# Éléments de conception et de dimensionnement des robots à pattes

G. Abba\*

Laboratoire de Génie Industriel et de Production Mécanique École Nationale d'Ingénieurs de Metz, Île du Saulcy, 57045 METZ Cedex 1, France abba@enim.fr

#### Résumé

Ce document s'attache à donner les principes de base du fonctionnement des robots à pattes et plus spécialement les robots bipèdes. Après avoir analyser le point de vue énergétique et les analogies avec la roue et les pendules, nous abordons la détermination des trajectoires optimales. L'étude des structures très simples à 2 ou 3 corps permet de dégager une méthodologie de conception. La détermination d'allures optimales peut se faire par une résolution de commande optimale, mais au vue du grand nombre d'articulation et de trajectoires possibles, les méthodes paramétriques sont à privilégier. L'optimisation sous contrainte peut être effectuée avec des critères énergétiques ou de minimisation de la commande. Un bilan énergétique est alors fourni et les résultats sont comparés en termes de puissance, de couples et de vitesses maximums et avec un objectif d'autonomie énergétique du robot. Les choix technologiques peuvent être alors analysés. Les principales solutions pour la motorisation, les transmissions cinématiques sont exposés et comparés. Ce travail évoque des perspectives sous forme d'une liste de problèmes ouverts et de solutions d'intégrations qui paraissent les plus prometteuses.

## **Mots Clef**

Robots à pattes, robot bipède, trajectoire optimale, bilan énergétique, marche, course, motorisation, transmission, conception de robot, dimensionnement de robot.

# **1** Introduction

Les êtres vivants ont développé un ensemble de modes de locomotion très diversifiés. La locomotion à pattes fait parti des modes les plus efficaces et des plus intéressants à étudier. Une analogie avec le déplacement d'un véhicule à roue apporte un éclairage qui permet de mieux comprendre la commande et le dimensionnement des robots à pattes. La figure 1 montre le passage d'un mode de locomotion à roues vers un mode de locomotion à pattes [2]. Pour avancer sur un terrain irrégulier, un véhicule à roue nécessite un diamètre des roues très supérieur à la taille des obstacles. Par exemple, pour une voiture, le diamètre des roues est au moins quatre fois supérieure à la taille des trottoirs. L'inertie d'une roue de grande taille est très importante et nécessite ainsi un transfert d'énergie importante lors des phases d'accélération et de freinage. Or à un instant donné, une grande partie de la roue n'est pas directement en contact avec le sol. On peut donc imaginer découper la roue en secteurs angulaires dont seul celui qui est en contact avec le sol et celui qui va entrer en contact par la suite sont présents. Le secteur perdant le contact lors du mouvement d'avance fera alors une rotation pour venir se positionner devant le secteur en contact (Fig. 1.b). L'inertie de cette solution est nettement plus faible, mais l'énergie nécessaire pour faire passer le secteur arrière vers l'avant est non négligeable car la variation d'énergie potentielle est importante. Il apparaît alors que le levée du secteur arrière afin de le faire passer vers l'avant par le bas est le plus avantageux (Fig. 1.c). Cette solution minimise les transferts d'énergie dans le système et permet d'augmenter le rendement quelque soit le mode de production de l'énergie mécanique fournie aux articulations.

Lors de son passage vers l'avant, la jambe arrière ou jambe en balancement effectue un mouvement de double pendule dont le principal moteur est le champ de gravité terrestre. La jambe en contact avec le sol ou jambe fixe réalise la fonction du secteur correspondant de la roue avec le rayon de liaison avec la hanche du robot. Le paragraphe 4.2 décrit les propriétés essentielles de ce robot bipède plan.

On peut imaginer une autre solution en considérant la jambe fixe comme un pendule inverse en contact ponctuel avec le sol. Dans ce cas, l'articulation des hanches effectue un mouvement de rotation autour du point fixe de contact avec le sol (Fig. 10). Le pied de la jambe en balancement atteint le sol à la fin de son mouvement avec une vitesse non nulle. Le choc élastique avec le sol provoque la phase suivante du mouvement avec décollement de la jambe arrière qui devient la jambe en balancement. Le paragraphe 4.3 aborde l'étude de ce cas et montre quels sont les avantages que procurent cette solution.

Cet article aborde principalement l'étude et le dimensionnement de robots bipèdes. Certaines méthodes de conception exposées ci-dessous peuvent également être appliquées à d'autres structures de robots à pattes, en particulier les quadrupèdes. On aborde successivement les structures cinématiques dans les paragraphes 2 et 3, puis les critères

<sup>\*</sup>L'auteur désire remercier tout particulièrement tous les participants du groupe de travail "Robots à pattes" du GDR Automatique du CNRS (1996-99) et du projet ROBEA "Commande pour la marche et la course d'un robot bipède" (2000-04) pour leur travail et les nombreuses discussions constructives qui ont largement contribué à la synthèse présentée dans ce document.



