\ {}_1B &= ({}_2x_B \cos(\theta) - {}_2y_B \sin(\theta), {}_2x_B \sin(\theta) - {}_2y_B \cos(\theta)) \end{aligned} \quad (5.11)$$

Une fois cela fait, on peut calculer les différents termes de l'équation 5.9. O étant le centre de l'articulation et des repères. Pour le vecteur \overrightarrow{AB} , nous pouvons exprimer les vecteurs \overrightarrow{OA} et \overrightarrow{AB} dans le repère R_1 :

$$\overrightarrow{AB} = ({}_2x_B \cos(\theta) - {}_2y_B \sin(\theta) - {}_1x_A, {}_2x_B \sin(\theta) - {}_2y_B \cos(\theta) - {}_1y_A) \quad (5.12)$$

Maintenant nous calculons le produit vectoriel $\overrightarrow{OA} \times \overrightarrow{AB}$:

$$\begin{aligned}
 \vec{OA} \times \vec{AB} &= \begin{bmatrix} {}_1x_A \\ {}_1y_A \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} {}_2x_B \cos(\theta) - {}_2y_B \sin(\theta) - {}_1x_A \\ {}_2x_B \sin(\theta) - {}_2y_B \cos(\theta) - {}_1y_A \\ 0 \end{bmatrix} \\
 \vec{OA} \times \vec{AB} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ {}_1x_A {}_2x_B \sin(\theta) + {}_1x_A {}_2y_B \cos(\theta) - {}_1x_A {}_1y_A - \\ {}_1y_A {}_2x_B \cos(\theta) + {}_1y_A {}_2y_B \sin(\theta) + {}_1x_A {}_1y_A \end{bmatrix} \quad (5.13) \\
 \vec{OA} \times \vec{AB} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ {}_1x_A {}_2x_B \sin(\theta) + {}_1x_A {}_2y_B \cos(\theta) - \\ {}_1y_A {}_2x_B \cos(\theta) + {}_1y_A {}_2y_B \sin(\theta) \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Ce qui donne pour sa norme :

$$\|\vec{OA} \times \vec{AB}\| = \sqrt{({}_1x_A {}_2x_B \sin(\theta) + {}_1x_A {}_2y_B \cos(\theta) - {}_1y_A {}_2x_B \cos(\theta) + {}_1y_A {}_2y_B \sin(\theta))^2} \quad (5.14)$$

Suivi par $\|\vec{AB}\|$:

$$\|\vec{AB}\| = \sqrt{({}_2x_B \cos(\theta) - {}_2y_B \sin(\theta) - {}_1x_A)^2 + ({}_2x_B \sin(\theta) - {}_2y_B \cos(\theta) - {}_1y_A)^2} \quad (5.15)$$

Au final nous calculons j_n^m :

$$\begin{aligned}
 j_n^m &= \frac{\|\vec{OA} \times \vec{AB}\|}{\|\vec{AB}\|} \\
 j_n^m &= \frac{\sqrt{({}_1x_A {}_2x_B \sin(\theta) + {}_1x_A {}_2y_B \cos(\theta) - {}_1y_A {}_2x_B \cos(\theta) + {}_1y_A {}_2y_B \sin(\theta))^2}}{\sqrt{({}_2x_B \cos(\theta) - {}_2y_B \sin(\theta) - {}_1x_A)^2 + ({}_2x_B \sin(\theta) - {}_2y_B \cos(\theta) - {}_1y_A)^2}} \quad (5.16)
 \end{aligned}$$

5.5.4 Forces en fonction des couples

Après avoir exprimé la Jacobienne J , certaines problématiques doivent encore être étudiées selon l'architecture. En effet, pour les architectures non-redondante, si la matrice J^T est inversible, on obtient le vecteur des forces en résolvant l'équation linéaire $F = (J^T)^{-1}\Gamma$.

Pour les architectures redondantes, il existe un ensemble affine de solutions à cette équation. Autrement dit, plusieurs répartitions de forces peuvent engendrer le même vecteur de couples. Pour choisir, on minimise la puissance consommée par les moteurs. Comme dit précédemment, la jacobienne permet d'exprimer les relations vitesses linéaires/vitesses angulaires, mais aussi les relations couples/forces. La vitesse des actionneurs est donnée par :

$$V_{motors} = J \frac{dq}{dt}, \text{ et } \Gamma = J^T F. \quad (5.17)$$

L'optimisation réalisée permet d'obtenir la répartition des forces minimisant la puissance nécessaire au système, tout en respectant les contraintes de couple à chaque articulation. La vitesse linéaire des moteurs étant imposée par les trajectoires pré-définies, il suffit de minimiser F pour minimiser la puissance qui est définie par $P = FV$. Mathématiquement, ce problème d'optimisation est abordé comme un problème quadratique sous contraintes linéaires, et prend la forme :

$$\begin{aligned} \min_{F \text{ tq } |F| < \bar{F}} \quad & \|V_{motors} \circ F\| \\ \text{tel que} \quad & JF = \Gamma. \end{aligned} \quad (5.18)$$

où \circ correspond au produit de Hadamard.

En pratique, nous utilisons la fonction MATLAB® *lsqlin* qui permet de résoudre des problèmes de moindres carrés sous contraintes. Si les forces requises ne peuvent pas être générées par les actionneurs, l'optimisation est de nouveau réalisée, mais cette fois en supprimant les bornes des zones de recherche. Cela permet d'obtenir une répartition des forces dans les moteurs qui, même si elle ne vérifie pas le booléen $b(P, t)$, peut tout de même servir dans une optique de dimensionnement des actionneurs.

5.6 Simulateur et workflow

Afin de réaliser l'évaluation rapide d'une géométrie pour une architecture donnée, un simulateur permettant de « jouer » un mouvement est mis en place. Idéalement, le fonctionnement du simulateur est montré dans la figure (fig.6.3).

En pratique, le simulateur fonctionne légèrement différemment. En effet, mécaniquement, le couple $\Gamma(t)$ dépend du triplet $q(t), \dot{q}(t), \ddot{q}(t)$, de la géométrie P , ainsi que de la masse des actionneurs et des segments (voir Fig.6.3). En effet, lors d'une trajectoire γ , la

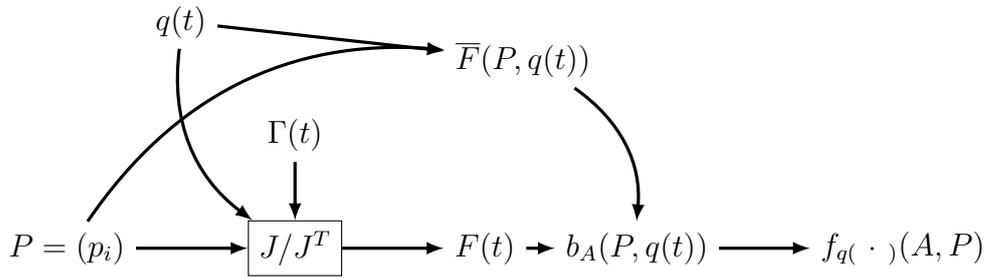


FIGURE 5.13 – Entrées et sortie du simulateur.

position et l'orientation des moteurs relativement aux segments ne sont pas constantes. Afin d'évaluer plus efficacement la fonction coût $f_\gamma(A, P)$, nous supposons que les masses des membres du robot sont similaires à celles d'un sujet humain. Cette hypothèse nous permet de négliger la dépendance de Γ vis-à-vis de P . Autrement dit, nous supposons donc que les couples requis pour un humain sont identiques à ceux de notre future architecture, car les matrices d'inertie des différents membres sont supposées indépendantes de la géométrie. Une autre manière d'appréhender cette hypothèse et de considérer que la masse des moteurs est intégrée dans les segments du robot.

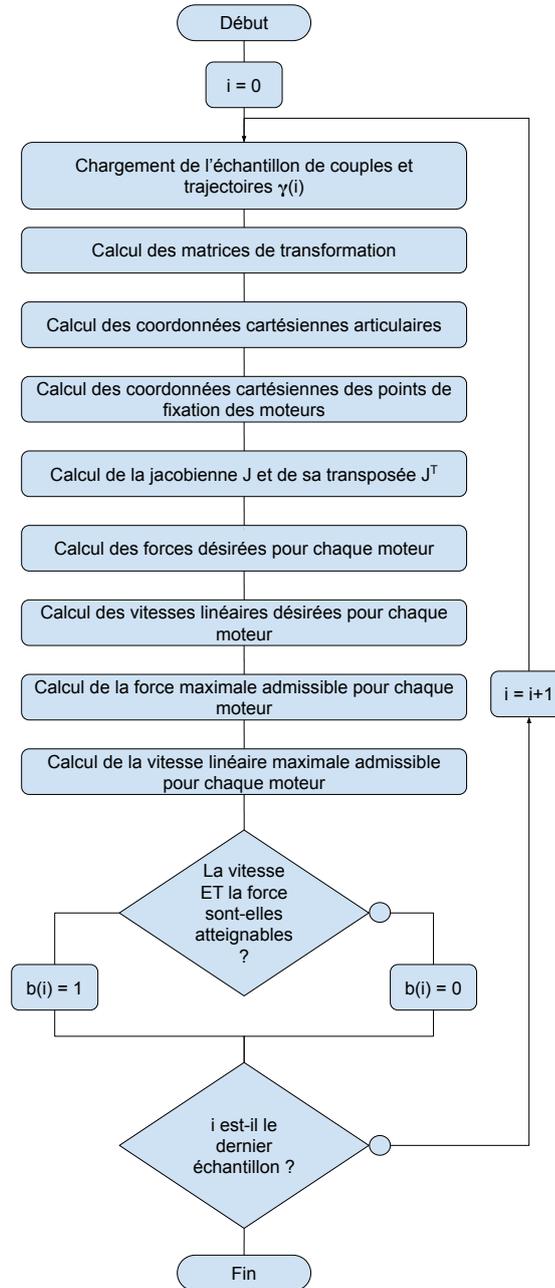


FIGURE 5.14 – Organigramme détaillé du simulateur.

Concrètement, les couples articulaires ont été obtenus en amont de la thèse à partir des données HuMoD[63]. Une fois les couples connus, les forces requises sont calculées, en suivant la méthode présentée dans la section précédente. Le résultat du simulateur est la

faisabilité $M_A(P, \gamma)$. La faisabilité est calculée en comparant à chaque instant t la force $F(t)$ requise par les moteurs, à $\bar{F}(P, q(t))$ la force maximale disponible calculée. Si la force requise est inférieure à la force maximale que l'on peut produire, un booléen $b(P, t)$ est fixé à 1, et à 0 le cas échéant. Enfin, $M_A(P, \gamma)$ est obtenue en faisant la moyenne de ces booléens. Ceci nous donne :

$$M_A(P, \gamma) = \frac{\sum_{i=1}^n b(P, i)}{n} \quad (5.19)$$

Finalement, $M_A(P, \gamma)$ représente le ratio entre le nombre d'échantillons réalisables et le nombre total d'échantillons. C'est ce critère que nous chercherons à optimiser. La figure 5.14 présente l'organigramme détaillé du simulateur.

Dans le détail, une fois un échantillon de trajectoire chargé, les matrices de transformation sont calculées. Grâce à ces matrices, les coordonnées cartésiennes de chaque articulation sont calculées, ainsi que celles des points de fixation des moteurs. Une fois cela fait, nous pouvons calculer la matrice Jacobienne J ainsi que sa transposée J^T . Ces matrices sont utilisées pour calculer les forces requises dans les actionneurs ainsi que leur vitesses, avant d'être comparées aux vitesses et forces maximales que peuvent atteindre les moteurs. Le résultat de cette comparaison est affecté à un booléen b qui représente la faisabilité de la géométrie sur un échantillon de trajectoire. Pour que l'échantillon de trajectoire soit considéré comme réalisable, il faut que les vitesses et forces de **chaque** actionneur soient atteignables. Enfin, ces étapes sont répétées pour chaque échantillon jusqu'à l'évaluation de la trajectoire complète. Le bipède affiché par le simulateur ainsi que de sa faisabilité au cours d'un mouvement sont visibles sur les figures 5.15 et 5.16 respectivement.

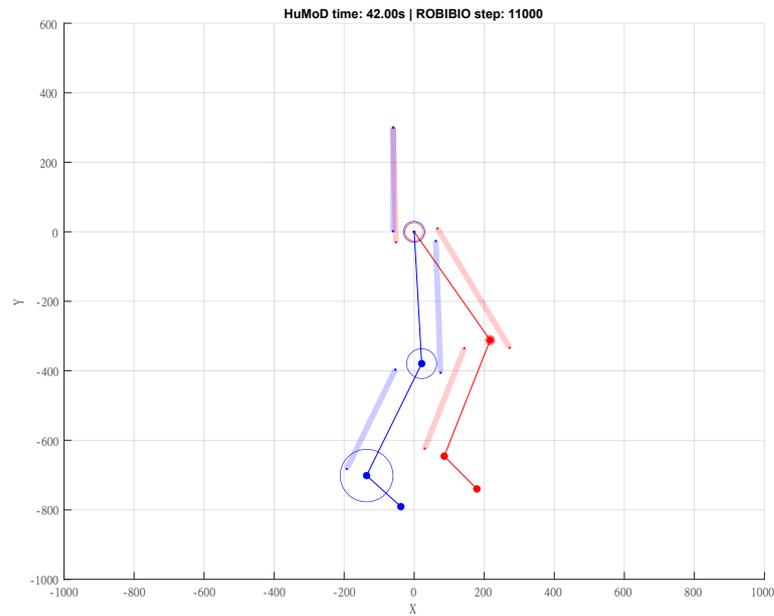


FIGURE 5.15 – affichage de la configuration dans le simulateur.

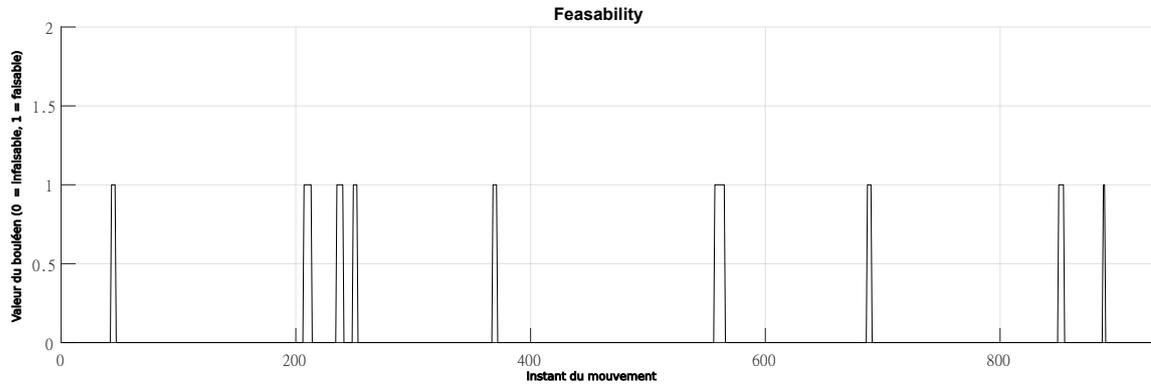


FIGURE 5.16 – affichage de la faisabilité dans le simulateur.

Ce simulateur permet donc à partir de trajectoires articulaires $q(t)$, et des couples $\Gamma(t)$ associés à cette trajectoire γ , d'évaluer une architecture et une géométrie. Le temps de calcul dépend de la trajectoire étudiée, et peut prendre jusqu'à 2 minutes. L'implémentation du simulateur est réalisée sous l'environnement MATLAB®, et est disponible via l'adresse <https://laris.univ-angers.fr/fr/projets/projets-anterieurs/robibio.html>. Ce simulateur est ensuite exploité dans un algorithme d'optimisation.

5.7 Conclusion

Cette section présente les éléments théoriques ainsi que les calculs réalisés dans le cadre de ces travaux. Les termes architecture, géométrie et configurations sont définies pour éviter toute confusion lors de la définition des paramètres du système et des variables d'optimisation. Une définition des architectures et géométries considérées comme admissible dans le cadre de ces travaux est proposée. Ensuite, les différents éléments du critère d'optimisation sont donnés, ainsi que l'expression de la jacobienne J , illustrée par un exemple pour une articulation. Enfin, une généralisation du problème à l'échelle du robot entier, notamment pour les situations avec redondance, est présentée, avant une explication du simulateur développé à partir de ces différents éléments. La prochaine étape consiste en la mise en place pratique de l'algorithme d'optimisation ainsi que les résultats obtenus.

OPTIMISATION

Après avoir défini les problématiques abordées ainsi que la modélisation utilisée, ce chapitre présente le protocole d’optimisation mis en place. L’objectif final est la réalisation d’un robot bipède anthropomorphe capable de marcher dans le plan, ceci afin de mesurer et valider l’utilisation de moteurs linéaires en robotique humanoïde. Pour valider le modèle du prototype avant sa fabrication, il convient de réaliser en amont une Conception Assistée par Ordinateur. Cette conception doit donc intégrer l’architecture et la géométrie retenue. Notre stratégie consiste à résoudre un problème d’optimisation pour choisir la meilleure architecture et la géométrie associée. La base de cette optimisation est le modèle présenté dans le chapitre 5. L’évaluation de la fonction coût s’appuie sur le simulateur présenté dans la section 5.6. Le but de ce chapitre est d’obtenir pour chaque architecture une géométrie optimale (i.e. un placement des points d’accroche des moteurs le plus performant au regard des objectifs). La méthode de Nelder-Mead sous contraintes [64] est utilisée pour le processus d’optimisation, qui converge a minima vers un minimum local. Le processus d’optimisation est implémenté dans l’environnement MATLAB® via l’utilisation de la fonction *fminsearchbnd*. Cette partie propose une formulation du problème d’optimisation étudié, les choix pratiques réalisés, ainsi que les résultats obtenus.

6.1 Modèle mathématique du problème d’optimisation

6.1.1 Formulation générique

Notre problème se ramène de façon générique à un problème d’optimisation sous contraintes. Il a été défini pour répondre à notre objectif de concevoir un robot bipède anthropomorphe capable de marche dynamique. Formellement, ce problème peut s’écrire de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \max f_\gamma(x) \\ h(x) \leq 0 \end{aligned} \tag{6.1}$$

où x est la variable à optimiser, qui est un couple (A, P) avec A une architecture et P une géométrie. Ces différentes notions sont définies dans la section 5.2.

6.1.2 Variables de décision

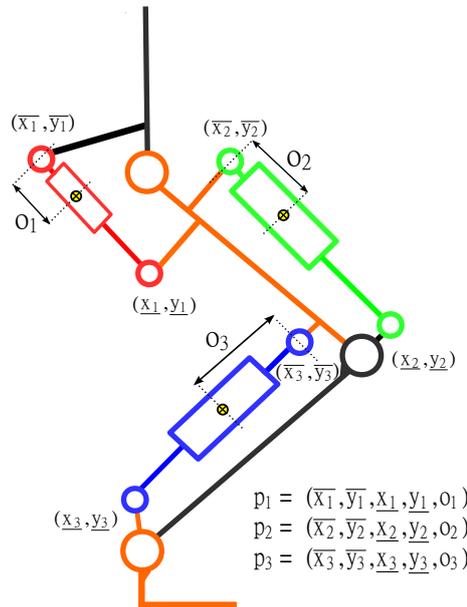


FIGURE 6.1 – Rappel du modèle et des paramètres géométriques pour une architecture.

Le robot bipède à concevoir se compose de deux jambes possédant chacune 4 membres (tronc, cuisse, tibia et pied) ainsi que 3 articulations (hanche, cheville et genou) dans le plan (cf 5). La figure 6.1 remontre le modèle d'une jambe avec les grandeurs caractérisant la géométrie. Ces dernières sont les suivantes :

- $(\bar{x}_i, \bar{y}_i) \in [a_i, b_i] \times [c_i, d_i]$ le point d'accroche supérieur,
- $(\underline{x}_i, \underline{y}_i)$ le point d'accroche inférieur,
- et $o_i \in [e_i, f_i]$ le décalage de chaque moteur.

Ces grandeurs forment pour chaque moteur $p_i = (\bar{x}_i, \bar{y}_i, \underline{x}_i, \underline{y}_i, o_i)$, un vecteur à 5 dimensions combinant les positions 2D des points d'accroche et le décalage. Cela amène

à 15, 20 ou 25 variables d'optimisation selon l'architecture considérée. Par exemple, avec l'architecture 1, la géométrie P est de la forme : (p_1, p_2, p_3) , avec $p_i \in \mathbb{R}^5$.

6.1.3 Critère d'optimisation

Le critère de l'équation 6.1 est défini comme la faisabilité $f_\gamma(A, P)$. Cette faisabilité $f_\gamma(A, P)$ correspond à la capacité du robot utilisant l'architecture A à réaliser le mouvement demandé γ en utilisant la géométrie P , et est définie par :

$$f_\gamma(A, P) = \frac{1}{T} \int_0^T b_A(P, t) dt, \quad (6.2)$$

où $[0, T]$ est l'intervalle de temps étudié, et b_A un booléen. Cette faisabilité représente donc le pourcentage réalisable d'un mouvement spécifique pour une géométrie P de l'architecture A . Le booléen $b_A(P, t)$ correspond à la capacité du moteur à fournir la force nécessaire à l'instant t . Plus explicitement, $b_A(P, t)$ est vrai si et seulement si toutes les forces requises pour bouger les articulations peuvent être produites par les moteurs linéaires de l'architecture A . Formellement, on a :

$$b_A(P, t) = 1 \iff \forall F_i \in \{1, 2, \dots, n\}, F_i \leq \bar{F}_i, \quad (6.3)$$

avec n le nombre total de moteurs utilisés dans l'architecture A , F_i la force requise pour effectuer le mouvement, et \bar{F}_i la force maximale que le moteur peut produire. Un exemple d'évolution de $b_A(P, t)$ au cours du temps est visible sur la Fig.6.2. Sur cette figure, la configuration $q(t_0)$ ne permet pas d'effectuer le prochain mouvement, le booléen sera donc nul à cet instant t_0 du mouvement. Par contre, pour les autres configurations $q(t_1)$, le mouvement est considéré comme réalisable par chacun des moteurs, ce qui fixe le booléen à 1.

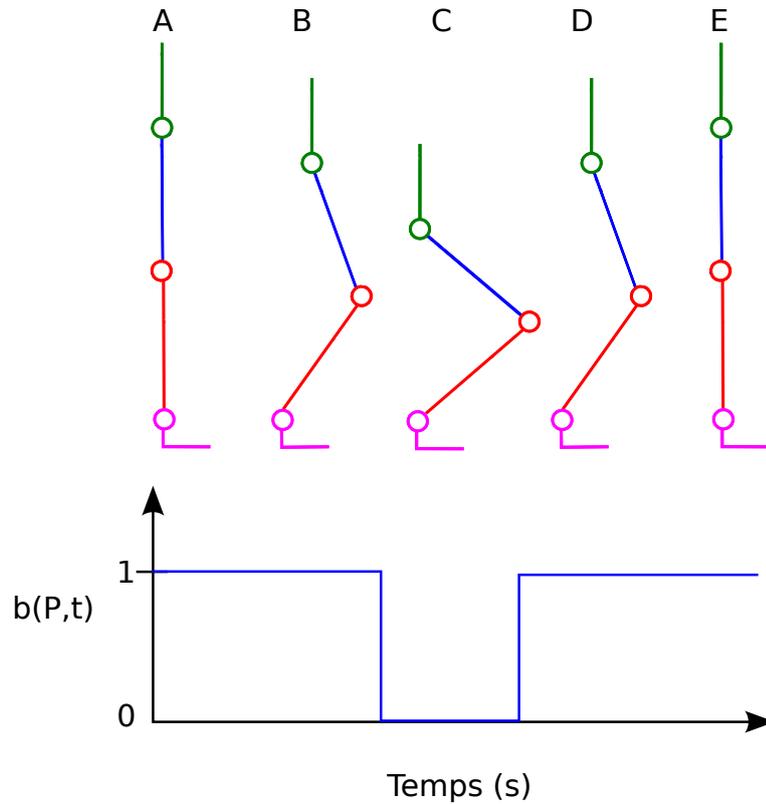


FIGURE 6.2 – Mouvement de squat et booléen associé.

La figure 6.3 présente le workflow permettant d'évaluer la fonction coût $f_\gamma(A, P)$, avec en entrées :

- les variables de décision P
- les paramètres permettant de caractériser γ :
 - $q(t)$ la configuration articulaire à l'instant t du mouvement étudié, obtenue à partir de la base de donnée HuMoD [63].
 - $\Gamma(t)$ le couple articulaire à l'instant t du mouvement étudié, calculé depuis $t \mapsto q(t)$ avec le formalisme de Newton-Euler.
- les éléments de la partie 6.1.2.

On peut noter que, mécaniquement, les couples $\Gamma(t)$ dépendent de $q(t)$, la géométrie P et des masses des différents segments et moteurs du robot. Dans la suite du document, une hypothèse simplificatrice sera proposée pour découpler $\Gamma(t)$ de la géométrie P et des masses des actionneurs.

La sortie du système est la faisabilité. Le critère $f_\gamma(A, P)$ (6.2) nécessite le calcul du booléen $b_A(P, t)$ (6.2), qui demande de calculer les forces $F_i(t)$ et $\bar{F}(P, q(t))$ de chaque

moteur.

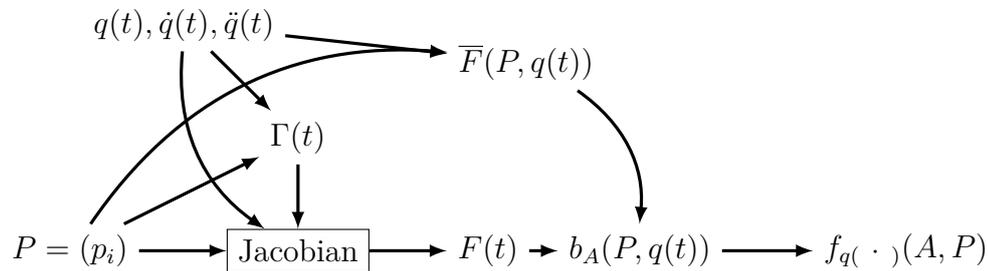


FIGURE 6.3 – Flot de données pour le calcul du critère à optimiser.

Ces deux forces sont calculées séparément. $\bar{F}(P, q(t))$ est obtenue à partir de l'élongation du moteur dans la configuration à l'instant t . Cette élongation est ensuite comparée aux valeurs spécifiées dans la datasheet des actionneurs (voir Fig.3.4). Cela permet de déterminer la force maximale que pourra fournir le moteur dans cette configuration. Ce processus est ensuite répété pour chacun des actionneurs de l'architecture évaluée.

6.2 Protocole

Lors de la mise en place d'un algorithme d'optimisation, plusieurs problématiques doivent être adressées. Il faut notamment définir les variables d'optimisation, la méthode utilisée, ainsi que les données d'entrée (réelles ou simulées). En robotique humanoïde, la littérature propose de nombreux exemples d'utilisation d'un algorithme d'optimisation pour obtenir une architecture optimale pour un mouvement[65], ou bien encore pour générer un cycle de marche. De plus, ces problèmes peuvent être traités en recourant à des méthodes différentes. Par exemple, un cycle de marche optimal peut être généré avec un algorithme génétique[66], un algorithme d'essaim de particules [67] ou bien encore un algorithme de force centrale[68]. En robotique, ces méthodes sont le plus souvent utilisées soit pour déterminer une architecture optimale pour un mouvement fixée, soit pour déterminer une trajectoire de mouvement optimale pour une architecture déjà établie. Cependant, d'autres méthodes se proposent d'intégrer directement tout ces éléments dans l'algorithme en tant que variables d'optimisation [69][70]. Autrement dit, ces méthodes permettent d'optimiser simultanément l'architecture, la trajectoire, ainsi que les couples articulaires. Il convient également de mentionner l'utilisation croissante de l'intelligence artificielle avec de l'apprentissage par imitation [71], ou encore l'apprentissage par renforcement[72] pour la modélisation et la génération de trajectoire.

Notre problème d'optimisation consiste à maximiser la faisabilité d'un ou plusieurs mouvements. Concrètement, certains éléments tels que les dimensions du robot ainsi que les mouvements utilisés doivent être définis. Nous avons pris le parti de conserver un modèle simple et comparable à l'architecture d'une jambe humaine. En concordance avec ce choix, les paramètres géométriques du prototype découlent directement de mesures effectuées sur un sujet humain, de même que les mouvements servant de base à l'optimisation via la base de données HuMoD [63]. Notre problème d'optimisation se concentre donc uniquement sur les variables définissant la géométrie de la transmission entre le moteur et l'articulation, les autres grandeurs étant des données d'entrée. Comme dis en début de chapitre, l'algorithme d'optimisation utilisé est la méthode de Nelder-Mead sous contraintes[64]. Comme expliqué dans la section 6.1, le critère d'optimisation (la faisabilité) n'est pas linéaire relativement aux variables d'optimisation (géométrie, i.e. la position des points d'accroche). L'algorithme choisi est adapté à ce type de problématique, et permet notamment d'assurer la convergence vers un minimum local. Pour s'approcher au mieux d'un minimum global, de multiples points de départ aléatoires sont générés afin de parcourir l'espace de recherche de manière exhaustif tout en limitant les temps de calcul. Cette étude se concentre sur la faisabilité par un robot bipède actionné par des moteurs de mouvements de squat, marche et course. Ces mouvements sont soit pris séparément, soit considérés les uns à la suite des autres. Cela amène à obtenir des architectures que nous qualifions de « spécialisées » pour un mouvement spécifique, ou bien des architectures dites « génériques » capables de réaliser plusieurs mouvements différents. Cette approche permet d'avoir une vue d'ensemble sur les performances maximales d'une architecture dans ce contexte.

6.2.1 Pré-sélection des mouvements

La base de données HuMoD contenant de nombreux mouvements, une pré-sélection a été faite selon la nature du mouvement [60]. En effet, les moteurs considérés (P01-48x240/30x240 de LinMot®) ne peuvent produire qu'une force maximale de 585 N. Cette étude préalable est réalisée en récupérant les couples requis par les différentes articulations lors d'un cycle de marche complet. Nous calculons ensuite le couple maximal que les actionneurs peuvent fournir en supposant que ces derniers fournissent la force maximale dans la configuration optimale, c'est-à-dire lorsque le moteur est perpendiculaire au bras de levier. Formellement, pour un mouvement $t \mapsto \gamma_t$, et un bras de levier B_i fixé, la condition suivante est nécessaire à la réalisation du mouvement :

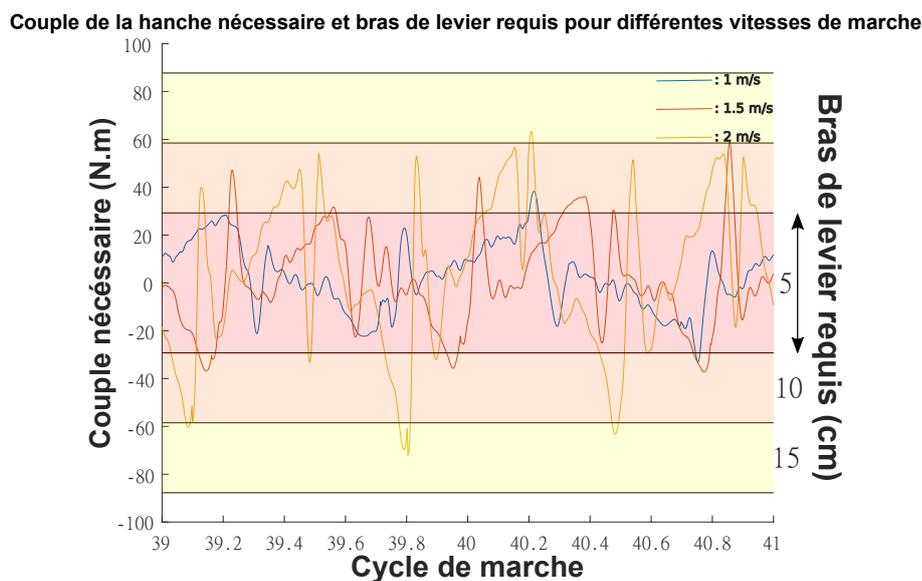


FIGURE 6.4 – Couple de la hanche pour différentes allures de marche et le bras de levier requis.

$$\forall i, \forall t, \frac{F(i, t)}{|\Gamma(t)|} < B_i. \quad (6.4)$$

Ces éléments sont ensuite tracés afin d’avoir une estimation du bras de levier nécessaire pour un mouvement. Au regard des proportions anticipées du prototype, nous estimons qu’un bras de levier supérieur à 10 cm pénalise l’aspect anthropomorphe du robot. Les figures (fig.6.4-6.6) montrent les couples requis pour des mouvements de marche à différentes allures. Pour chaque figure, les courbes bleu, rouge et orange représentent respectivement des marches à une vitesse de 1, 1.5 ou 2 m/s et les couples associés. Ces courbes sont ensuite découpées en sections représentant les capacités selon le bras de levier utilisé. Par exemple, la zone rouge représente un bras de levier maximal de 5 centimètres, les zones oranges représentent la bande passante supplémentaire en considérant un bras de levier de 10 centimètres, et ainsi de suite. Ces courbes mettent notamment en évidence l’augmentation du couple requis lorsque la vitesse de marche augmente, comme particulièrement visible sur la figure 6.6.

Il peut être souligné que cette méthodologie n’est qu’une évaluation partielle et suppose une situation optimale où les actionneurs peuvent fournir en permanence la force maximale. Cependant, cette situation n’est pas atteignable en permanence. Cela permet néanmoins d’indiquer un bras de levier minimal à garantir pour réaliser le mouvement

Couple du genou nécessaire et bras de levier requis pour différentes vitesses de marche

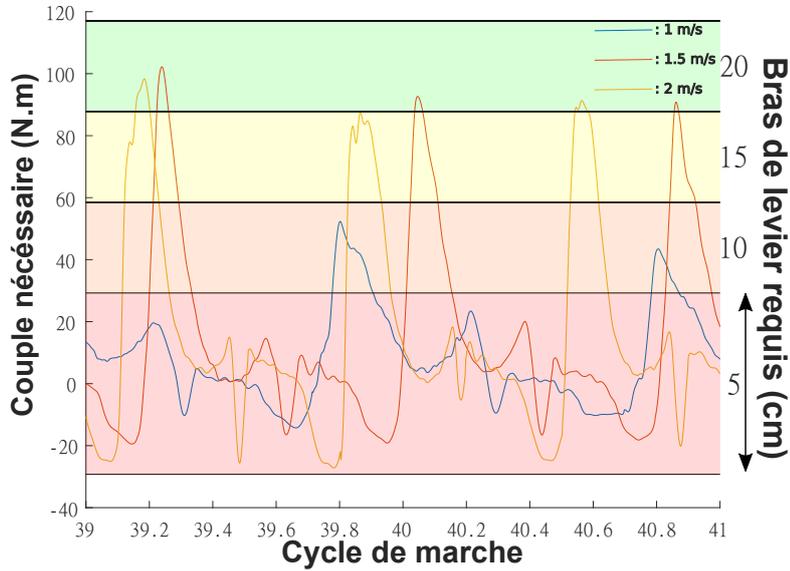


FIGURE 6.5 – Couple du genou pour différentes allures de marche et le bras de levier requis.

Couple de la cheville nécessaire et bras de levier requis pour différentes vitesses de marche

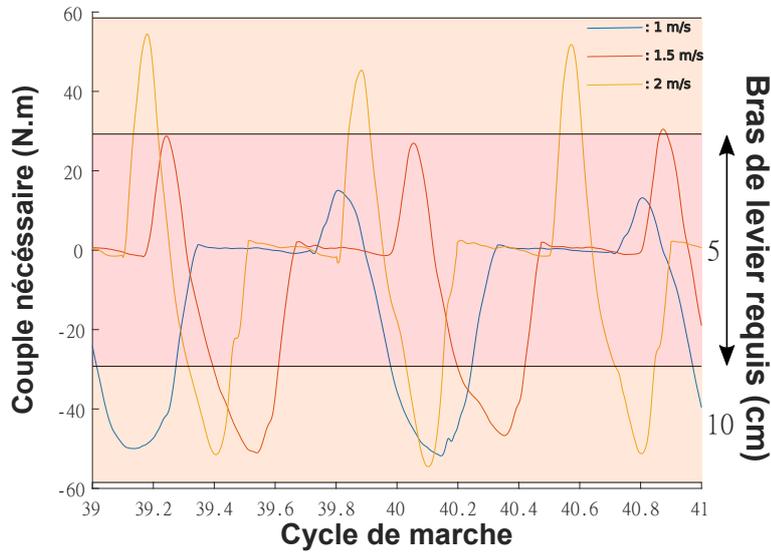


FIGURE 6.6 – Couple de la cheville pour différentes allures de marche et le bras de levier requis.

Couple du genou nécessaire et bras de levier requis pour différentes vitesses de course

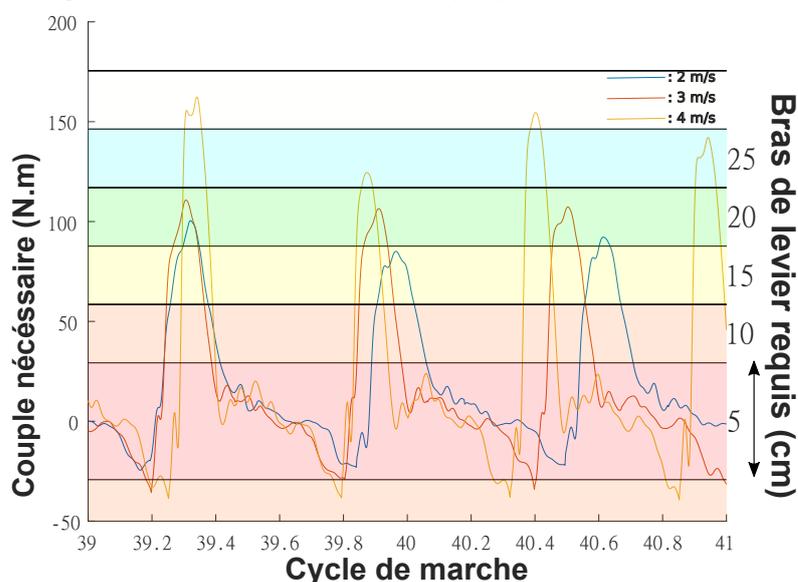


FIGURE 6.7 – Couple du genou pour différentes allures de course et le bras de levier requis.

quelle que soit la configuration du robot. Cette approche permet alors d'éliminer certains mouvements trop ambitieux, et également d'avoir une meilleure vision de la dynamique articulaire lors d'un mouvement. En effet, nous pouvons constater que pour les mouvements de marche, le genou est l'articulation la plus sollicitée. Cela permet éventuellement d'adapter le bras de levier maximal que nous nous autorisons pour cette articulation, ou bien de considérer cette articulation comme le paramètre limitant.

En plus des mouvements de marche, la même démarche a été appliquée pour des mouvements de courses avec une vitesse comprise entre 2 et 4 m/s. La figure (6.7) montre le couple généré au cours du mouvement pour l'articulation du genou à différentes vitesses. Les différents mouvements ont été synchronisés au début d'un pas afin de mettre en évidence les différences d'amplitudes. Il apparaît clairement que doubler la vitesse de course peut entraîner une augmentation du couple d'environ 50%, ce qui requiert l'utilisation d'un bras de levier supérieur à 25 centimètres selon cette méthodologie.

Finalement, cette analyse permet d'éliminer tous les mouvements allant au-delà de 2 m/s. De plus, des mouvements tels que la marche latérale ou encore le coup de pied n'ont pas été utilisés, ces derniers n'étant pas pertinents par rapport à l'objectif d'un robot planaire.

Cela amène donc à conserver 5 mouvements disponibles dans la base de données Hu-

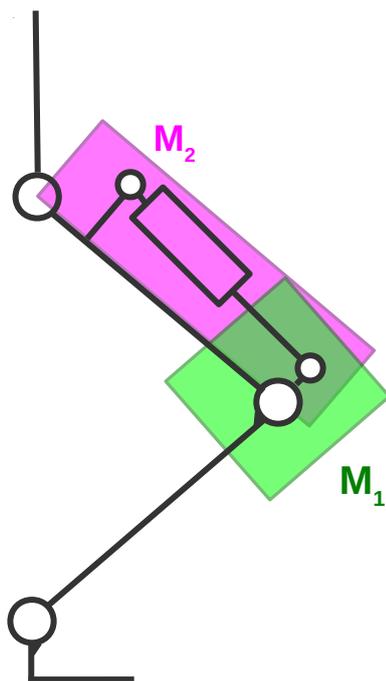


FIGURE 6.8 – Zones de recherche pour les accroches du moteur du genou

MoD :

- Squat,
- Marches à 1 , 1.5 et 2 m/s,
- Course à 2 m/s.

6.2.2 Contrainte d'anthropomorphisme

Afin d'assurer que le résultat obtenu par optimisation soit en accord avec l'objectif d'anthropomorphisme, des limites quant au placement des points d'accroche sont fixées. En effet, ces derniers ont un impact direct sur le bras de levier disponible à un instant donné. Sans bornes sur la position des moteurs, l'algorithme maximiserait simplement le bras de levier disponible à chaque instant en éloignant le plus possible les points d'accroche. Une zone de recherche est donc définie. Cette zone prend la forme d'un rectangle ayant la longueur du membre auquel il est rattaché, et pouvant s'éloigner d'un maximum de 85mm de l'axe dudit membre. La figure 6.8 présente les zones de recherche pour placer le moteur impactant le genou. Le carré vert correspond à la zone admissible du point d'accroche inférieur, tandis que le carré rouge montre la zone admissible du point d'accroche supérieur.

Un autre élément important concerne le modèle de référence pour le calcul des couples, et plus exactement la répartition des masses à l'intérieur de l'architecture. Comme le robot utilise des moteurs linéaires, les masses des actionneurs se déplacent lors de leur mise en mouvement. De ce fait, il faut prendre en compte ce déplacement dans le modèle pour calculer des couples exacts. Cependant, les couples que nous utilisons proviennent de la base de données HuMoD. Cela signifie qu'ils correspondent au déplacement d'un individu pesant environ 57 kg pour 1,6 m. En prenant l'hypothèse que notre prototype aura approximativement les mêmes dimensions et répartition des masses que le sujet HuMoD, on peut raisonnablement considérer que les couples seront similaires. En effet, un moteur linéaire peut-être assimilé à la chair et aux muscles entourant l'os d'un sujet humain tant que ce dernier reste suffisamment proche, ce qui est le cas avec des zones de recherche restreintes. À partir de cela, nous supposons que les masses et matrices d'inerties des différents membres du robot bipède seront identiques à ceux du sujet HuMoD. Cela est notamment possible, car un mouvement de marche ne demande pas de grande amplitude angulaire, ce qui limite de fait l'élongation des moteurs.

6.2.3 Cluster de calculs

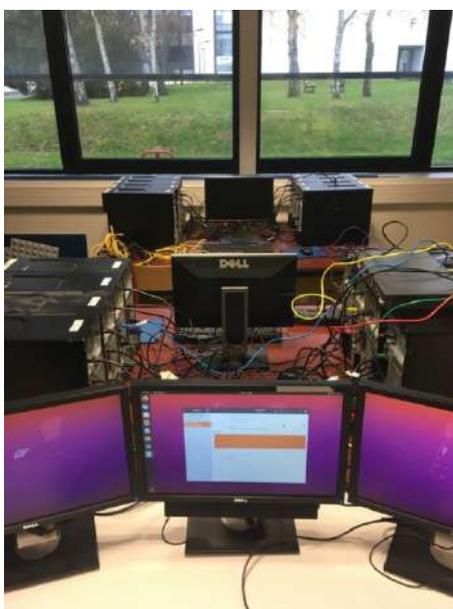


FIGURE 6.9 – cluster installé pour les processus d'optimisation.

Une fois ces éléments spécifiés, nous pouvons discuter de la mise en place du processus

d'optimisation. Comme expliqué en amont, 14 architectures potentielles ont été définies afin d'être évaluées, auquel s'ajoutent les différents jeux de mouvements testés. Nous définissons comme « une expérience » le calcul de la géométrie optimale de toutes les architectures pour un même jeu de mouvement. Le calcul de la géométrie optimale pour une architecture et un jeu de mouvement est obtenu par un processus complet d'optimisation. Comme visible sur la figure 6.12, une colonne correspond à une expérience. Matériellement et informatiquement, un cluster de calcul (voir photographie sur la Fig.6.9) a été mis en place afin de pouvoir évaluer en parallèle chaque architecture. Comme le logiciel MATLAB® ne permet pas un usage en parallèle, cela oblige à utiliser un terminal par architecture évaluée.

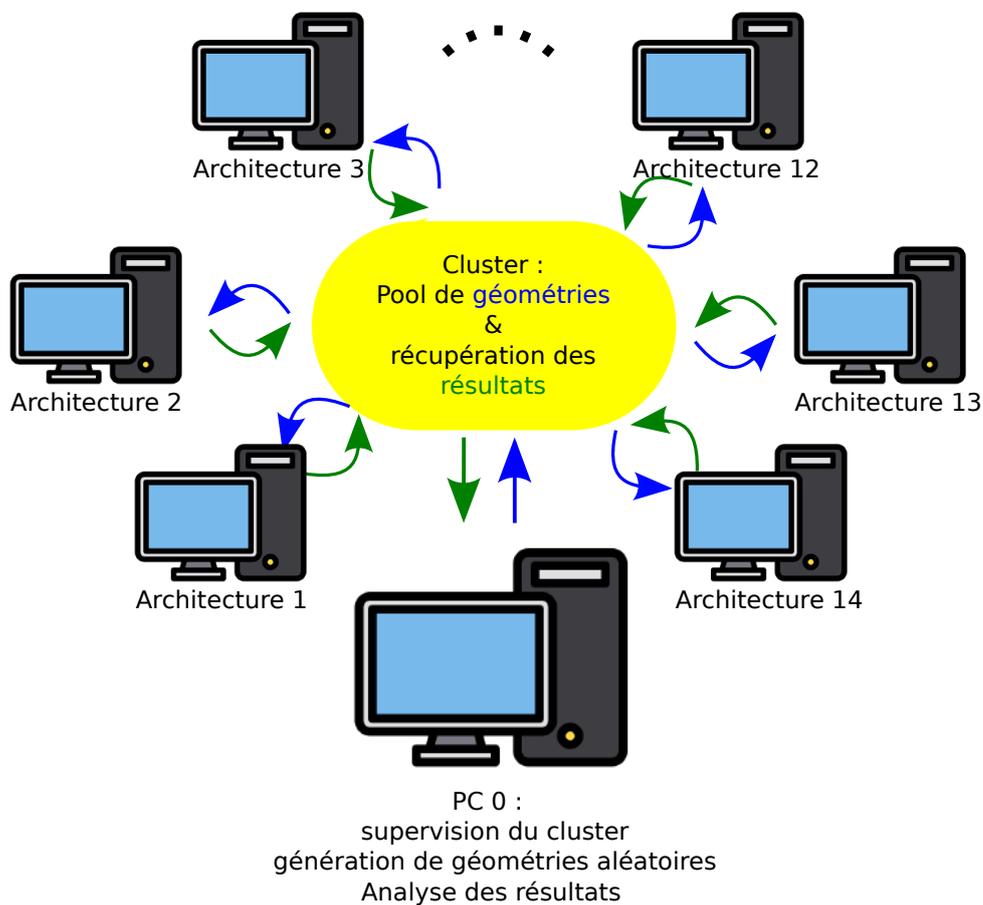


FIGURE 6.10 – Diagramme de fonctionnement du cluster.

Un schéma du cluster est présenté sur la figure 6.10. Un ordinateur principal coordonne et récupère les résultats des différentes optimisations. Cet ordinateur s'occupe également de générer des vecteurs de départ aléatoires qui sont utilisés comme conditions initiales

des algorithmes, à la manière d'un algorithme de Monte-Carlo. En effet, la méthode de Nelder-Mead étant déterministe et pouvant s'arrêter à des minima locaux, il est nécessaire de modifier le point de départ de l'algorithme pour pouvoir s'approcher par itération d'un minimum global. Autrement dit, chaque terminal effectue de multiples optimisations. Les conditions d'arrêt sont un critère de précision sur les points d'accroche, ou un nombre d'évaluations maximal.

Concernant les caractéristiques des terminaux, chaque ordinateur est un PC Dell Precision T1700 :

- Processeur : Intel Core I5-4570 CPU@3.20GHz x4
- Carte graphique : Mesa Intel HD Graphics 4600 (HSW GT2)
- RAM : 8Go
- OS : Ubuntu 20.04 LTS 64 bits

Ayant à disposition 4 cœurs sur le processeur, chaque terminal dédié à une architecture exécute 4 itérations de MATLAB® en parallèle. Chaque itération effectue l'algorithme d'optimisation mis en place pour une architecture, mais en changeant le jeu de mouvement utilisé.

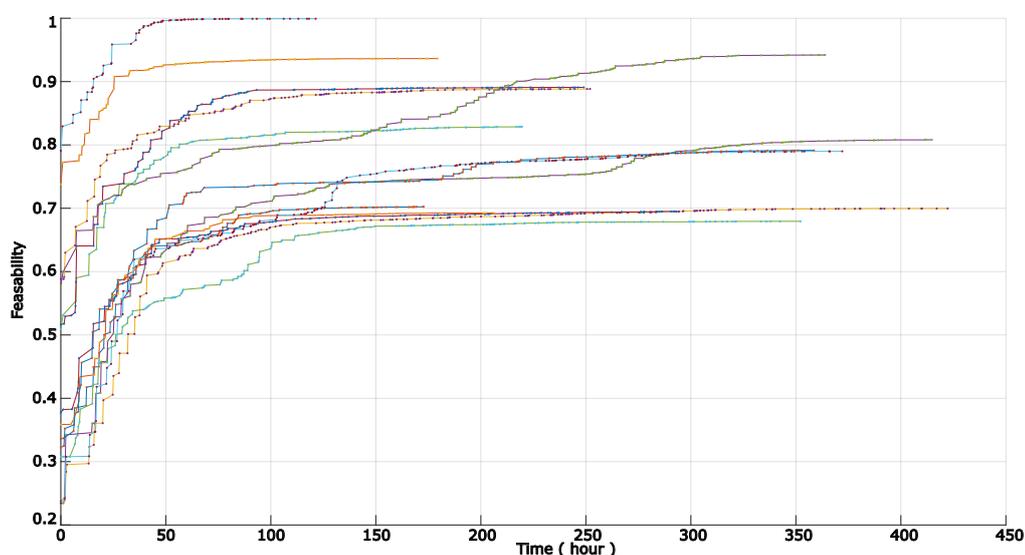


FIGURE 6.11 – Temps de convergence d'une expérience (de chaque architecture).

Le temps de calcul d'une expérience est en moyenne d'une semaine (voir Fig.6.11). Cette durée relativement longue s'explique en partie par la dimension des variables d'optimisation (entre 15 et 25 variables), et la taille des données d'entrée (entre 30 000 et 50 000 instants datés par mouvement). Pour chaque instant daté, la position des actionneurs

est calculée, de même que pour les forces maximales et disponibles. La convergence de l'algorithme de Nelder-Mead, pour une architecture et une géométrie initiale données, prend jusqu'à 5 minutes. Suivant le principe de Monte-Carlo, l'algorithme de Nelder-Mead est exécuté plusieurs centaines de fois avec des géométries initiales différentes. Finalement, compléter le tableau bi-dimensionnel avec les faisabilités maximales 6.12 a nécessité au moins 5 semaines de temps de calcul.

6.3 Résultats

Dans cette sous-section sont présentés les différents résultats obtenus au cours des multiples expériences réalisées. Les données de mouvement présentant des pics occasionnels incohérents avec le reste du mouvement (supposément dû à des problèmes lors de l'acquisition), nous avons fixé un seuil de faisabilité de 95% pour considérer un mouvement comme réalisable. Cette partie distingue les résultats obtenus pour les mouvements uniques de ceux prenant en compte de multiples mouvements.

6.3.1 Architectures spécialisées

Dans cette sous-section, les résultats obtenus supposent que chaque architecture ne réalise qu'un mouvement unique. Cette méthodologie permet de mettre en avant les capacités maximales de chaque architecture en fonction du mouvement demandé, ainsi que de mettre en évidence les limites propres à chaque architecture. Chaque valeur du tableau de la figure 6.12 représente la faisabilité maximale obtenue par une architecture pour un mouvement donné. Il est possible d'observer un écart important entre les performances des architectures avec et sans redondance. En effet, seules les architectures présentant une redondance dans l'actionnement sont en mesure d'effectuer les différents mouvements jusqu'à la course. La raison la plus probable est la nécessité d'inclure une redondance pour l'articulation du genou, qui est celle demandant le plus grand couple pour la plupart des mouvements. Cela est mis en avant par les sous-performances de l'architecture 11 malgré la présence d'une redondance (qui n'affecte pas le genou). La redondance semble également permettre d'élever les limites en termes de mouvement. En effet, seule l'architecture 14 semble capable de réaliser chacun des mouvements à 100% grâce à la présence de 5 actionneurs. Cependant, une architecture 4 moteurs telle que le numéro 12 peut toujours atteindre le seuil de faisabilité pour chacun des mouvements étudiés.

	Hip	Knee	Ankle	Hip-knee	Knee-ankle	Architecture	Expe 007	Expe 004	Expe 005	Expe 006	Expe 008
							Squat	Walking 1m/s	Walking 1.5m/s	Walking 2m/s	Running 2m/s
3 motors						1	73,74%	82,23%	72,16%	72,65%	59,41%
						2	68,23%	75,02%	62,62%	50,59%	60,08%
						3	87,47%	80,44%	66,98%	66,95%	66,88%
						4	95,35%	81,10%	68,74%	70,82%	60,36%
						5	76,20%	97,96%	86,15%	68,66%	64,94%
						6	90,29%	98,25%	84,30%	84,55%	81,83%
						7	76,07%	99,10%	85,34%	80,39%	82,70%
						8	98,29%	97,57%	82,30%	82,87%	85,33%
4 motors						9	92,66%	99,92%	99,79%	96,99%	96,63%
						10	100,00%	82,60%	84,27%	87,17%	68,04%
						11	90,46%	99,85%	99,79%	96,85%	96,77%
						12	100,00%	100,00%	99,92%	98,94%	100,00%
						13	100,00%	99,58%	98,41%	87,41%	86,64%
5 motors					14	100,00%	100,00%	99,90%	99,90%	100,00%	

FIGURE 6.12 – Faisabilités maximales de chaque architecture après optimisation pour un mouvement unique.

Un autre élément montrant la pertinence d'une architecture redondante, est l'incapacité des architectures non-redondantes de réaliser un mouvement plus exigeant qu'une marche à 1 m/s. Sur cet aspect, l'architecture 8 (voir Fig.6.13) est remarquable. C'est la seule architecture avec 3 moteurs capable de réaliser la marche ou le squat. Enfin, il est important de noter qu'il apparaît nécessaire d'impacter l'articulation de la hanche avec un minimum de deux actionneurs pour le mouvement de squat.

6.3.2 Architectures génériques

Pour ces simulations, nous prenons en compte des séries de mouvements concaténés. L'objectif est d'obtenir une architecture polyvalente. Pour ce faire, nous cumulons les mouvements en les considérant réalisés consécutivement. La combinaison "élémentaire" de mouvements est constituée du squat et de la marche à 1 m/s. Les combinaisons suivantes prennent ensuite la combinaison précédente et lui ajoutent un mouvement supplémentaire à exécuter suite à ceux déjà demandés. Cela est répété jusqu'à avoir les 5 mouvements pris en compte. Les résultats obtenus sont visibles sur la figure (6.14). Nous pouvons noter que, là encore, seules les architectures redondantes semblent capables de réaliser plusieurs

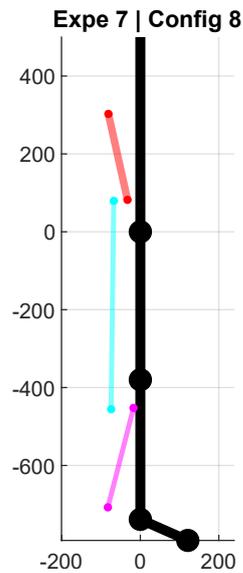


FIGURE 6.13 – Géométrie spécialisée et optimale pour l'architecture 8.

mouvements. De manière similaire aux résultats pour un mouvement unique, l'ajout de redondance permet un gain de performance. Cependant, cette redondance doit être bien placée, car il faut assurer une redondance sur l'articulation du genou, sous peine d'être incapable d'atteindre les seuils fixés. Un dernier élément intéressant est le potentiel des autres architectures selon les mouvements choisis. Par exemple, en retirant la course, les architectures 12 (voir Fig.6.15) et 13 deviennent de bonnes alternatives n'utilisant que 4 moteurs.

	Hip	Knee	Ankle	Hip-knee	Knee-ankle	Architecture	Expe 009	Expe 010	Expe 011	Expe 012
							Squat	Squat	Squat	Squat
3 moteurs						1	76,38%	74.04 %	73.30 %	70.26 %
						2	77,90%	74.66 %	72.71 %	69.97 %
						3	74,47%	70.46 %	68.68 %	67.94 %
						4	82,27%	73.42 %	71.42 %	69.51 %
						5	87,92%	84.07 %	77.92 %	69.26 %
4 moteurs						6	86,16%	80.43 %	80.18 %	80.81 %
						7	87,94%	84.50 %	79.23 %	78.99 %
						8	91,51%	84.80 %	79.49 %	79.14 %
						9	89,91%	92.93 %	93.14 %	88.83 %
5 moteurs						10	89,17%	86.57 %	87.03 %	82.88 %
						11	95,21%	95.79 %	92.05 %	89.08 %
						12	100,00%	99.94 %	99.39 %	93.63 %
						13	99,77%	98.15 %	97.02 %	94.13%
5 moteurs						14	100,00%	99.96 %	99.92 %	99.92 %

FIGURE 6.14 – Faisabilités maximales de chaque architecture après optimisation pour des mouvements cumulés.

6.4 Conception Assistée par Ordinateur.

Une fois les différentes expériences réalisées, l'étape suivante est la réalisation d'un prototype capable de se mouvoir dans le plan. Le double intérêt de ce prototype est de pouvoir valider expérimentalement les résultats obtenus par simulation et de pouvoir expérimenter dans un second temps. Bien que les notions de bi-articularité et redondance soient importantes, des contraintes en termes de complexité, d'encombrement et de temps on poussé à construire dans un premier temps l'architecture 1 (1 moteur mono-articulaire par articulation actionnée). Cette architecture doit permettre dans un premier temps de tester la faisabilité pour des mouvements lents tel que le squat ou la marche lente afin d'avoir une première validation du potentiel des moteurs linéaires à entraînement direct. Une première version en CAO (Conception Assistée par Ordinateur) du prototype reprenant les dimensions fournies dans les données HuMoD est proposée sur la figure 6.16.

Ce modèle a ensuite été modifié par soucis d'encombrement. En effet, respecter les dimensions HuMoD imposent d'utiliser des moteurs puissants et avec une longueur suffi-

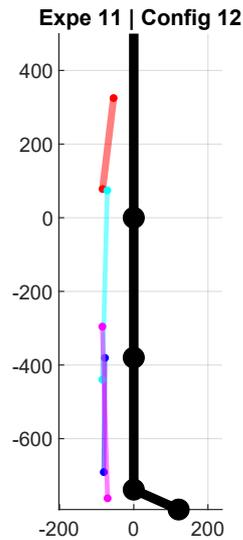


FIGURE 6.15 – Géométrie polyvalente et optimale pour l'architecture 12.

sante. Cependant, cela engendre des problèmes de collision entre les sliders des différents moteurs avec les différentes parties du prototype lors d'un mouvement simulé (notamment une collision récurrente avec l'axe de rotation du genou). Un autre problème était le respect des dites dimensions, notamment des masses de chaque segment. Les moteurs prévus à l'origine pèsent environ 5 kg, ce qui amène à un prototype pesant 30 kg en considérant uniquement les six moteurs (d'où le choix d'éviter les architectures avec redondance pouvant atteindre 50 kg). Pour les segments correspondants au fémur et au tibia, ce n'est pas gênant, mais cela devient problématique lorsque l'on considère le pied.

Afin d'éviter ces deux problèmes, un changement d'approche est effectué concernant les couples et les dimensions du prototype. Cette approche se base sur l'analyse par le Dr. Grimmer des couples requis pour des mouvements humains dont le squat, la marche ou bien la course [73]. Plutôt que de raisonner pour une masse donnée par le sujet, l'analyse considère le couple requis en fonction de la masse du sujet. On peut remarquer que les échelles sont en $N.m.kg^{-1}$. Il est possible de noter que les courbes présentées (Fig.6.17) sont similaires à celles disponibles dans HuMoD en considérant la masse du sujet HuMoD, ce qui conforte la validité de cette approche.

Les dimensions du prototype ont donc été réduites en considérant ce rapport couple-masse plutôt que la masse totale du sujet. Ce changement amène au modèle CAO de la figure 6.18 pour une jambe, plus petit et léger en permettant l'utilisation de moteurs eux-mêmes plus compacts. En effet, les nouveaux moteurs possèdent une force réduite de 67N, soit dix fois moins que les moteurs précédemment considérés. En revanche, la masse

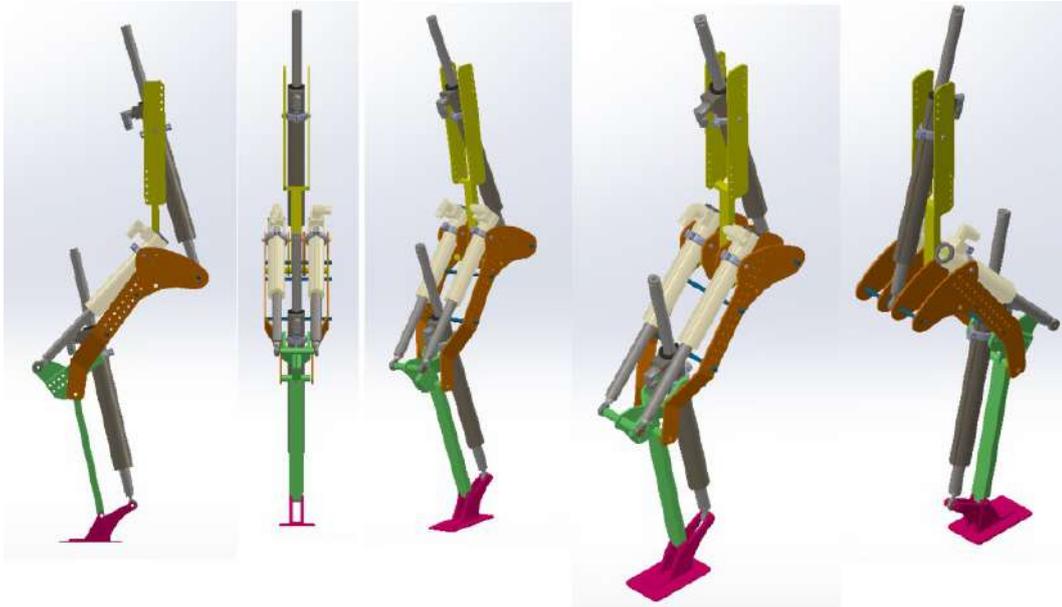


FIGURE 6.16 – Premier Modèle CAO du bipède.

des moteurs a également diminué pour atteindre environ 0.6 kg, soit approximativement dix fois moins également que les moteurs précédents. Couplé à l'utilisation d'aluminium pour la conception de la structure, cela permet d'envisager un prototype pesant approximativement 4 kg.

6.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté l'implémentation du processus d'optimisation de la géométrie et d'évaluation des différentes architectures. La méthode de sélection des mouvements et la mise en place opérationnelle sont ainsi détaillées. Les résultats de cette optimisation et des simulations associées sont également présentées, avec une distinction entre des géométries se spécialisant dans un seul et unique mouvement, et des géométries compatibles avec plusieurs mouvements différents. Enfin, une conception assistée par ordinateur est réalisée afin de préparer la fabrication du prototype. Ainsi, la prochaine étape est la réalisation pratique du prototype.

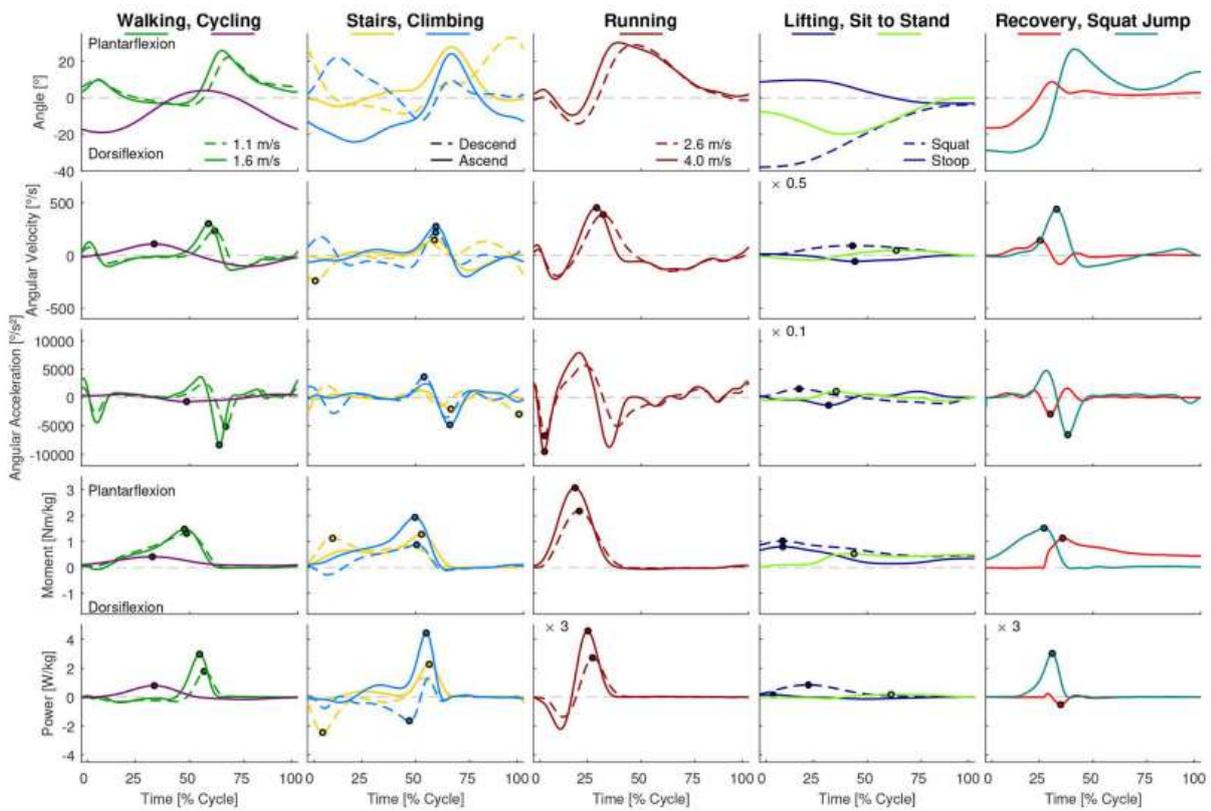


FIGURE 6.17 – Exemple de courbes obtenus pour l'articulation de la cheville par M.Grimmer[73]. Notons que les échelles sont en N.m.kg-1.



FIGURE 6.18 – Modèle CAO final d'une jambe du bipède.

EXPÉRIMENTATION

Comme stipulé dans le chapitre précédent, la dernière étape de cette thèse est la réalisation d'un prototype. En accord avec le redimensionnement décidé et afin d'alléger la structure, de nouveaux actionneurs ont été sélectionnés. Un portique permettant de soutenir le robot a également été conçu. Suite à la présentation de ces éléments, l'expérience est présentée. Cette expérience consiste en la réalisation d'un mouvement de squat, pour obtenir de premiers résultats pour un mouvement statique, mais exigeant en termes de couple et amplitude articulaire.

7.1 Réalisation matérielle

Cette section présente l'assemblage et la réalisation du prototype et d'un banc de test expérimental. Conformément au modèle CAO, le prototype est composé de deux plaques en aluminium pour chaque membre, reliées entre elles par de la visserie en acier. L'ensemble des éléments avant assemblage est montré Fig.7.1. La masse des différents membres assemblés est visible sur la figure 7.2, ainsi que la structure du prototype assemblé sans les moteurs sur la figure 7.3. Une fois les moteurs ajoutés, la masse totale du prototype est d'environ 4 kg. Afin de donner une meilleure idée de l'apport du redimensionnement effectué, le tableau 7.1 présente la force maximale et le poids des deux actionneurs sélectionnés. Le rapport d'échelle entre le poids du moteur et la force maximale est également donné afin de vérifier que cela ne diminue pas la capacité d'actionnement. Le premier

Référence du moteur	Poids (stator & slider)	Force maximale	Rapport d'échelle (Force/Poids)
P01-48x240	3.67 kg	585 newton	0,159
P02-23Sx80F	0,425 kg	67 newton	0,158

TABLE 7.1 – Tableau des deux moteurs utilisés et rapports d'échelle.

Caractéristique	Valeur
Force maximale	67,1 N
Vitesse maximale	4,9 m/s
Résolution en position	0,002 mm
Répétabilité	0.05 mm
Courant maximal	7,4 A

TABLE 7.2 – Caractéristiques techniques du moteur P02-23Sx80F.



FIGURE 7.1 – Les différents éléments constituant le robot bipède.

moteur, le P01-48x240, correspond au modèle anticipé au début de la thèse. Le second moteur, le P02-23Sx80F, est celui choisi après le travail de redimensionnement. Les caractéristiques de ce moteur, comme sa force ou vitesse maximale, sont disponibles dans le tableau 7.2.

Les moteurs sont commandés par des variateurs industriels. Seulement, ces derniers sont encombrants, surtout en les comparant à ceux des moteurs plus petits. Pour éviter de surcharger le prototype et garantir sa stabilité dans l'axe non-actionné (le robot étant plan), un portique est réalisé afin de pouvoir maintenir le robot et porter les variateurs. Les figures 7.4a et 7.4b montrent le prototype installé sur le portique, ainsi que les variateurs installés sur ce dernier. Cependant, le portique est relativement lourd et ajoute donc une masse supplémentaire à entraîner pour les mouvements non-statiques. Pour résoudre ce problème, un second portique compensé, semblable à un modèle 4-barres, permet un maintien équivalent du prototype, mais sans rajouter de masse grâce à un système de contrepoids. Les plans des différents éléments ainsi que les matrices d'inerties associées



FIGURE 7.2 – Masse de la structure du bipède (sans moteur).

sont données dans B.



(a) Prototypé monté sur le portique.



(b) Les variateurs des moteurs montés sur le portique.

FIGURE 7.4 – Photos avant et arrière du prototype et de la première version du portique.



FIGURE 7.3 – Chassis nu du bipède.

7.2 Expérience

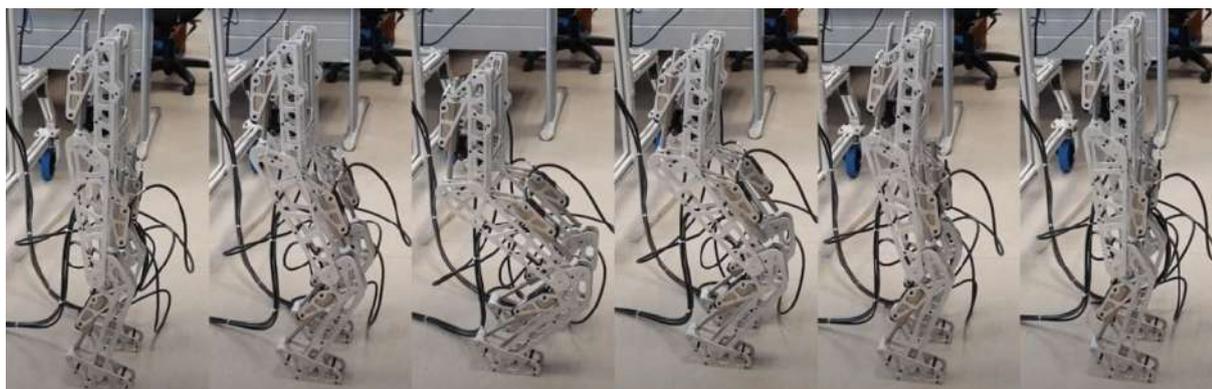


FIGURE 7.5 – Mouvement de squat du prototype.

Cette section présente la première expérience réalisée à ce jour. La manipulation consiste à réaliser avec le prototype un mouvement de squat. Le squat est un mouvement sans déplacement, mais néanmoins plus exigeant que la marche en termes de couples requis aux articulations et d'amplitudes articulaires. De plus, la commande des moteurs via des trajectoires pré-établies n'est pas encore possible. En effet, les moteurs n'acceptent pour l'instant que des positions, ce qui empêche la réalisation de mouvements dynamiques. Ce mouvement relativement simple au niveau de la commande permet donc d'avoir de premiers résultats tout en préparant la réalisation de mouvements plus complexes. La figure A.1 montre la réalisation du mouvement par le prototype, et les figures 7.6 et 7.7

montrent les positions des moteurs ainsi que les courants les traversant au cours du squat. Enfin, la figure 7.8 présente les angles articulaires au cours du mouvement pour chacune des articulations. Ces dernières ont pu être comparées avec une vidéo du mouvement afin de vérifier leur bonne estimation.

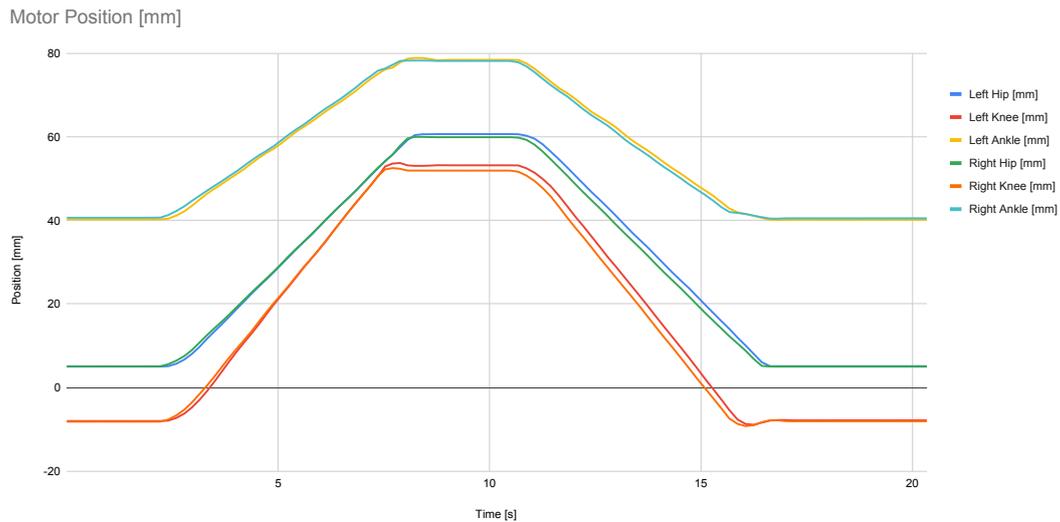


FIGURE 7.6 – Position des moteurs au cours d'un mouvement de squat.

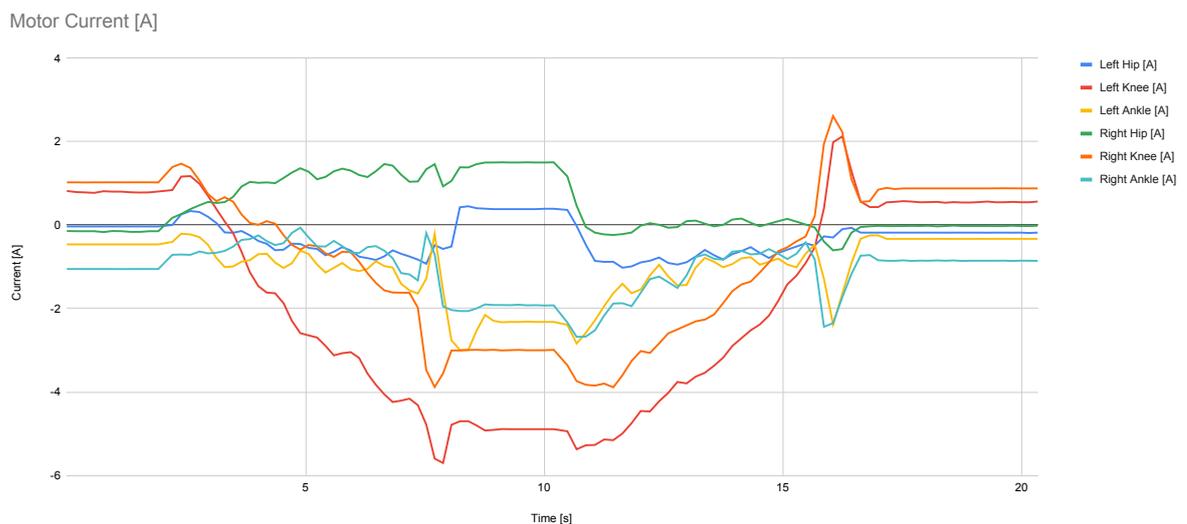


FIGURE 7.7 – Courant des moteurs mesuré par les variateurs au cours d'un mouvement de squat.

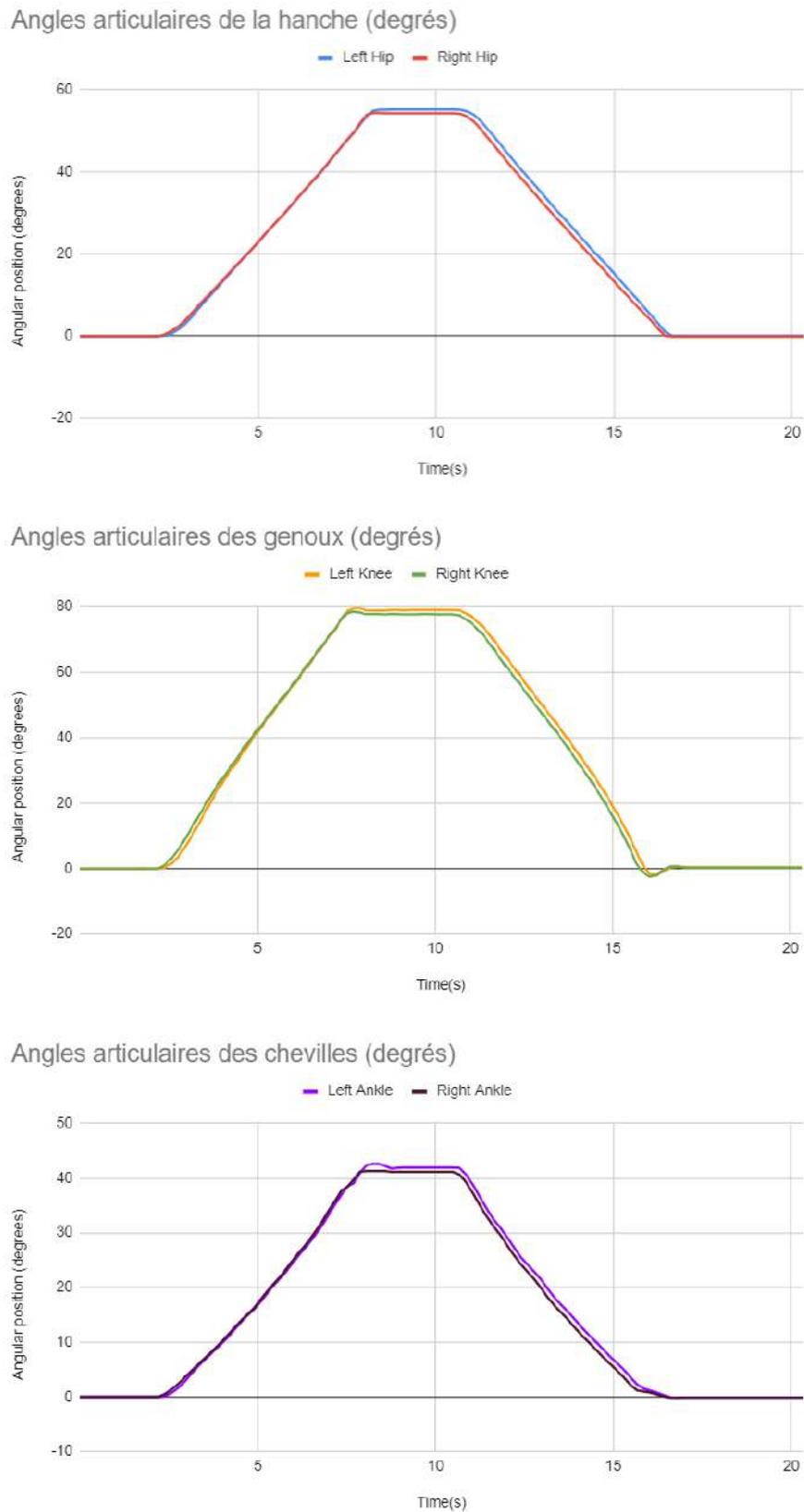


FIGURE 7.8 – Angles articulaires du prototype pour un mouvement de squat.

7.3 Discussion

Suite à ces premiers essais, un état des lieux peut être réalisé. Le premier constat est que le premier mouvement de squat est réalisable. L'équipe a pu réaliser et piloter un robot planaire actionné uniquement à l'aide de moteurs linéaires à entraînement direct. En effet, le prototype est capable de réaliser un mouvement fluide de manière stable, et ce même sans trajectoire optimisée pour l'architecture. De plus, le mouvement de squat est celui demandant la plus grande amplitude articulaire ainsi que des couples élevés. Cela permet d'envisager la réalisation de mouvements de marche, de course. Un autre élément à souligner est l'absence de singularité pendant le mouvement de squat, ceci en dépit de l'amplitude articulaire importante. Lors de l'assemblage et des essais préliminaires, nous avons pu constater que l'architecture mécanique est exempte de singularités quel que soit le débattement articulaire. Un élément notable de cette absence de singularité est que, bien qu'aucune démarche n'ait été entreprise délibérément pour s'affranchir des singularités, les résultats d'optimisation permettent de les éviter naturellement. Ceci s'explique par le fait qu'une singularité empêche de produire un couple élevé et donc limite la faisabilité, qui est notre critère d'optimisation. De ce fait, s'assurer d'un mouvement entièrement réalisable sous-entend l'absence de singularité au cours du mouvement.

Concernant les variateurs, nous avons pu constater une surestimation du courant par ces derniers, notamment en comparant avec le courant affiché sur l'alimentation. Notre alimentation ayant été récemment étalonnée, nous pouvons affirmer que c'est cette valeur qui doit être considérée. Nous estimons l'écart entre les courants réels et la figure 6.7 avec un facteur compris entre 5 et 10. On peut en déduire que la puissance maximale lors du fonctionnement du prototype sur un mouvement de squat est comprise entre 300 et 500 W. Un point important est la présence d'une sécurité logicielle du constructeur des moteurs afin d'éviter tout risque de casse. Cette sécurité est mise en place par une coupure totale des actionneurs dès lors qu'un seuil de température est atteint. Cela limite artificiellement les performances maximales des moteurs. Cela impose donc une limitation du doublet vitesse/force des actionneurs pour éviter les échauffements par induction et une coupure en plein mouvement. Cette limite a pu être mise en évidence avec le mouvement de squat lors d'essais pour une trajectoire accélérée ou un maintien en position basse trop longue. Cette limite enjoint à vérifier les vitesses articulaires lors de mouvements plus complexes et rapides. Un dernier élément qui peut être noté est l'existence d'un léger jeu dans les articulations. Ce problème n'est pas impactant lors de la réalisation du mouvement de

squat, mais pourrait le devenir pour des mouvements dynamiques. Cependant, cela est un problème mécanique lié à la conception, et est facilement corrigible.

Globalement, ce type de moteur semble une alternative viable aux moteurs rotatifs. Un avantage étant de ne plus se limiter à placer les actionneurs proches des articulations, et de potentiellement réduire l'encombrement du robot. Cela offre également la possibilité d'ajouter un ressort virtuel sans ajout d'élément via un contrôle logiciel, notamment pour la mitigation de perturbations extérieures.

CONCLUSION

8.1 Conclusion et perspectives

Ce manuscrit a présenté les différents aspects relatifs à l'actionnement d'un robot bipède. Suite aux derniers travaux de l'équipe ROBIBIO concernant l'utilisation d'un actionneur linéaire, une preuve de concept avait été présentée (Fig.1.4). L'objectif ultime étant la réalisation d'un robot humanoïde complet, un premier jalon a été fixé. Cette première étape est la réalisation d'un robot bipède planaire actionné exclusivement par des moteurs linéaires à entraînement direct, et est l'objet de ce travail de recherche.

Comme mis en avant dans la bibliographie, de nombreuses solutions pour la conception d'un robot marcheur (humanoïde ou non) existent dans la littérature, mais aucune n'utilise de moteurs linéaires à entraînement direct. Afin de bien appréhender les problématiques de la conception d'un robot bipède, certaines notions liées à la motorisation d'un système comme la réversibilité, la bi-articularité ou encore la redondance sont présentées.

En effet, notre objectif est la conception d'un robot bipède anthropomorphe et pouvant marcher dynamiquement. Ce double objectif nécessite l'utilisation de moteurs intégrables à l'architecture et capables de gérer des perturbations, le tout en générant le mouvement demandé. La réversibilité impacte la capacité d'un actionneur à supporter une perturbation mécanique, tandis que la bi-articularité et la redondance permettent de multiplier les solutions envisageables pour réaliser l'actionnement. Les avantages des moteurs linéaires sont également mis en avant. L'utilisation de moteurs linéaire est un changement de paradigme vis-à-vis de l'état de l'art et nous avons précisé ou (re)défini un vocabulaire propre à ces travaux, avec notamment le rappel de termes tels que l'architecture, la géométrie ou bien la configuration d'un robot. Ensuite, les critères utilisés pour définir une architecture et une géométrie considérées comme admissibles sont explicités, ainsi que la sélection de mouvements significatifs. Le problème d'optimisation mis en place ainsi que le critère utilisé sont définis. Ce problème d'optimisation consiste à déterminer la meilleure architecture ainsi que la géométrie optimale associée afin de réaliser le ou les mouvements

demandés. Pour mettre en place un algorithme d'optimisation correspondant à cet objectif, nous définissons comme critère la faisabilité du mouvement, que nous cherchons à maximiser.

Cette définition est suivie par la mise en formule du calcul de bras de levier en utilisant un moteur linéaire, avec un exemple de calcul pour une articulation. Enfin, l'architecture du simulateur, le protocole de simulation et d'optimisation d'une architecture ont été détaillés. Les résultats associés ont été donnés, avant une présentation de la réalisation matérielle du prototype et des résultats des premiers essais effectués.

La manipulation consiste en la réalisation d'un mouvement de squat par le robot. Ce dernier est commandé en position, et l'expérience est réalisée avec et sans le portique pour évaluer la stabilité du mouvement. L'expérimentation sur le prototype d'un mouvement de squat est concluante. Le robot a effectué le mouvement de manière fluide, bien que le squat requière une grande amplitude articulaire ainsi que des couples importants. Après la preuve de concept, ces travaux permettent une validation supplémentaire de l'utilisation de moteurs linéaires pour la conception d'un robot humanoïde bipède, ainsi que la démarche théorique entreprise. Cela permet également de mettre en évidence certaines limites techniques des actionneurs qui doivent être considérées lors de leur utilisation pour ce type de robot. En effet, une surestimation des courants par les variateurs nécessite d'anticiper cela dans la commande des actionneurs. De plus, la sécurité logicielle imposée limite pour l'instant les mouvements possibles. Dès lors que la vitesse demandée devient trop importante ou que l'effort requis perdure, les variateurs forcent l'extinction totale du moteur, ce qui provoque un relâchement indésirable de l'actionnement de l'articulation concernée.

À l'issue de ces travaux, nous avons plusieurs intuitions que nous allons formuler sous forme d'hypothèses. Un essai de marche statique a été réalisé avec le prototype sur une trajectoire pré-enregistrée. Sans stabilisation, le résultat n'est pas concluant, car la répétabilité est médiocre. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle cet essai n'est pas présenté dans ce manuscrit. Toutefois, ce test nous apparaît très encourageant et laisse entrevoir la possibilité de réaliser des cycles de marche dans de bonnes conditions. Cet essai a notamment mis en évidence la très faible consommation du prototype sur ce type de mouvement. Notre hypothèse est que l'optimisation a privilégié les performances sur ces mouvements plus fréquents dans notre base de mouvements, par rapport au squat. Ces résultats positifs permettent donc de se projeter sur la poursuite de ces travaux. En termes de perspective, la première étape à court terme est l'écriture du modèle dynamique du prototype. Ce

modèle devrait nous permettre le calcul du ZMP (Zero Moment Point), qui correspond à sa zone d'équilibre et donc à son critère de stabilité. Tous ces éléments devront ensuite être validés en réalisant des mouvements plus complexes comme la marche ou la course dans un premier temps. Si ces résultats sont concluants, une étude en charge devra être réalisée. Pour cela, il faudrait suralimenter les moteurs au-delà des préconisations du fabricant. Ce n'est fondamentalement pas un problème, car les cycles de marche ou de course sont intermittents et les sur-courants ponctuels. C'est d'ailleurs une démarche classique en robotique, notamment en robotique humanoïde. C'est en revanche un problème technique à l'heure actuelle, puisque les sécurités de nos variateurs industriels limitent les performances du prototype.

Si ces résultats sont concluants, nous pourrions envisager, à plus long terme, le passage à une paire de jambe complète, c'est-à-dire à 12 degrés de libertés :

- 3 degrés de liberté par hanche
- 1 degré de liberté par genou
- 2 degrés de liberté par cheville

L'utilisation de moteurs linéaires sur une articulation à plusieurs degrés de liberté permet d'augmenter le couple sur un ou plusieurs axes au détriment des autres. Par exemple, il est possible avec deux moteurs identiques d'augmenter le couple exercé autour de l'axe transversal au détriment du couple exercé sur l'axe antéro-postérieur. Cela pourrait permettre d'augmenter le couple sur les axes les plus sollicités et d'augmenter les performances générales. Ce passage à la 3D implique une augmentation du nombre d'architectures et une explosion combinatoire sur l'actionnement par des moteurs linéaires, avec notamment des solutions avec des actionneurs bi-articulaires, ou bien plus simplement des doublements de moteurs. Cela pose à nouveau la question du choix de l'architecture, de l'optimisation, etc. Il existe donc un potentiel d'exploration important sur ce type de problème.

CALCUL DE L'ANGLE À PARTIR DE L'ÉLONGATION DU MOTEUR

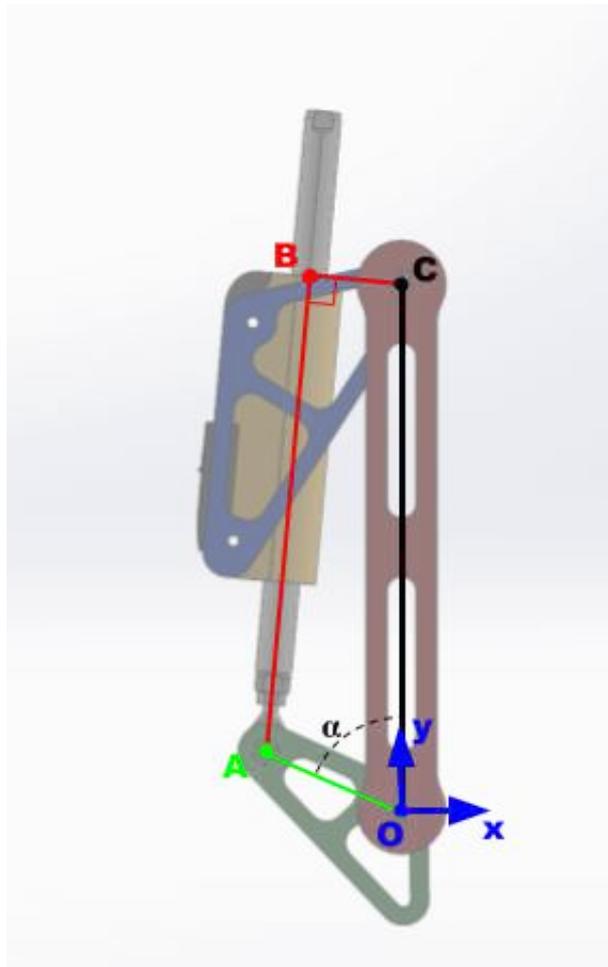


FIGURE A.1 – Modélisation d'une articulation actionnée (avec offset moteur).

Cette annexe est consacrée à formaliser le problème de calcul de l'angle articulaire (ici α) en fonction de l'élongation du moteur (la distance AB), ainsi que le problème inverse.

Un schéma est proposé sur la figure A.1 Pour cela nous formulons comme hypothèses que :

- Les longueurs $|OC|$, $|CB|$ et $|OA|$ sont fixes.
- Les segments BA et CB sont perpendiculaires
- Le segment OC est vertical

Le problème direct est de calculer l'angle α en fonction de la longueur $|AB|$ (et $|OC|$, $|CB|$ et $|OA|$). Autrement dit, il faut trouver f , tel que $\alpha = f(|AB|, |OC|, |CB|, |OA|)$

Le problème inverse est de calculer la longueur $|AB|$ en fonction de l'angle α (et $|OC|$, $|CB|$ et $|OA|$). Autrement dit, il faut trouver g tel que $|AB| = g(\alpha, |OC|, |CB|, |OA|)$

A.1 Problème direct - calcul de α

ABC est un triangle rectangle en B ce qui permet d'écrire :

$$|AC|^2 = |BC|^2 + |AB|^2 \quad (\text{A.1})$$

De plus, la loi des cosinus nous donne $|AC|^2 = |OA|^2 + |OC|^2 - 2(|OA||OC|) \cdot \cos(\alpha)$

Ce qui nous donne

$$\cos(\alpha) = \frac{|OA|^2 + |OC|^2 - |AC|^2}{2|OA||OC|} \quad (\text{A.2})$$

En remplaçant $|AC|^2$ par son expression nous obtenons

$$\cos(\alpha) = \frac{|OA|^2 + |OC|^2 - |AB|^2 - |BC|^2}{2|OA||OC|} \quad (\text{A.3})$$

Soit

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{|OA|^2 + |OC|^2 - |AB|^2 - |BC|^2}{2|OA||OC|} \right) \quad (\text{A.4})$$

A.2 Problème inverse - calcul de la Distance AB

Pour le problème inverse nous connaissons $|OC|$, $|OA|$ et α .

Nous pouvons calculer $|AC|$ en utilisant le repère centré en O :

$$\vec{AC} = -\vec{OA} + \vec{OC}$$

avec $O = (0, 0)$; $C = (0, |OC|)$ et $A = (-\cos(\alpha) \cdot |OA|, \sin(\alpha) \cdot |OA|)$.

On obtient alors $|\vec{AC}| = \sqrt{(|OA| \cdot \cos(\alpha))^2 + (|OC| - |OA| \cdot \sin(\alpha))^2}$

Enfin comme ABC est un triangle rectangle en B, nous avons

$$AC^2 = BC^2 + AB^2 \quad (\text{A.5})$$

Ce qui permet de calculer la longueur AB :

$$|AB| = \sqrt{AC^2 - BC^2} = \sqrt{(|OA| \cdot \cos(\alpha))^2 + (|OC| - |OA| \cdot \sin(\alpha))^2 - BC^2} \quad (\text{A.6})$$

FICHIERS DE CONCEPTION DU PROTOTYPE

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

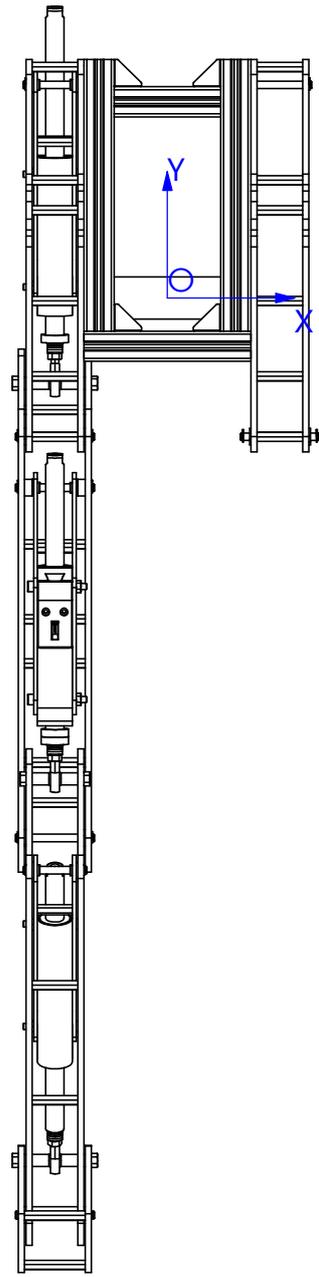
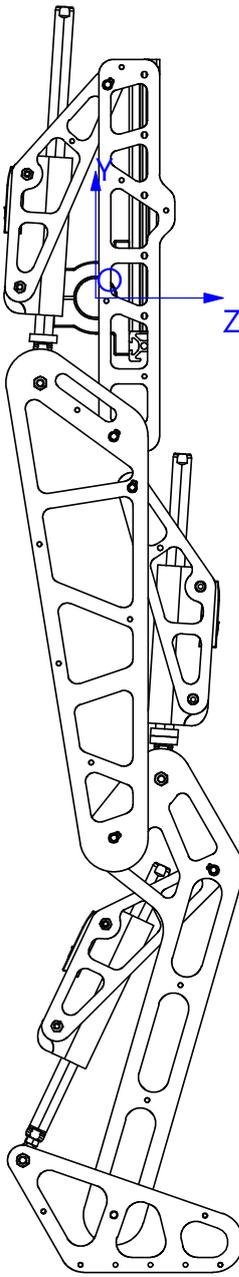
C

B

B

A

A



SAUF INDICATION CONTRAIRE:
 LES COTES SONT EN MILLIMETRES
 ETAT DE SURFACE:
 TOLERANCES:
 LINEAIRES:
 ANGULAIRES:

FINITION:

CASSER LES ANGES VIFS

NE PAS CHANGER L'ECHELLE

REVISION

	NOM	SIGNATURE	DATE	
AUTEUR				
VERIF.				
APPR.				
FAB.				
QUAL.				

TITRE:	
No. DE PLAN	
robot	A4
MASSE:	ECHELLE:1:10
	FEUILLE 1 SUR 1

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

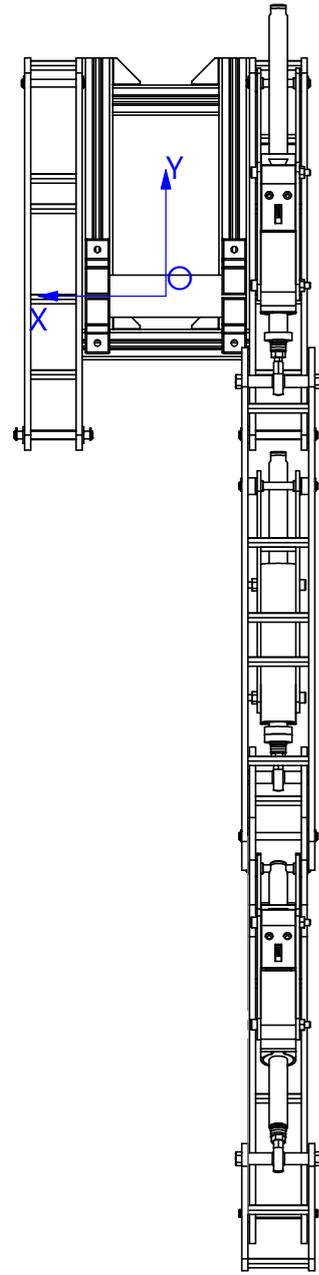
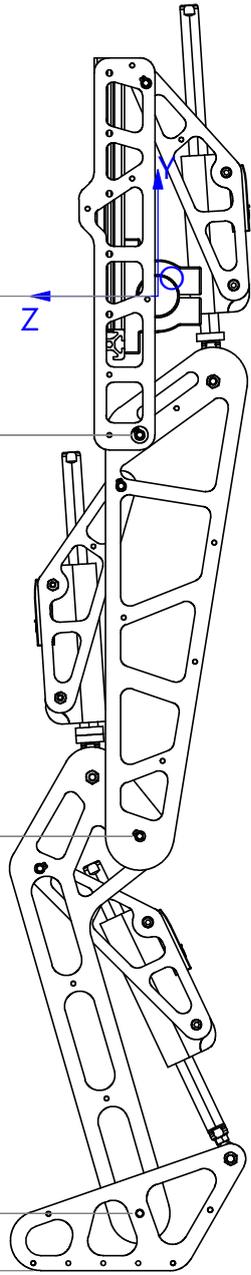
C

B

B

A

A



SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:			FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECELLE		REVISION		
NOM			SIGNATURE		DATE		TITRE:				
AUTEUR							robot				
VERIF.											
APPR.											
FAB.											
QUAL.					MATERIAU:		No. DE PLAN		A4		
					MASSE:		ECHELLE:1:10		FEUILLE 1 SUR 1		

4

3

2

1

4

3

2

1

Propriétés de masse de robot

Configuration: Droit

Système de coordonnées: -- par défaut --

* Inclut les propriétés de masse d'un ou plusieurs composants/corps cachés.

Masse = 2921.10 grammes

Volume = 872414.41 millimètres cubes

Superficie = 563997.90 millimètres carrés

Centre de gravité: (millimètres)

X = -54.86

Y = -182.44

Z = 13.36

Principaux axes et moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

Pris au centre de gravité.

Ix = (0.08, 1.00, -0.03) Px = 8770325.80

Iy = (-0.92, 0.06, -0.39) Py = 161380325.18

Iz = (-0.39, 0.06, 0.92) Pz = 163884109.28

Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

Pris au centre de gravité et aligné avec le système de coordonnées de sortie.

Lxx = 160794516.93 Lxy = 12178069.41 Lxz = 582213.69

Lyx = 12178069.41 Lyy = 9852579.55 Lyz = -4108641.73

Lzx = 582213.69 Lzy = -4108641.73 Lzz = 163387663.79

Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

Pris au système de coordonnées de sortie.

Ixx = 258540250.78 Ixy = 41414609.85 Ixz = -1558296.48

Iyx = 41414609.85 Iyy = 19165485.24 Iyz = -11226796.55

Izx = -1558296.48 Izy = -11226796.55 Izz = 269404012.93

Un ou plusieurs composants ont des propriétés de masse remplacées:

stator_0186-0254_1001213_PS02-23Sx80-K-f<1><Défaut>@stator<1><Défaut>

slider_230_0186-0119_160404_PL01-12x230_190-HP<1><Défaut>@slider_hip<1><Défaut>

rotule_HPC__CMM_00_05_RH_0_<1><Défaut>@slider_hip<1><Défaut>

stator_0186-0254_1001213_PS02-23Sx80-K-f<1><Défaut>@stator<2><Défaut>

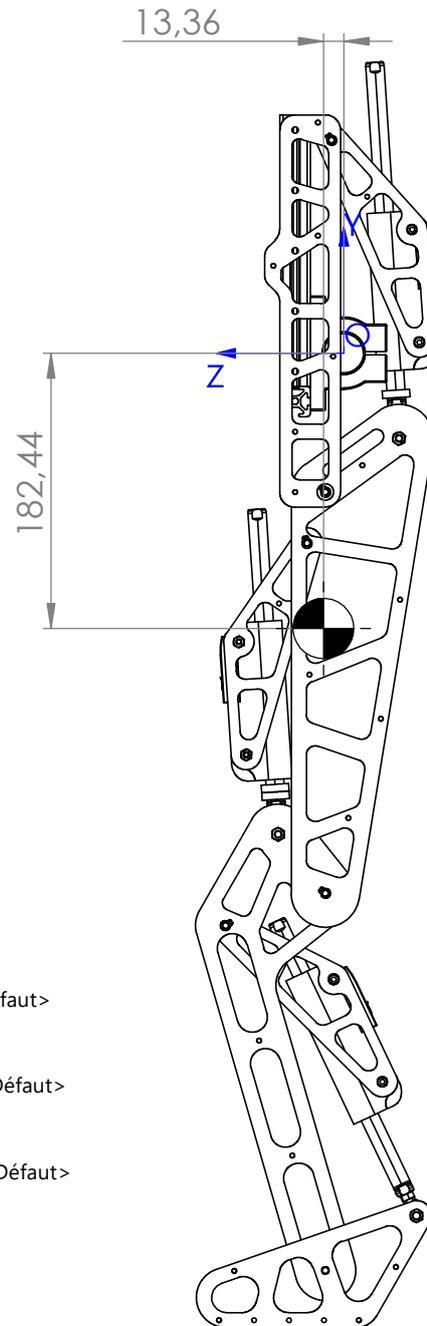
slider_200_0186-0117_160404_PL01-12x200_160-HP<1><Défaut>@slider_knee<1><Défaut>

rotule_HPC__CMM_00_05_RH_0_<1><Défaut>@slider_knee<1><Défaut>

stator_0186-0254_1001213_PS02-23Sx80-K-f<1><Défaut>@stator<3><Défaut>

slider_200_0186-0117_160404_PL01-12x200_160-HP<1><Défaut>@slider_ankle<2><Défaut>

rotule_HPC__CMM_00_05_RH_0_<1><Défaut>@slider_ankle<2><Défaut>



ATTENTION, C'EST POUR LA JAMBE DROITE + LE BASSIN

(Il n'y a pas la jambe gauche)

SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:			FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION		
					TITRE:						
					No. DE PLAN						
					robot						
					A4						
					MASSE:						
					ECHELLE:1:10						
					FEUILLE 1 SUR 1						

4

3

2

1

6 5 4 3 2 1

Propriétés de masse de full_hip
 Configuration: Défaut
 Système de coordonnées: -- par défaut --

Masse = 755.71 grammes

Volume = 285680.73 millimètres cubes

Superficie = 228733.64 millimètres carrés

Centre de gravité: (millimètres)

X = 0.00
 Y = 35.33
 Z = 23.73

Principaux axes et moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

Pris au centre de gravité.

$I_x = (0.00, 1.00, 0.03)$ $P_x = 2978452.69$
 $I_y = (-1.00, 0.00, 0.00)$ $P_y = 4297288.61$
 $I_z = (0.00, -0.03, 1.00)$ $P_z = 6949909.81$

Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

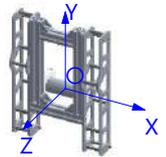
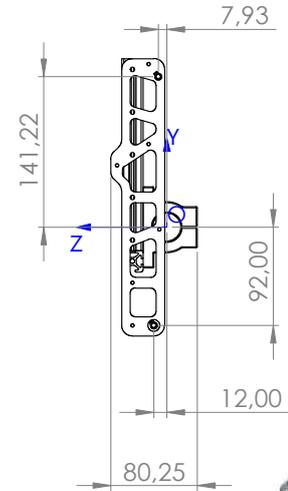
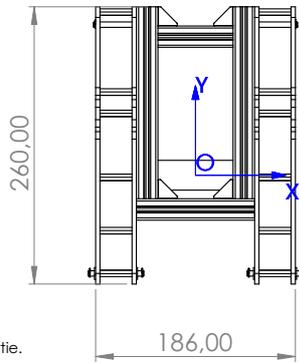
Pris au centre de gravité et aligné avec le système de coordonnées de sortie.

$L_{xx} = 4297288.61$ $L_{xy} = 0.06$ $L_{xz} = -0.06$
 $L_{yx} = 0.06$ $L_{yy} = 2981167.79$ $L_{yz} = 103805.23$
 $L_{zx} = -0.06$ $L_{zy} = 103805.23$ $L_{zz} = 6947194.71$

Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

Pris au système de coordonnées de sortie.

$I_{xx} = 5666359.28$ $I_{xy} = 0.05$ $I_{xz} = -0.07$
 $I_{yx} = 0.05$ $I_{yy} = 3406694.01$ $I_{yz} = 737447.80$
 $I_{zx} = -0.07$ $I_{zy} = 737447.80$ $I_{zz} = 7890739.16$



SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES				FINITION:		CASSER LES ANGES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION	
ETAT DE SURFACE:											
TOLERANCES:											
LINEAIRES:											
ANGULAIRES:											
NOM				SIGNATURE		DATE		TITRE:			
AUTEUR											
VERIF.											
APPR.											
FAB.											
QUAL.						MATERIAU:		No. DE PLAN		A4	
								full_hip			
						MASSE:		ECHELLE:1:5		FEUILLE 1 SUR 1	

6 5 4 3 2 1

D
C
B
A

D
C
B
A

6 5 4 3 2 1

Propriétés de masse de full_hip
 Configuration: Défaut
 Système de coordonnées: -- par défaut --

Masse = 755.71 grammes

Volume = 285680.73 millimètres cubes

Superficie = 228733.64 millimètres carrés

Centre de gravité: (millimètres)

X = 0.00
 Y = 35.33
 Z = 23.73

Principaux axes et moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

Pris au centre de gravité.

$I_x = (0.00, 1.00, 0.03)$ $P_x = 2978452.69$
 $I_y = (-1.00, 0.00, 0.00)$ $P_y = 4297288.61$
 $I_z = (0.00, -0.03, 1.00)$ $P_z = 6949909.81$

Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

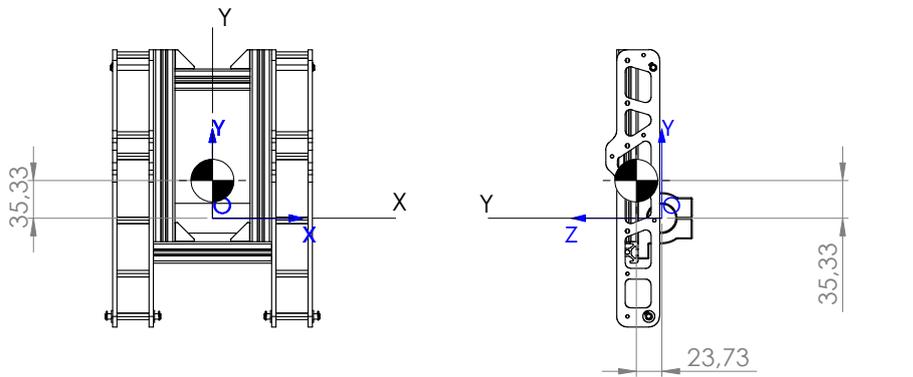
Pris au centre de gravité et aligné avec le système de coordonnées de sortie.

$L_{xx} = 4297288.61$ $L_{xy} = 0.06$ $L_{xz} = -0.06$
 $L_{yx} = 0.06$ $L_{yy} = 2981167.79$ $L_{yz} = 103805.23$
 $L_{zx} = -0.06$ $L_{zy} = 103805.23$ $L_{zz} = 6947194.71$

Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

Pris au système de coordonnées de sortie.

$I_{xx} = 5666359.28$ $I_{xy} = 0.05$ $I_{xz} = -0.07$
 $I_{yx} = 0.05$ $I_{yy} = 3406694.01$ $I_{yz} = 737447.80$
 $I_{zx} = -0.07$ $I_{zy} = 737447.80$ $I_{zz} = 7890739.16$



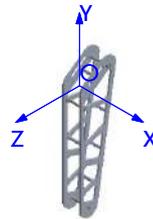
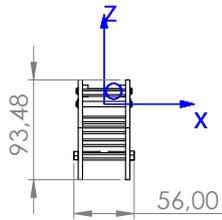
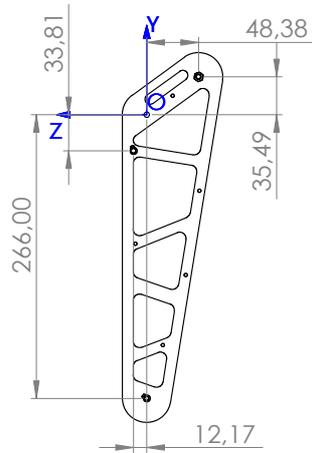
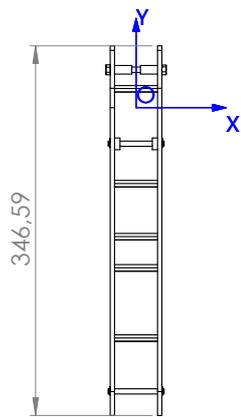
SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES		FINITION:		CASSER LES ANGES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION	
ETAT DE SURFACE:									
TOLERANCES:									
LINEAIRES:									
ANGULAIRES:									
NOM		SIGNATURE		DATE		TITRE:			
AUTEUR									
VERIF.									
APPR.									
FAB.									
QUAL.				MATERIAU:		No. DE PLAN		A4	
						full_hip			
				MASSE:		ECHELLE:1:5		FEUILLE 1 SUR 1	

6 5 4 3 2 1

D
C
B
A

D
C
B
A

6 5 4 3 2 1



Propriétés de masse de knee
Configuration: Défaut
Système de coordonnées: -- par défaut --

Masse = 292.15 grammes

Volume = 103586.04 millimètres cubes

Superficie = 73481.05 millimètres carrés

Centre de gravité: (millimètres)

X = 0.00

Y = -105.19

Z = -13.98

Principaux axes et moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

Pris au centre de gravité.

$I_x = (0.00, 0.99, -0.10)$ $P_x = 308679.17$

$I_y = (0.00, 0.10, 0.99)$ $P_y = 3428740.67$

$I_z = (1.00, 0.00, 0.00)$ $P_z = 3466495.39$

Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

Pris au centre de gravité et aligné avec le système de coordonnées de sortie.

$L_{xx} = 3466495.39$ $L_{xy} = 0.00$ $L_{xz} = 0.00$

$L_{yx} = 0.00$ $L_{yy} = 341999.10$ $L_{yz} = -320702.40$

$L_{zx} = 0.00$ $L_{zy} = -320702.40$ $L_{zz} = 3395420.74$

Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

Pris au système de coordonnées de sortie.

$I_{xx} = 6756101.10$ $I_{xy} = 0.00$ $I_{xz} = 0.00$

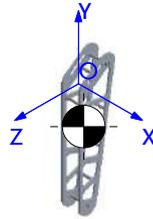
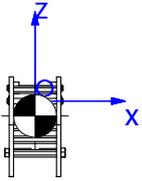
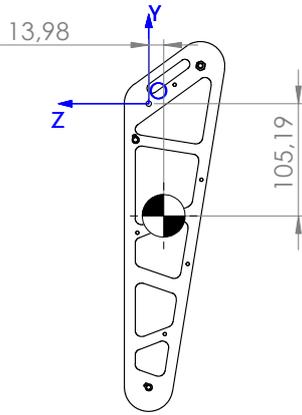
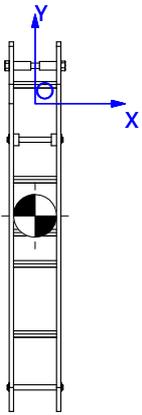
$I_{yx} = 0.00$ $I_{yy} = 399112.02$ $I_{yz} = 108968.52$

$I_{zx} = 0.00$ $I_{zy} = 108968.52$ $I_{zz} = 6627913.53$

SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES				FINITION:		CASSER LES ANGES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION	
ETAT DE SURFACE:											
TOLERANCES:											
LINEAIRES:											
ANGULAIRES:											
				NOM		SIGNATURE		DATE		TITRE:	
AUTEUR											
VERIF.											
APPR.											
FAB.											
QUAL.						MATERIAU:		No. DE PLAN		A4	
								knee			
						MASSE:		ECHELLE:1:5		FEUILLE 1 SUR 1	

6 5 4 3 2 1

6 5 4 3 2 1



Propriétés de masse de knee
Configuration: Défaut
Système de coordonnées: -- par défaut --

Masse = 292.15 grammes
Volume = 103586.04 millimètres cubes
Superficie = 73481.05 millimètres carrés

Centre de gravité: (millimètres)
X = 0.00
Y = -105.19
Z = -13.98

Principaux axes et moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)
Pris au centre de gravité.
Ix = (0.00, 0.99, -0.10) Px = 308679.17
Iy = (0.00, 0.10, 0.99) Py = 3428740.67
Iz = (1.00, 0.00, 0.00) Pz = 3466495.39

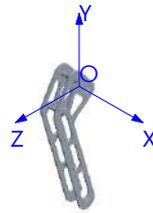
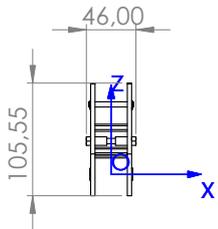
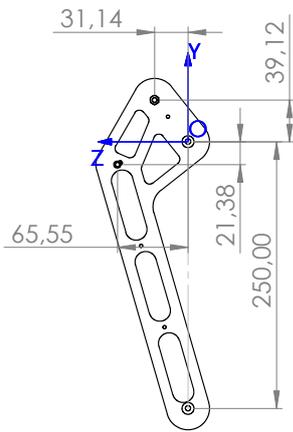
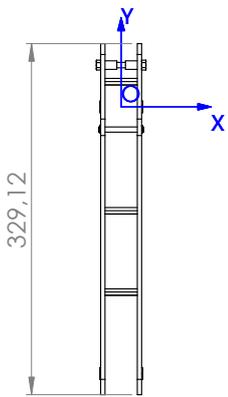
Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)
Pris au centre de gravité et aligné avec le système de coordonnées de sortie.
Lxx = 3466495.39 Lxy = 0.00 Lxz = 0.00
Lyx = 0.00 Lyy = 341999.10 Lyz = -320702.40
Lzx = 0.00 Lzy = -320702.40 Lzz = 3395420.74

Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)
Pris au système de coordonnées de sortie.
Ixx = 6756101.10 Ixy = 0.00 Ixz = 0.00
Iyx = 0.00 Iyy = 399112.02 Iyz = 108968.52
Izx = 0.00 Izy = 108968.52 Izz = 6627913.53

SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:				FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION	
						TITRE:					
AUTEUR											
VERIF.											
APPR.											
FAB.											
QUAL.						MATERIAU:					
						No. DE PLAN					
						knee					
						A4					
						MASSE:					
						ECHELLE:1:5					
						FEUILLE 1 SUR 1					

6 5 4 3 2 1

6 5 4 3 2 1



Propriétés de masse de ancle
Configuration: Défaut
Système de coordonnées: -- par défaut --

Masse = 284.46 grammes

Volume = 93454.62 millimètres cubes

Superficie = 63924.10 millimètres carrés

Centre de gravité: (millimètres)

X = 0.00

Y = -74.79

Z = 29.24

Principaux axes et moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

Pris au centre de gravité.

Ix = (0.00, 1.00, 0.08) Px = 228713.80

Iy = (0.00, -0.08, 1.00) Py = 2718667.07

Iz = (1.00, 0.00, 0.00) Pz = 2792556.97

Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

Pris au centre de gravité et aligné avec le système de coordonnées de sortie.

Lxx = 2792556.97 Lxy = -0.04 Lxz = -0.03

Lyx = -0.04 Lyy = 244901.41 Lyz = 200110.86

Lzx = -0.03 Lzy = 200110.86 Lzz = 2702479.46

Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

Pris au système de coordonnées de sortie.

Ixx = 4626902.70 Ixy = -0.04 Ixz = -0.03

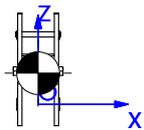
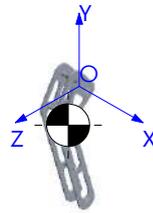
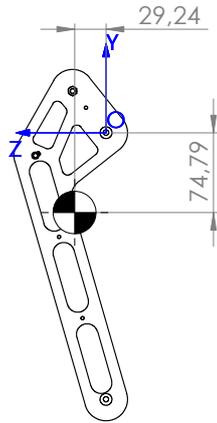
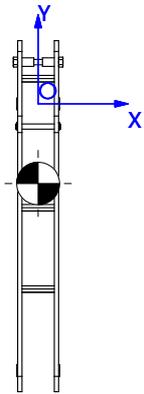
Iyx = -0.04 Iyy = 488191.29 Iyz = -422052.94

Izx = -0.03 Izy = -422052.94 Izz = 4293535.30

SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:				FINITION:	CASSER LES ANGLES VIFS	NE PAS CHANGER L'ECHELLE	REVISION
AUTEUR						TITRE:	
VERIF.							
APPR.							
FAB.							
QUAL.						No. DE PLAN	
						ankle	
						A4	
MASSE:						ECHELLE:1:5	
						FEUILLE 1 SUR 1	

6 5 4 3 2 1

6 5 4 3 2 1



Propriétés de masse de ankle
 Configuration: Défaut
 Système de coordonnées: -- par défaut --

Masse = 284.46 grammes

Volume = 93454.62 millimètres cubes

Superficie = 63924.10 millimètres carrés

Centre de gravité: (millimètres)

X = 0.00

Y = -74.79

Z = 29.24

Principaux axes et moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

Pris au centre de gravité.

Ix = (0.00, 1.00, 0.08) Px = 228713.80

Iy = (0.00, -0.08, 1.00) Py = 2718667.07

Iz = (1.00, 0.00, 0.00) Pz = 2792556.97

Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

Pris au centre de gravité et aligné avec le système de coordonnées de sortie.

Lxx = 2792556.97 Lxy = -0.04 Lxz = -0.03

Lyx = -0.04 Lyy = 244901.41 Lyz = 200110.86

Lzx = -0.03 Lzy = 200110.86 Lzz = 2702479.46

Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

Pris au système de coordonnées de sortie.

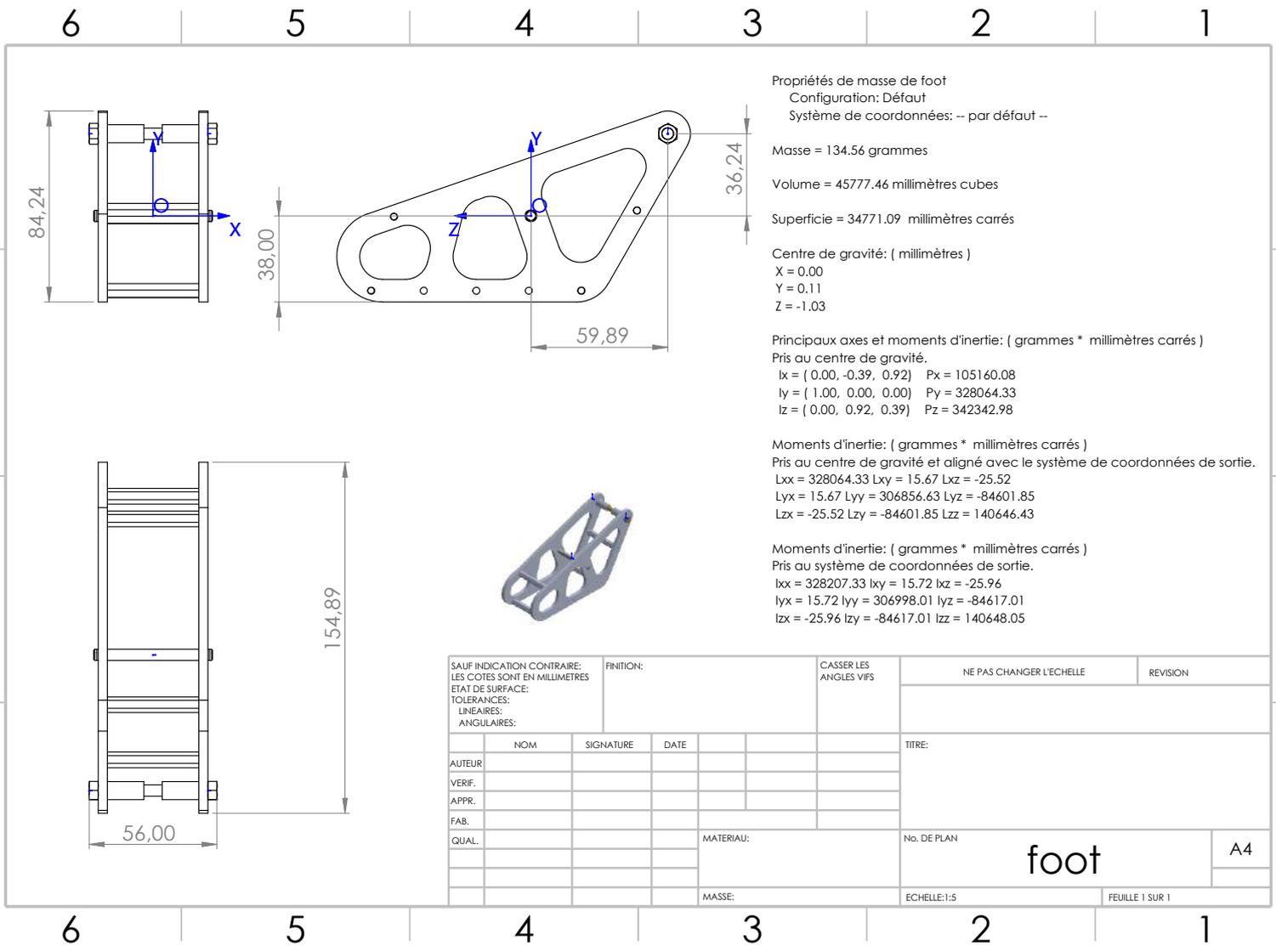
Ixx = 4626902.70 Ixy = -0.04 Ixz = -0.03

Iyx = -0.04 Iyy = 488191.29 Iyz = -422052.94

Izx = -0.03 Izy = -422052.94 Izz = 4293535.30

SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES				FINITION:		CASSER LES ANGES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION	
ETAT DE SURFACE:											
TOLERANCES:											
LINEAIRES:											
ANGULAIRES:											
		NOM		SIGNATURE		DATE				TITRE:	
AUTEUR											
VERIF.											
APPR.											
FAB.											
QUAL.						MATERIAU:		No. DE PLAN		ankle	
										A4	
						MASSE:		ECHELLE:1:5		FEUILLE 1 SUR 1	

6 5 4 3 2 1



Propriétés de masse de foot
 Configuration: Défaut
 Système de coordonnées: -- par défaut --

Masse = 134.56 grammes
 Volume = 45777.46 millimètres cubes
 Superficie = 34771.09 millimètres carrés

Centre de gravité: (millimètres)
 X = 0.00
 Y = 0.11
 Z = -1.03

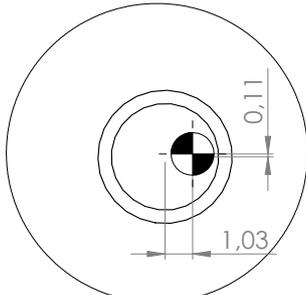
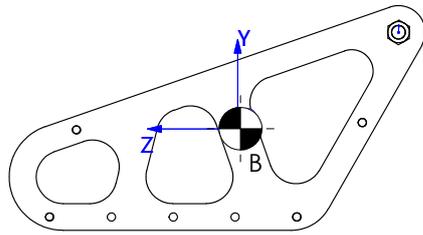
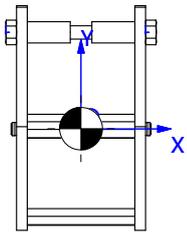
Principaux axes et moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)
 Pris au centre de gravité.
 Ix = (0.00, -0.39, 0.92) Px = 105160.08
 Iy = (1.00, 0.00, 0.00) Py = 328064.33
 Iz = (0.00, 0.92, 0.39) Pz = 342342.98

Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)
 Pris au centre de gravité et aligné avec le système de coordonnées de sortie.
 Lxx = 328064.33 Lxy = 15.67 Lxz = -25.52
 Lyx = 15.67 Lyy = 306856.63 Lyz = -84601.85
 Lzx = -25.52 Lzy = -84601.85 Lzz = 140646.43

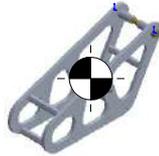
Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)
 Pris au système de coordonnées de sortie.
 Ixx = 328207.33 Ixy = 15.72 Ixz = -25.96
 Iyx = 15.72 Iyy = 306998.01 Iyz = -84617.01
 Izx = -25.96 Izy = -84617.01 Izz = 140648.05

SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:		FINITION:		CASSER LES ANGES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION	
AUTEUR		SIGNATURE		DATE		TITRE:			
VERIF.									
APPR.									
FAB.									
QUAL.				MATERIAU:		No. DE PLAN		A4	
						foot			
				MASSE:		ECHELLE:1:5		FEUILLE 1 SUR 1	

6 5 4 3 2 1



DÉTAIL B
ECHELLE 5 : 1



Propriétés de masse de foot
Configuration: Défaut
Système de coordonnées: -- par défaut --

Masse = 134.56 grammes

Volume = 45777.46 millimètres cubes

Superficie = 34771.09 millimètres carrés

Centre de gravité: (millimètres)

X = 0.00

Y = 0.11

Z = -1.03

Principaux axes et moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

Pris au centre de gravité.

$I_x = (0.00, -0.39, 0.92)$ $P_x = 105160.08$

$I_y = (1.00, 0.00, 0.00)$ $P_y = 328064.33$

$I_z = (0.00, 0.92, 0.39)$ $P_z = 342342.98$

Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

Pris au centre de gravité et aligné avec le système de coordonnées de sortie.

$L_{xx} = 328064.33$ $L_{xy} = 15.67$ $L_{xz} = -25.52$

$L_{yx} = 15.67$ $L_{yy} = 306856.63$ $L_{yz} = -84601.85$

$L_{zx} = -25.52$ $L_{zy} = -84601.85$ $L_{zz} = 140646.43$

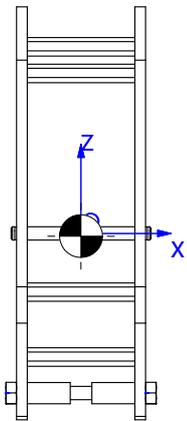
Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

Pris au système de coordonnées de sortie.

$I_{xx} = 328207.33$ $I_{xy} = 15.72$ $I_{xz} = -25.96$

$I_{yx} = 15.72$ $I_{yy} = 306998.01$ $I_{yz} = -84617.01$

$I_{zx} = -25.96$ $I_{zy} = -84617.01$ $I_{zz} = 140648.05$



SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:				FINITION:	CASSER LES ANGLES VIFS	NE PAS CHANGER L'ECHELLE	REVISION
						TITRE:	
AUTEUR	NOM	SIGNATURE	DATE			No. DE PLAN foot	A4
VERIF.							
APPR.							
FAB.							
QUAL.				MATERIAU:			
MASSE:						ECHELLE:1:5	FEUILLE 1 SUR 1

6 5 4 3 2 1

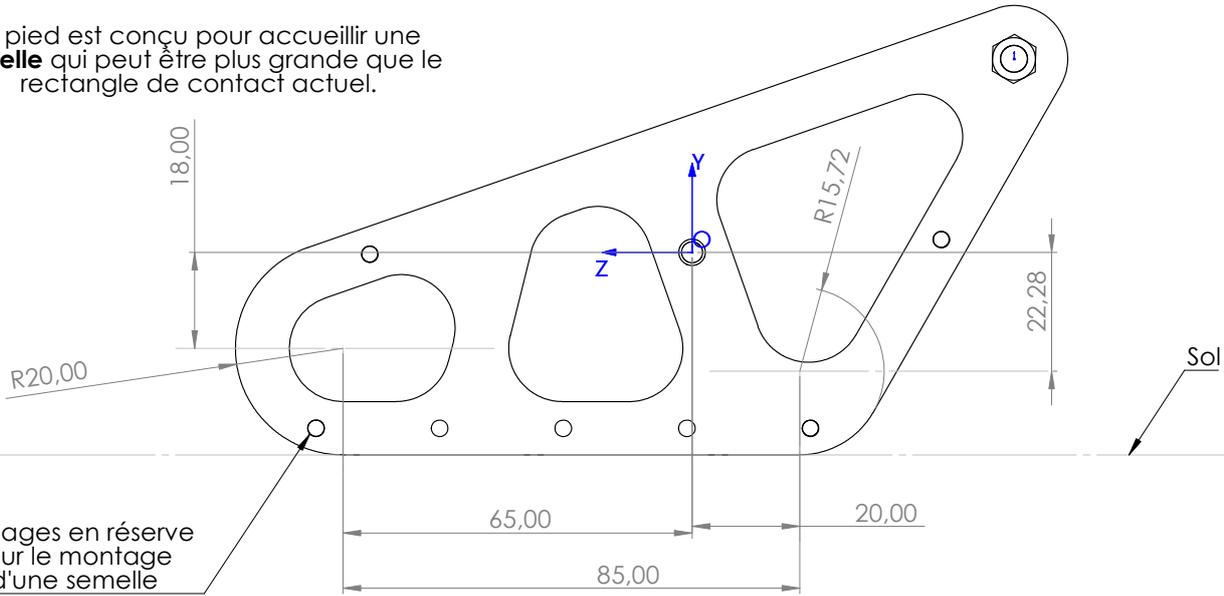
D
C
B
A

D
C
B
A

6 5 4 3 2 1

Remarque : il est facilement possible de modifier la surface de contact avec le sol.

Le pied est conçu pour accueillir une **semelle** qui peut être plus grande que le rectangle de contact actuel.

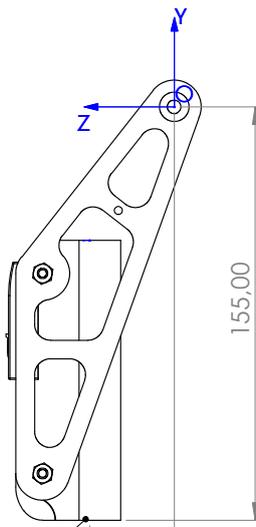
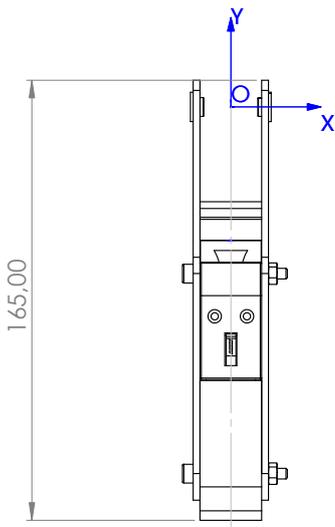


Perçages en réserve pour le montage d'une semelle

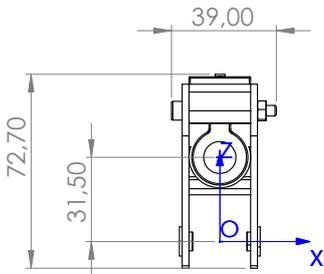
SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES		FINITION:		CASSER LES ANGES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION	
ETAT DE SURFACE:									
TOLERANCES:									
LINEAIRES:									
ANGULAIRES:									
NOM		SIGNATURE		DATE		TITRE:			
AUTEUR									
VERIF.									
APPR.									
FAB.									
QUAL.				MATERIAU:		No. DE PLAN		A4	
						foot			
				MASSE:		ECHELLE:1:5		FEUILLE 1 SUR 1	

6 5 4 3 2 1

6 5 4 3 2 1



Zéro du moteur



Propriétés de masse de stator
Configuration: Défaut
Système de coordonnées: -- par défaut --

Masse = 304.30 grammes

Volume = 88582.33 millimètres cubes

Superficie = 43159.21 millimètres carrés

Centre de gravité: (millimètres)

X = 0.05

Y = -97.32

Z = 39.82

Principaux axes et moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

Pris au centre de gravité.

Ix = (0.00, 0.99, -0.15) Px = 65294.88

Iy = (0.01, 0.15, 0.99) Py = 407017.43

Iz = (1.00, 0.00, -0.01) Pz = 431100.63

Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

Pris au centre de gravité et aligné avec le système de coordonnées de sortie.

Lxx = 431099.81 Lxy = -44.55 Lxz = 148.04

Lyx = -44.55 Lyy = 73031.18 Lyz = -50831.27

Lzx = 148.04 Lzy = -50831.27 Lzz = 399281.96

Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

Pris au système de coordonnées de sortie.

Ixx = 3795840.10 Ixy = -1598.31 Ixz = 783.69

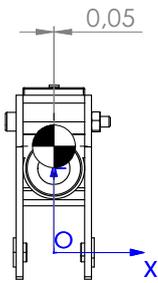
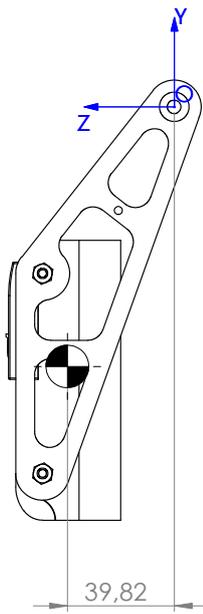
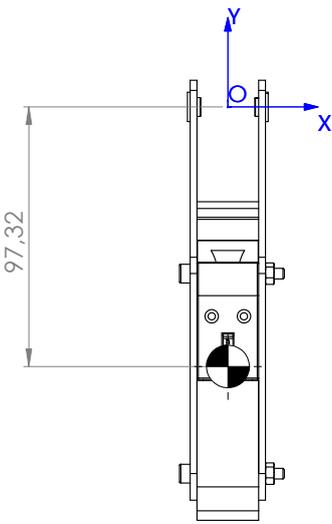
Iyx = -1598.31 Iyy = 555441.03 Iyz = -1230010.05

Izx = 783.69 Izy = -1230010.05 Izz = 3281614.07

SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES		FINITION:		CASSER LES ANGES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION	
ETAT DE SURFACE:									
TOLERANCES:									
LINEAIRES:									
ANGULAIRES:									
NOM		SIGNATURE		DATE		TITRE:			
AUTEUR									
VERIF.									
APPR.									
FAB.									
QUAL.				MATERIAU:		No. DE PLAN		A4	
						stator			
				MASSE:		ECHELLE:1:2		FEUILLE 1 SUR 1	

6 5 4 3 2 1

6 5 4 3 2 1



Propriétés de masse de stator
Configuration: Défaut
Système de coordonnées: -- par défaut --

Masse = 304.30 grammes

Volume = 88582.33 millimètres cubes

Superficie = 43159.21 millimètres carrés

Centre de gravité: (millimètres)

X = 0,05

Y = -97,32

Z = 39,82

Principaux axes et moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

Pris au centre de gravité.

ix = (0,00, 0,99, -0,15) Px = 65294,88

ly = (0,01, 0,15, 0,99) Py = 407017,43

lz = (1,00, 0,00, -0,01) Pz = 431100,63

Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

Pris au centre de gravité et aligné avec le système de coordonnées de sortie.

Lxx = 431099,81 Lxy = -44,55 Lxz = 148,04

Lyx = -44,55 Lyy = 73031,18 Lyz = -50831,27

Lzx = 148,04 Lzy = -50831,27 Lzz = 399281,96

Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

Pris au système de coordonnées de sortie.

Ixx = 3795840,10 Ixy = -1598,31 Ixz = 783,69

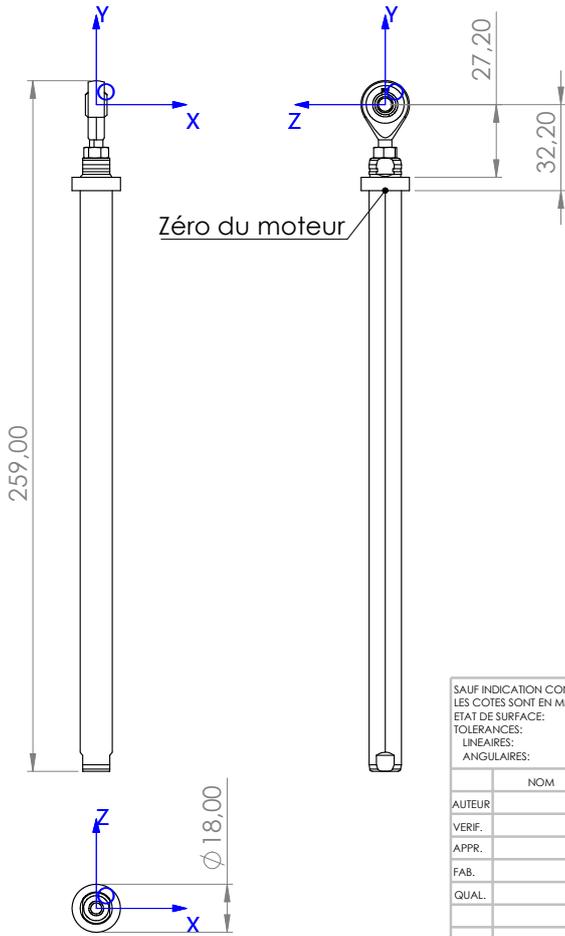
Iyx = -1598,31 Iyy = 555441,03 Iyz = -1230010,05

Izx = 783,69 Izy = -1230010,05 Izz = 3281614,07

SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES				FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION	
ETAT DE SURFACE:											
TOLERANCES:											
LINEAIRES:											
ANGULAIRES:											
NOM		SIGNATURE		DATE				TITRE:			
AUTEUR											
VERIF.											
APPR.											
FAB.											
QUAL.						MATERIAU:		No. DE PLAN		A4	
								stator			
						MASSE:		ECHELLE:1:2		FEUILLE 1 SUR 1	

6 5 4 3 2 1

6 5 4 3 2 1



Propriétés de masse de slider_hip
 Configuration: Défaut
 Système de coordonnées: -- par défaut --

Masse = 197.11 grammes
 Volume = 28318.13 millimètres cubes
 Superficie = 11957.44 millimètres carrés

Centre de gravité: (millimètres)
 X = 0.00
 Y = -123.58
 Z = 0.00

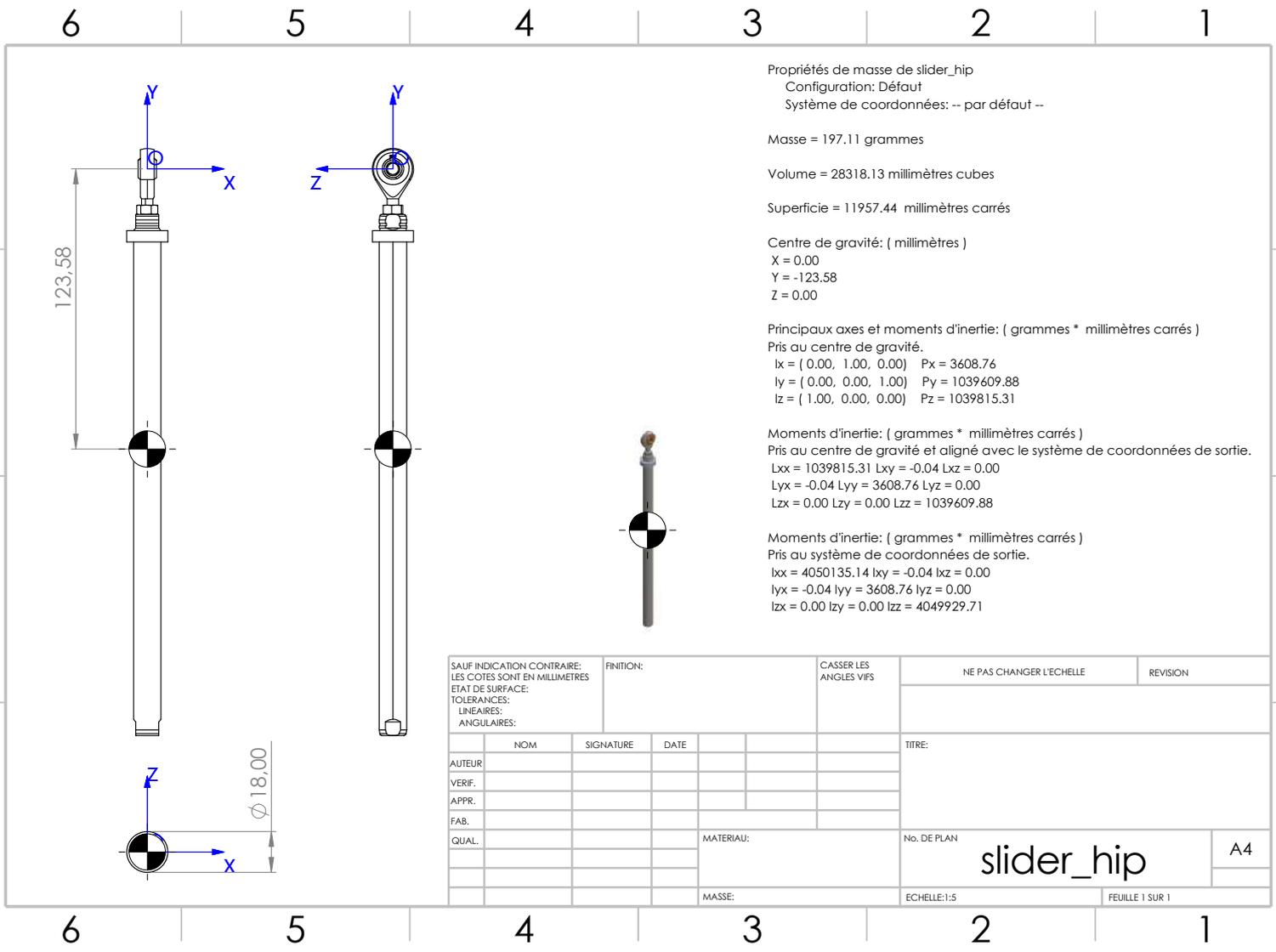
Principaux axes et moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)
 Pris au centre de gravité.
 Ix = (0.00, 1.00, 0.00) Px = 3608.76
 Iy = (0.00, 0.00, 1.00) Py = 1039609.88
 Iz = (1.00, 0.00, 0.00) Pz = 1039815.31

Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)
 Pris au centre de gravité et aligné avec le système de coordonnées de sortie.
 Lxx = 1039815.31 Lxy = -0.04 Lxz = 0.00
 Lyx = -0.04 Lyy = 3608.76 Lyz = 0.00
 Lzx = 0.00 Lzy = 0.00 Lzz = 1039609.88

Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)
 Pris au système de coordonnées de sortie.
 lxx = 4050135.14 lxy = -0.04 lxz = 0.00
 lyx = -0.04 lyy = 3608.76 lyz = 0.00
 lzx = 0.00 lzy = 0.00 lzz = 4049929.71

SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES		FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION	
ETAT DE SURFACE:									
TOLERANCES:									
LINEAIRES:									
ANGULAIRES:									
NOM		SIGNATURE		DATE		TITRE:			
AUTEUR									
VERIF.									
APPR.									
FAB.									
QUAL.				MATERIAU:		No. DE PLAN		A4	
						slider_hip			
				MASSE:		ECHELLE:1:5		FEUILLE 1 SUR 1	

6 5 4 3 2 1



Propriétés de masse de slider_hip
 Configuration: Défaut
 Système de coordonnées: -- par défaut --

Masse = 197.11 grammes

Volume = 28318.13 millimètres cubes

Superficie = 11957.44 millimètres carrés

Centre de gravité: (millimètres)

X = 0.00
 Y = -123.58
 Z = 0.00

Principaux axes et moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

Pris au centre de gravité.

Ix = (0.00, 1.00, 0.00) Px = 3608.76
 Iy = (0.00, 0.00, 1.00) Py = 1039609.88
 Iz = (1.00, 0.00, 0.00) Pz = 1039815.31

Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

Pris au centre de gravité et aligné avec le système de coordonnées de sortie.

Lxx = 1039815.31 Lxy = -0.04 Lxz = 0.00
 Lyx = -0.04 Lyy = 3608.76 Lyz = 0.00
 Lzx = 0.00 Lzy = 0.00 Lzz = 1039609.88

Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

Pris au système de coordonnées de sortie.

Ixx = 4050135.14 Ixy = -0.04 Ixz = 0.00
 Iyx = -0.04 Iyy = 3608.76 Iyz = 0.00
 Izx = 0.00 Izy = 0.00 Izz = 4049929.71

SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES		FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION	
ETAT DE SURFACE:									
TOLERANCES:									
LINEAIRES:									
ANGULAIRES:									
NOM		SIGNATURE		DATE		TITRE:			
AUTEUR									
VERIF.									
APPR.									
FAB.									
QUAL.				MATERIAU:		No. DE PLAN		A4	
						slider_hip			
				MASSE:		ECHELLE:1:5		FEUILLE 1 SUR 1	

Propriétés de masse de slider_knee
 Configuration: Défaut
 Système de coordonnées: -- par défaut --

Masse = 172.92 grammes

Volume = 25632.08 millimètres cubes

Superficie = 11580.45 millimètres carrés

Centre de gravité: (millimètres)

X = 0.00
 Y = -104.41
 Z = 0.00

Principaux axes et moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

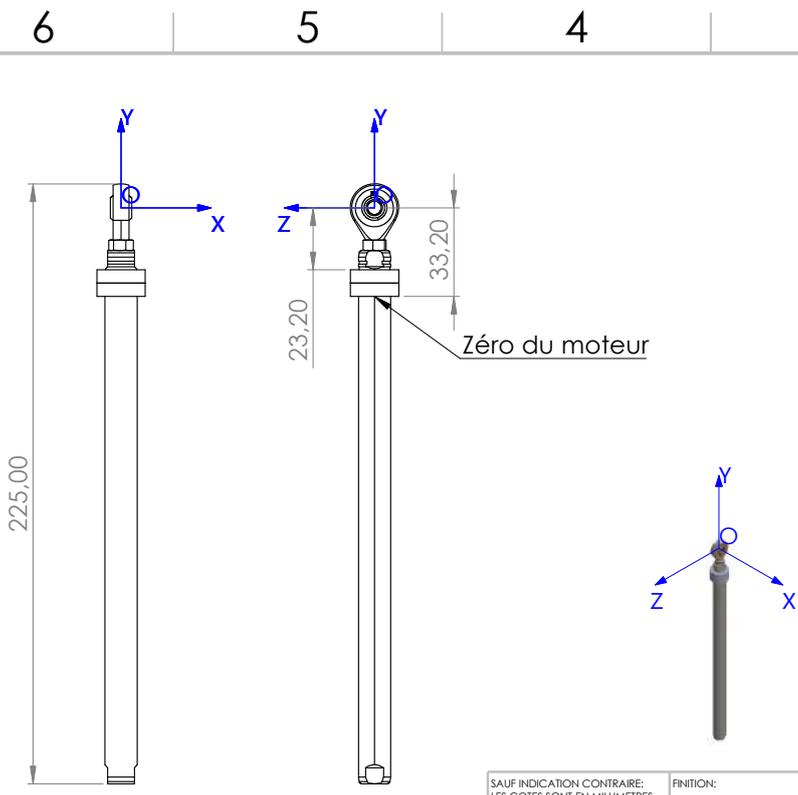
Pris au centre de gravité.
 $I_x = (0.00, 1.00, 0.00) \quad P_x = 3206.12$
 $I_y = (0.00, 0.00, 1.00) \quad P_y = 701218.42$
 $I_z = (1.00, 0.00, 0.00) \quad P_z = 701423.74$

Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

Pris au centre de gravité et aligné avec le système de coordonnées de sortie.
 $L_{xx} = 701423.74 \quad L_{xy} = -0.03 \quad L_{xz} = 0.00$
 $L_{yx} = -0.03 \quad L_{yy} = 3206.12 \quad L_{yz} = 0.00$
 $L_{zx} = 0.00 \quad L_{zy} = 0.00 \quad L_{zz} = 701218.42$

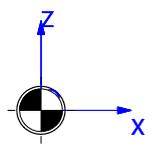
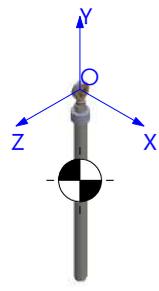
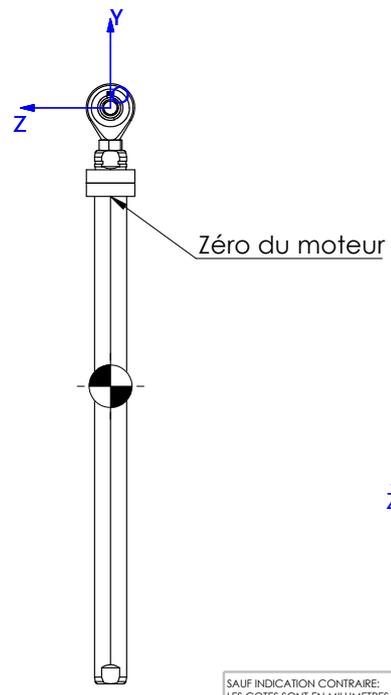
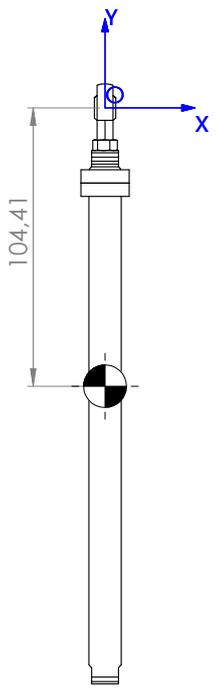
Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

Pris au système de coordonnées de sortie.
 $I_{xx} = 2586336.16 \quad I_{xy} = -0.03 \quad I_{xz} = 0.00$
 $I_{yx} = -0.03 \quad I_{yy} = 3206.12 \quad I_{yz} = 0.00$
 $I_{zx} = 0.00 \quad I_{zy} = 0.00 \quad I_{zz} = 2586130.85$



SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES		FINITION:		CASSER LES ANGES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION	
ETAT DE SURFACE:									
TOLERANCES:									
LINEAIRES:									
ANGULAIRES:									
NOM		SIGNATURE		DATE		TITRE:			
AUTEUR									
VERIF.									
APPR.									
FAB.									
QUAL.				MATERIAU:		No. DE PLAN			
						slider_knee		A4	
				MASSE:		ECHELLE:1:5		FEUILLE 1 SUR 1	

6 5 4 3 2 1



Propriétés de masse de slider_knee
 Configuration: Défaut
 Système de coordonnées: -- par défaut --

Masse = 172.92 grammes
 Volume = 25632.08 millimètres cubes
 Superficie = 11580.45 millimètres carrés

Centre de gravité: (millimètres)
 X = 0.00
 Y = -104.41
 Z = 0.00

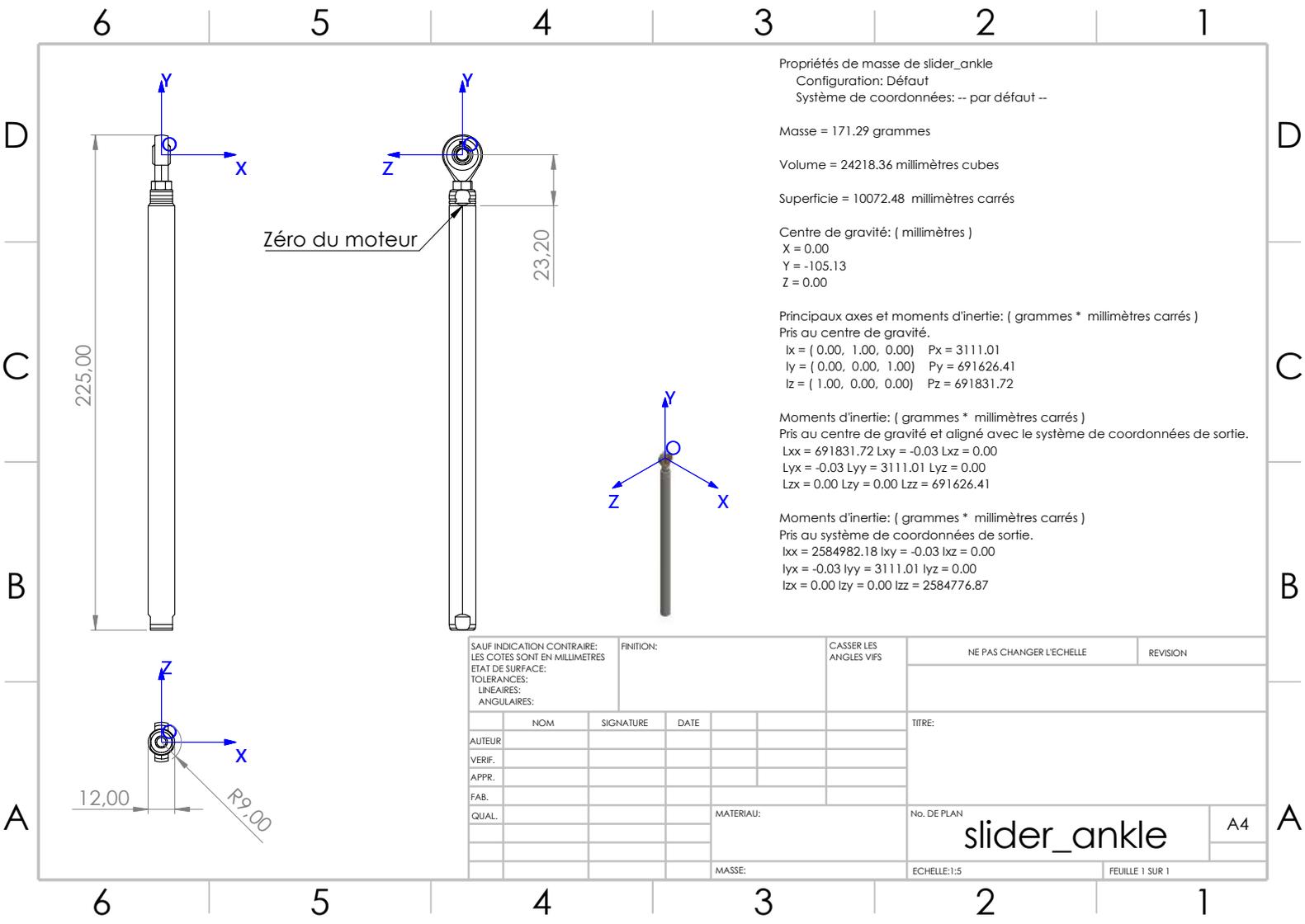
Principaux axes et moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)
 Pris au centre de gravité.
 Ix = (0.00, 1.00, 0.00) Px = 3206.12
 Iy = (0.00, 0.00, 1.00) Py = 701218.42
 Iz = (1.00, 0.00, 0.00) Pz = 701423.74

Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)
 Pris au centre de gravité et aligné avec le système de coordonnées de sortie.
 Lxx = 701423.74 Lxy = -0.03 Lxz = 0.00
 Lyx = -0.03 Lyy = 3206.12 Lyz = 0.00
 Lzx = 0.00 Lzy = 0.00 Lzz = 701218.42

Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)
 Pris au système de coordonnées de sortie.
 Ixx = 2586336.16 Ixy = -0.03 Ixz = 0.00
 Iyx = -0.03 Iyy = 3206.12 Iyz = 0.00
 Izx = 0.00 Izy = 0.00 Izz = 2586130.85

SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:				FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION	
						TITRE:					
AUTEUR		SIGNATURE		DATE							
VERIF.											
APPR.											
FAB.											
QUAL.						MATERIAU:		No. DE PLAN		A4	
								slider_knee			
						MASSE:		ECHELLE:1:5		FEUILLE 1 SUR 1	

6 5 4 3 2 1



Propriétés de masse de slider_ankle
 Configuration: Défaut
 Système de coordonnées: -- par défaut --

Masse = 171.29 grammes

Volume = 24218.36 millimètres cubes

Superficie = 10072.48 millimètres carrés

Centre de gravité: (millimètres)

X = 0.00
 Y = -105.13
 Z = 0.00

Principaux axes et moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

Pris au centre de gravité.

Ix = (0.00, 1.00, 0.00) Px = 3111.01
 Iy = (0.00, 0.00, 1.00) Py = 691626.41
 Iz = (1.00, 0.00, 0.00) Pz = 691831.72

Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

Pris au centre de gravité et aligné avec le système de coordonnées de sortie.

Lxx = 691831.72 Lxy = -0.03 Lxz = 0.00
 Lyx = -0.03 Lyy = 3111.01 Lyz = 0.00
 Lzx = 0.00 Lzy = 0.00 Lzz = 691626.41

Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

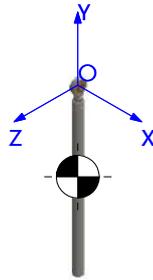
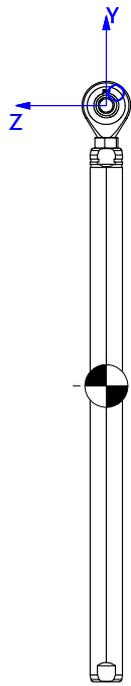
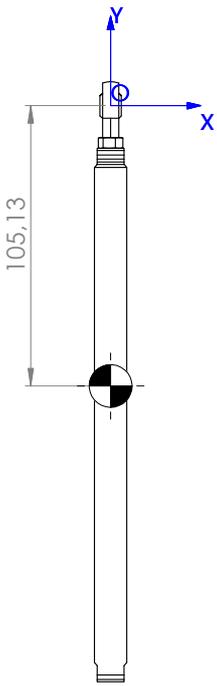
Pris au système de coordonnées de sortie.

Ixx = 2584982.18 Ixy = -0.03 Ixz = 0.00
 Iyx = -0.03 Iyy = 3111.01 Iyz = 0.00
 Izx = 0.00 Izy = 0.00 Izz = 2584776.87

SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES				FINITION:		CASSER LES ANGES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION	
ETAT DE SURFACE:											
TOLERANCES:											
LINEAIRES:											
ANGULAIRES:											
			NOM	SIGNATURE	DATE				TITRE:		
AUTEUR									No. DE PLAN slider_ankle A4		
VERIF.											
APPR.											
FAB.											
QUAL.						MATERIAU:			Echelle: 1:5		
						MASSE:			FEUILLE 1 SUR 1		

6 5 4 3 2 1

D



Propriétés de masse de slider_ankle
Configuration: Défaut
Système de coordonnées: -- par défaut --

Masse = 171.29 grammes

Volume = 24218.36 millimètres cubes

Superficie = 10072.48 millimètres carrés

Centre de gravité: (millimètres)

X = 0.00
Y = -105.13
Z = 0.00

Principaux axes et moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

Pris au centre de gravité.

Ix = (0.00, 1.00, 0.00) Px = 3111.01
Iy = (0.00, 0.00, 1.00) Py = 691626.41
Iz = (1.00, 0.00, 0.00) Pz = 691831.72

Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

Pris au centre de gravité et aligné avec le système de coordonnées de sortie.

Lxx = 691831.72 Lxy = -0.03 Lxz = 0.00
Lyx = -0.03 Lyy = 3111.01 Lyz = 0.00
Lzx = 0.00 Lzy = 0.00 Lzz = 691626.41

Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés)

Pris au système de coordonnées de sortie.

Ixx = 2584982.18 Ixy = -0.03 Ixz = 0.00
Iyx = -0.03 Iyy = 3111.01 Iyz = 0.00
Izx = 0.00 Izy = 0.00 Izz = 2584776.87

C

B

A

SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:				FINITION:	CASSER LES ANGLES VIFS	NE PAS CHANGER L'ECHELLE	REVISION
AUTEUR						TITRE:	
VERIF.							
APPR.							
FAB.							
QUAL.						MATERIAU:	
						No. DE PLAN	
						slider_ankle	
						A4	
MASSE:						ECHELLE:1:5	
						FEUILLE 1 SUR 1	

6 5 4 3 2 1

D

C

B

A

BIBLIOGRAPHIE

- [1] K. P. YADAV et R. P. KUMAR, « Discrete Feedback Control for Robust Walking of Biped Dynamic Walker », in *2021 9th International Conference on Control, Mechatronics and Automation (ICCMA)*, 2021, p. 120-123. DOI : 10.1109/ICCMA54375.2021.9646191.
- [2] W. GOMES, P. MAURICE, E. DALIN, J.-B. MOURET et S. IVALDI, « Multi-Objective Trajectory Optimization to Improve Ergonomics in Human Motion », *IEEE Robotics and Automation Letters*, t. 7, 1, p. 342-349, 2022. DOI : 10.1109/LRA.2021.3125058.
- [3] J. REHER, W.-L. MA et A. AMES, « Dynamic Walking with Compliance on a Cassie Bipedal Robot », juin 2019, p. 2589-2595. DOI : 10.23919/ECC.2019.8796090.
- [4] K. KANEKO, F. KANEHIRO, S. KAJITA et al., « Design of prototype humanoid robotics platform for HRP », t. 3, fév. 2002, 2431-2436 vol.3, ISBN : 0-7803-7398-7. DOI : 10.1109/IRDS.2002.1041632.
- [5] C. DARWIN, *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*. 1859.
- [6] *Legged Robots That Balance*. MIT Press, 1986.
- [7] R. FINN, A. JACOFF, M. ROSE et al., « Evaluating autonomous ground-robots », *Journal of Field Robotics*, t. 29, p. 689-706, sept. 2012. DOI : 10.1002/rob.21433.
- [8] K. HIRAI, M. HIROSE, Y. HAIKAWA et T. TAKENAKA, « The development of Honda humanoid robot », in *Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.98CH36146)*, t. 2, 1998, 1321-1326 vol.2. DOI : 10.1109/ROBOT.1998.677288.
- [9] R. NIIYAMA, A. NAGAKUBO et Y. KUNIYOSHI, « Mowgli : A Bipedal Jumping and Landing Robot with an Artificial Musculoskeletal System », in *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2007, p. 2546-2551. DOI : 10.1109/ROBOT.2007.363848.

-
- [10] M. JOHNSON, B. SHREWSBURY, S. BERTRAND et al., « Team IHMC's lessons learned from the DARPA robotics challenge trials », *Journal of Field Robotics*, t. 32, mars 2015. DOI : 10.1002/rob.21571.
- [11] H. ASADA et K. YUCEF-TOUMI, *Direct-Drive Robots : Theory and Practice*. The MIT Press, juin 1987, ISBN : 9780262255660. DOI : 10.7551/mitpress/2438.001.0001. adresse : <https://doi.org/10.7551/mitpress/2438.001.0001>.
- [12] C. A. DOORENBOSCH et G. J. VAN INGEN SCHENAU, « The role of mono- and bi-articular muscles during contact control leg tasks in man », *Human Movement Science*, t. 14, 3, p. 279-300, 1995, ISSN : 0167-9457. DOI : [https://doi.org/10.1016/0167-9457\(95\)00020-S](https://doi.org/10.1016/0167-9457(95)00020-S).
- [13] E. WESTERVELT, J. GRIZZLE, C. CHEVALLEREAU, J. CHOI et B. MORRIS, *Feedback Control of Dynamic Bipedal Robot Locomotion* (Automation and Control Engineering). CRC Press, 2018, ISBN : 9781351835312. adresse : <https://books.google.fr/books?id=nH50DwAAQBAJ>.
- [14] C. CHEVALLEREAU, G. BESSONNET, G. ABBA et Y. AOUSTIN, *Bipedal Robots : Modeling, Design and Walking Synthesis* (ISTE). Wiley, 2013, ISBN : 9781118622971. adresse : <https://books.google.fr/books?id=mTmDAAd6kysC>.
- [15] J. ENGLSBERGER, A. WERNER, C. OTT et al., « Overview of the torque-controlled humanoid robot TORO », in *2014 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 2014, p. 916-923. DOI : 10.1109/HUMANOIDS.2014.7041473.
- [16] D. BOUTET, « Une morphologie de la gestualité : structuration articulaire », déc. 2008.
- [17] M. VUKOBRATOVIC et D. JURICIC, « Contribution to the Synthesis of Biped Gait », *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, t. BME-16, 1, p. 1-6, 1969. DOI : 10.1109/TBME.1969.4502596.
- [18] P. SARDAIN, M. ROSTAMI et G. BESSONNET, « An anthropomorphic biped robot : dynamic concepts and technological design », *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A : Systems and Humans*, t. 28, 6, p. 823-838, 1998.
- [19] A. EON, J. GASTEBOIS, P. LAGUILLAUMIE, P. VULLIEZ et P. S. and J. P. GAZEAU, « ORHRO : OPEN Robotics Humanoid ROBOT - from a mechanical retrofit to a new real time industrial controller based walking robot », *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, t. 22, sup1, S502-S504, 2019. DOI :

10.1080/10255842.2020.1714997. adresse : <https://doi.org/10.1080/10255842.2020.1714997>.

- [20] S. COLLINS et A. RUINA, « A Bipedal Walking Robot with Efficient and Human-Like Gait », in *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005, p. 1983-1988. DOI : 10.1109/ROBOT.2005.1570404.
- [21] C. CHEVALLEREAU, G. ABBA, Y. Aoustin et al., « RABBIT : a testbed for advanced control theory », *IEEE Control Systems Magazine*, t. 23, 5, p. 57-79, 2003. DOI : 10.1109/MCS.2003.1234651.
- [22] J. GRIZZLE, J. HURST, B. MORRIS, H.-W. PARK et K. SREENATH, « MABEL, a new robotic bipedal walker and runner », juill. 2009, p. 2030-2036. DOI : 10.1109/ACC.2009.5160550.
- [23] B. MORRIS, E. WESTERVELT, C. CHEVALLEREAU, G. BUCHE et J. GRIZZLE, « Achieving Bipedal Running with RABBIT : Six Steps Toward Infinity », in *Fast Motions in Biomechanics and Robotics : Optimization and Feedback Control*, M. DIEHL et K. MOMBAUR, éd. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2006, p. 277-297, ISBN : 978-3-540-36119-0. DOI : 10.1007/978-3-540-36119-0_13. adresse : https://doi.org/10.1007/978-3-540-36119-0_13.
- [24] S. LOHMEIER, T. BUSCHMANN et H. ULBRICH, « Humanoid robot LOLA », in *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2009, p. 775-780. DOI : 10.1109/ROBOT.2009.5152578.
- [25] K. LOFFLER, M. GIENGER, F. PFEIFFER et H. ULBRICH, « Sensors and control concept of a biped robot », *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, t. 51, 5, p. 972-980, 2004. DOI : 10.1109/TIE.2004.834948.
- [26] *Development of a Full-Sized Bipedal Humanoid Robot Utilizing Spring Assisted Parallel Four-Bar Linkages With Synchronized Actuation*, t. Volume 6 : 35th Mechanisms and Robotics Conference, Parts A and B, International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, août 2011, p. 799-806. DOI : 10.1115/DETC2011-48412. eprint : <https://asmedigitalcollection.asme.org/IDETC-CIE/proceedings-pdf/IDETC-CIE2011/54839/799/2776260/799\1.pdf>. adresse : <https://doi.org/10.1115/DETC2011-48412>.

-
- [27] D. LAHR, V. OREKHOV, B. LEE et D. HONG, « Early Developments of a Parallely Actuated Humanoid, SAFFiR », t. 6, août 2013. DOI : 10.1115/DETC2013-12590.
- [28] B. LEE, V. OREKHOV, D. LAHR et D. HONG, « Design and Measurement Error Analysis of a Low-Friction, Lightweight Linear Series Elastic Actuator », t. 6, août 2013. DOI : 10.1115/DETC2013-13637.
- [29] M. A. HOPKINS, S. A. RESSLER, D. F. LAHR, A. LEONESSA et D. W. HONG, « Embedded joint-space control of a series elastic humanoid », in *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2015, p. 3358-3365. DOI : 10.1109/IROS.2015.7353845.
- [30] C. KNABE, J. SEMINATORE, J. WEBB et al., « Design of a series elastic humanoid for the DARPA Robotics Challenge », in *2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, 2015, p. 738-743. DOI : 10.1109/HUMANOIDS.2015.7363452.
- [31] *Design of a Compact, Lightweight, Electromechanical Linear Series Elastic Actuator*, t. Volume 5B : 38th Mechanisms and Robotics Conference, International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, août 2014, V05BT08A014. DOI : 10.1115/DETC2014-35096. eprint : <https://asmedigitalcollection.asme.org/IDETC-CIE/proceedings-pdf/IDETC-CIE2014/46377/V05BT08A014/4262606/v05bt08a014-detc2014-35096.pdf>. adresse : <https://doi.org/10.1115/DETC2014-35096>.
- [32] N. RADFORD, P. STRAWSER, K. HAMBUCHEN et al., « Valkyrie : NASA's First bipedal humanoid robot », *Journal of Field Robotics*, t. 32, p. 397-419, mai 2015. DOI : 10.1002/rob.21560.
- [33] Y. ASANO, T. KOZUKI, S. OOKUBO et al., « Human mimetic musculoskeletal humanoid Kengoro toward real world physically interactive actions », in *2016 IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, 2016, p. 876-883. DOI : 10.1109/HUMANOIDS.2016.7803376.
- [34] Y. ASANO, T. KOZUKI, S. OOKUBO et al., « A sensor-driver integrated muscle module with high-tension measurability and flexibility for tendon-driven robots », in *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2015, p. 5960-5965. DOI : 10.1109/IROS.2015.7354225.

-
- [35] S. KALOUCHE, « GOAT : A legged robot with 3D agility and virtual compliance », in *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2017, p. 4110-4117. DOI : 10.1109/IROS.2017.8206269.
- [36] N. TSAGARAKIS, D. CALDWELL, A. BICCHI et al., « WALK-MAN : A High Performance Humanoid Platform for Realistic Environments », *Journal of Field Robotics*, t. 34, juin 2017. DOI : 10.1002/rob.21702.
- [37] T. ZHU, *Design of a Highly Dynamic Humanoid Robot*. 2023, t. UCLA thesis. adresse : <https://escholarship.org/uc/item/0qz3p57g>.
- [38] R. ALTENDORFER, E. MOORE, H. KOMSUOGLU et al., « RHex : A Biologically Inspired Hexapod Runner », *Autonomous Robots*, t. 11, p. 207-213, nov. 2001. DOI : 10.1023/A:1012426720699.
- [39] M. RAIBERT, K. BLANKESPOOR, G. NELSON et R. PLAYTER, « BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot », *IFAC Proceedings Volumes*, t. 41, 2, p. 10 822-10 825, 2008, 17th IFAC World Congress, ISSN : 1474-6670. DOI : <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.01833>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016407020>.
- [40] S. SEOK, A. WANG, M. Y. CHUAH et al., « Design Principles for Energy-Efficient Legged Locomotion and Implementation on the MIT Cheetah Robot », *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, t. 20, 3, p. 1117-1129, 2015. DOI : 10.1109/TMECH.2014.2339013.
- [41] A. RUINA, J. E. BERTRAM et M. SRINIVASAN, « A collisional model of the energetic cost of support work qualitatively explains leg sequencing in walking and galloping, pseudo-elastic leg behavior in running and the walk-to-run transition », *Journal of Theoretical Biology*, t. 237, 2, p. 170-192, 2005, ISSN : 0022-5193. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2005.04.004>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022519305001591>.
- [42] D. KUEHN, F. BERNHARD, A. BURCHARDT et al., « Distributed Computation in a Quadrupedal Robotic System », *International Journal of Advanced Robotic Systems*, t. 11, 7, p. 110, 2014. DOI : 10.5772/58733. adresse : <https://doi.org/10.5772/58733>.
- [43] A. ROBOTICS, *Meet digit*, *Dernier accès le 25/07/2023*. adresse : <https://agilityrobotics.com/robots>.

-
- [44] A. BADRI-SPRÖWITZ, A. A. SARVESTANI, M. SITTI et M. A. DALEY, « BirdBot achieves energy-efficient gait with minimal control using avian-inspired leg clutching », *Science Robotics*, t. 7, 64, eabg4055, 2022. DOI : 10.1126/scirobotics.abg4055. eprint : <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/scirobotics.abg4055>. adresse : <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/scirobotics.abg4055>.
- [45] F. GRIMMINGER, A. MEDURI, M. KHADIV et al., « An Open Torque-Controlled Modular Robot Architecture for Legged Locomotion Research », *IEEE Robotics and Automation Letters*, t. 5, 2, p. 3650-3657, 2020. DOI : 10.1109/LRA.2020.2976639.
- [46] M. AHMAD SHARBAFI, C. RODE, S. KUROWSKI et al., « A new biarticular actuator design facilitates control of leg function in BioBiped3 », *Bioinspiration I&Biomimetics*, t. 11, p. 046 003, juill. 2016. DOI : 10.1088/1748-3190/11/4/046003.
- [47] B. NA, H. CHOI et K. KONG, « Design of a direct-driven linear actuator for development of a cheetaroid robot », in *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2013, p. 4023-4028. DOI : 10.1109/ICRA.2013.6631144.
- [48] B. NA, H. CHOI et K. KONG, « Design of a Direct-Driven Linear Actuator for a High-Speed Quadruped Robot, Cheetaroid-I », *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, t. 20, 2, p. 924-933, 2015. DOI : 10.1109/TMECH.2014.2326696.
- [49] A. ROSENDO, S. NAKATSU, K. NARIOKA et K. HOSODA, « Pneupard : A biomimetic musculoskeletal approach for a feline-inspired quadruped robot », in *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2013, p. 1452-1457. DOI : 10.1109/IR0S.2013.6696540.
- [50] M. RAIBERT, « BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot », t. 17, juill. 2008, p. 10 822-10 825, ISBN : 9783902661005. DOI : 10.3182/20080706-5-KR-1001.01833.
- [51] DIRECTINDUSTRY, *Site d'achat de moteurs industriels. Dernier accès le 25/07/2023.* adresse : <https://www.directindustry.fr/fabricant-industriel/actionneur-hydraulique-64972.html>.
- [52] Y. FUJIMOTO, I. A. SMADI et Y. WAKAYAMA, « Development of musculoskeletal biped robot driven by direct-drive actuators », in *2011 IEEE International Conference on Mechatronics*, 2011, p. 821-826. DOI : 10.1109/ICMECH.2011.5971227.

-
- [53] S. HIASA, R. SATO, K. KUROKAWA et al., « A Legged Robot With Thigh Bi-Articular Muscle-Tendon Complex », *IEEE Access*, t. 9, p. 62 285-62 297, 2021. DOI : 10.1109/ACCESS.2021.3074322.
- [54] LINMOT, *Schéma d'un moteur linéaire à entraînement direct*. adresse : <https://linmot.com/fr/produits/moteurs-lineaire/moteur-lineaire-p01/>.
- [55] Z. LI, S. BAI, O. MADSEN, W. CHEN et J. ZHANG, « Design, modeling and testing of a compact variable stiffness mechanism for exoskeletons », *Mechanism and Machine Theory*, t. 151, p. 103 905, sept. 2020. DOI : 10.1016/j.mechmachtheory.2020.103905.
- [56] Y. LU, Y. YANG, Y. XUE, J. JIANG, Q. ZHANG et H. YUE, « A Variable Stiffness Actuator Based on Leaf Springs : Design, Model and Analysis », *Actuators*, t. 11, 10, p. 282, oct. 2022, ISSN : 2076-0825. DOI : 10.3390/act11100282. adresse : <http://dx.doi.org/10.3390/act11100282>.
- [57] ROBU.IN, *Animation de fonctionnement d'un moteur rotatif sans brosse*. adresse : <https://robu.in/wp-content/uploads/2020/04/BLDC-motor-working.gif>.
- [58] E. RICHER, *Identification and Compensation of Cogging and Friction Forces in Tubular Permanent Magnet Linear Motors*. adresse : https://www.researchgate.net/figure/SCHEMATIC-OF-A-SLOTTED-PERMANENT-MAGNET-LINEAR-MOTOR-AND-ITS-COMPONENTS_fig1_320410377.
- [59] T. ISHIDA et A. TAKANISHI, « A Robot Actuator Development With High Back-drivability », in *2006 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, 2006, p. 1-6. DOI : 10.1109/RAMECH.2006.252631.
- [60] C. CHEVALLEREAU, P. WENGER, Y. Aoustin, F. MERCIER, N. DELANOUE et P. LUCIDARME, « Leg design for biped locomotion with mono-articular and bi-articular linear actuation », *Mechanism and Machine Theory*, t. 156, p. 104 138, 2021, ISSN : 0094-114X. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.104138>.
- [61] M. GRIMMER, M. ESLAMY, S. GLIECH et A. SEYFARTH, « A comparison of parallel- and series elastic elements in an actuator for mimicking human ankle joint in walking and running », in *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2012, p. 2463-2470. DOI : 10.1109/ICRA.2012.6224967.

-
- [62] D.-S. GO, H.-J. HYUNG, D.-W. LEE et H. U. YOON, « Andorid Robot Motion Generation Based on Video-Recorded Human Demonstrations », in *2018 27th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN)*, 2018, p. 476-478. DOI : 10.1109/ROMAN.2018.8525727.
- [63] J. WOJTUSCH et O. von STRYK, « HuMoD - A versatile and open database for the investigation, modeling and simulation of human motion dynamics on actuation level », in *2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, 2015, p. 74-79. DOI : 10.1109/HUMANOIDS.2015.7363534.
- [64] J. A. NELDER et R. MEAD, « A Simplex Method for Function Minimization », *The Computer Journal*, t. 7, 4, p. 308-313, jan. 1965, ISSN : 0010-4620. DOI : 10.1093/comjnl/7.4.308. eprint : <https://academic.oup.com/comjnl/article-pdf/7/4/308/1013182/7-4-308.pdf>. adresse : <https://doi.org/10.1093/comjnl/7.4.308>.
- [65] C. SARTORE, L. RAPETTI et D. PUCCI, « Optimization of Humanoid Robot Designs for Human-Robot Ergonomic Payload Lifting », in *2022 IEEE-RAS 21st International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, 2022, p. 722-729. DOI : 10.1109/Humanoids53995.2022.10000222.
- [66] G. DIP, V. PRAHLAD et P. D. KIEN, « Genetic algorithm-based optimal bipedal walking gait synthesis considering tradeoff between stability margin and speed », *Robotica*, t. 27, 3, p. 355-365, 2009. DOI : 10.1017/S026357470800475X.
- [67] T. HUAN et H. ANH, « Novel Stable Walking for Humanoid Robot Using Particle Swarm Optimization Algorithm », in *Proceedings of the 2015 International Conference on Artificial Intelligence and Industrial Engineering*, Atlantis Press, 2015/07, p. 322-325, ISBN : 978-94-62520-70-7. DOI : 10.2991/aiie-15.2015.90. adresse : <https://doi.org/10.2991/aiie-15.2015.90>.
- [68] T. T. HUAN, K. B. THY, N. H. H. TRUNG et H. P. H. ANH, « Stable Gait Optimization for Small-Sized Humanoid Robot Using CFO », in *2018 15th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)*, 2018, p. 436-441. DOI : 10.1109/ICARCV.2018.8581188.
- [69] S. HA, S. COROS, A. ALSPACH, J. KIM et K. YAMANE, « Computational co-optimization of design parameters and motion trajectories for robotic systems », *The International Journal of Robotics Research*, t. 37, 13-14, p. 1521-1536, 2018. DOI : 10.1177/0278364918771172.

-
- [70] A. SPIELBERG, B. ARAKI, C. SUNG, R. TEDRAKE et D. RUS, « Functional co-optimization of articulated robots », in *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2017, p. 5035-5042. DOI : 10.1109/ICRA.2017.7989587.
- [71] H. XIE, G. JIA, M. AL-KHULAQUI et al., « A Motion Generation Strategy of Robotic Rat Using Imitation Learning for Behavioral Interaction », *IEEE Robotics and Automation Letters*, t. 7, 3, p. 7351-7358, 2022. DOI : 10.1109/LRA.2022.3182472.
- [72] NVIDIA, *Environnement de simulation pour l'apprentissage par renforcement*. Dernière accès le 25/07/2023. adresse : <https://developer.nvidia.com/isaac-gym>.
- [73] M. GRIMMER, A. A. ELSHAMANHORY et P. BECKERLE, « Human Lower Limb Joint Biomechanics in Daily Life Activities : A Literature Based Requirement Analysis for Anthropomorphic Robot Design », *Frontiers in Robotics and AI*, t. 7, 2020, ISSN : 2296-9144. DOI : 10.3389/frobt.2020.00013. adresse : <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frobt.2020.00013>.

Titre : Robot humanoïde bio-inspiré - Conception et expérimentation

Mot clés : robot marcheur planaire, moteur linéaire, conception, optimisation

Résumé : En robotique humanoïde, la marche bipède est encore un sujet de recherche riche : développement de loi de commande, génération de trajectoires de marche, conception d'architectures originales, etc. Les robots bipèdes utilisent classiquement des moteurs rotatifs. Ces actionneurs sont couplés à un système de réduction afin de fournir les couples requis. Cette combinaison impose de trouver un compromis entre le couple de sortie et la réversibilité du système d'actionnement, limitant l'absorption des impacts. Une alternative possible est l'utilisation de moteurs linéaires à entraînement direct, mécaniquement réversibles. Seulement, les moteurs linéaires sont peu utilisés, avec un ensemble moteur rotatif-vis-mère ayant une réversibilité limitée. Ce type de moteur générant des trans-

lations, la production d'un couple se fait par bras de levier. Cette spécificité demande un placement optimal des moteurs, afin d'assurer la faisabilité des couple requis. Afin d'étudier l'intérêt des moteurs linéaires réversibles, une évaluation de l'utilisation de cette technologie pour concevoir un robot bipède planaire est proposée. Plusieurs architectures de robot bipède planaire utilisant des moteurs linéaires pour l'actionnement sont simulées et comparées sur différents mouvements. En parallèle, une géométrie maximisant la faisabilité est obtenue par optimisation pour chacune des architectures. À partir de ces résultats, un prototype de robot bipède planaire actionné exclusivement par des moteurs linéaires a été conçu pour valider les résultats de simulation.

Title: Bio-inspired humanoid robot : Design and experimentation

Keywords: planar walking robot, linear actuator, design, optimisation

Abstract: In the field of humanoid robotic, bipedal walking is still an open research field, such as the development of control laws, trajectory generation or original architecture designs. Bipedal robots classically use rotative motors for their actuation system. These motors are usually coupled with a reduction system in order to achieve sufficient torques. This combination imposes to compromise between the output torque and the mechanical reversibility of the system, which limits impact absorption. An alternative is the use of direct-drive linear actuators, inherently reversible. However, linear motors are scarcely used with a rotative actuator linked to a ball-screw, with a

limited reversibility. As linear motors produce a translational force, a torque is generated through a lever arm. This specificity requires an optimal placement of the actuators to ensure the feasibility of the required torques. To improve our knowledge of this technology and evaluate its use in the robotic field, multiple bipedal planar robot architectures are simulated along different trajectories and compared. In parallel, an optimal geometry is computed for each architecture to maximize motion feasibility. From these results, a prototype using solely direct-drive linear actuators is designed and built in order to verify simulation data.