FIG. 1 – Passage de la roue aux pattes

d'optimisation qui permettent de définir l'architecture globale ainsi que la répartition des masses. Les choix technologiques permettent ensuite de concrétiser la réalisation du robot et sont abordés dans le paragraphe 5.

# 2 Structures cinématiques de robots bipèdes

Les structures cinématiques de robots bipèdes se différencient couramment en fonction du nombre de degré de liberté dans le plan sagittal et dans le plan frontal. Les figures 2 et 3 donnent les principales configurations. Dans le plan saggital, la structure élémentaire est celle ressemblant à un compas avec trois corps et deux articulations au niveau des hanches (Fig.2.a). Cette structure de base très simple apporte énormément d'informations sur la conception et la commande de bipède [21], et l'ajout de jambes télescopiques [22] passives ou actives a permis à Hodgins [7][26] de réaliser un des premiers robots bipèdes à mouvements dynamiques.

L'ajout de genoux (voir Fig.2.b) permet d'éviter le frottement du pied mobile avec le sol (configuration singulière du robot) ou le franchissement d'obstacles de faible hauteur. Cette structure possède deux variantes selon que la flexion du genou se fait vers l'avant ("human-like") ou vers l'arrière ("bird-like"). La configuration singulière d'alignement de la cuisse et du tibia n'est donc que rarement franchie. La solution consistant à ajouter une butée interdisant le franchissement de la singularité est intéressante pour le choix des moteurs, mais pose un problème de synthèse de commande qui reste un problème ouvert. Il existe d'ailleurs des commandes qui utilisent cette singularité afin d'optimiser la consommation énergétique. De plus, une conception de l'axe des genoux avec une butée interdisant le passage par la singularité apporte des avantages en terme d'énergie consommée. Le robot Rabbit [41] réalisé dans le cadre d'un projet soutenu par le GDR Automatique et poursuivi lors du projet Robéa reprend cette structure.

La structure bipède la plus complète dans le plan saggital (Fig.2.c) comprend de plus deux pieds avec une articulation aux chevilles. Cette structure est habituellement appelée bipède à 7 corps.

Le passage à des robots et à des trajectoires en 3D nécessite des articulations dans le plan frontal. Ces articulations se rajoutent aux liaisons déjà existantes dans le plan saggital (Fig.2.b ou Fig.2.c). A partir de la configuration (Fig.2.b), les premières articulations supplémentaires sont très souvent placées aux hanches (Fig.3.a). Elles permettent des



FIG. 2 - Structures dans le plan saggital

Structure	Nh de	Nh d'arti-	Nh	Nh de	Mouve-
Sudetare	corps	culations	DOF	moteur	ment
Fig.2.a	3	2	5	2	plan
Fig.2.b	5	4	7	4	plan
Fig.2.c	7	6	9	6	plan
Fig.3.a	7	6	12	8	3D
Fig.3.b	7	7	10	7	3D
Fig.3.c	8	7	17	11	3D
Fig.3.c	8	7	22	16	3D

TAB. I - Structures de bipèdes et degrés de liberté

mouvements latéraux, un déplacement du centre de masses au dessus de la jambe d'appui, une stabilisation du mouvement latéral et l'inclinaison de l'ensemble du robot lors d'un mouvement de changement d'orientation. Le déplacement du centre de masses et une stabilisation du mouvement peuvent également être obtenus par une articulation du tronc au niveau du bassin (Fig.3.b)[38]. La Fig.3.c montre la structure la plus complète d'une jambe avec 5 articulations dans le plan frontal. On peut alors imaginer deux structures, l'une ayant des articulations de type rotule au bassin, aux hanches et aux chevilles ou l'autre ayant une articulation rotule au bassin et deux rotations à axes concourants aux genoux et aux chevilles, ce qui conduit aux structures bipèdes les plus complètes [18][38] correspondant à la dernière ligne de Tab.I.



FIG. 3 – Structures dans le plan frontal

Tab.I résume l'ensemble des structures et donne leurs propriétés essentielles. Le passage de la structure bipède la plus complète aux robots humanoïdes se fait par addition des membres supérieurs et de la tête [24][25]. Pour certains humanoïdes, les auteurs ont également prévu une articulation au centre du tronc. Les membres supérieures comportent habituellement une liaison rotule à l'épaule et deux rotations à axes concourants au coude. Le poignet et les mains sont plus ou moins complexes en fonction de l'application prévue du robot et constitue un sujet de recherche en soi qui n'est pas abordé ici.

# **3** Structures cinématiques de robots quadrupèdes

Les structures cinématiques de robots quadrupèdes se différencient des structures bipèdes par la localisation des pattes et leur liaison à un corps commun couramment appelé plateforme. Le nombre de degré de liberté pour une jambe dans le plan sagittal et dans le plan frontal peut se déduire des configurations déjà vues sur les bipèdes. Les figures 4 et 5 montrent les principales configurations.

Dans le plan saggital, la structure élémentaire comprend généralement la plateforme sensiblement horizontale et quatre pattes rattachées au niveau des épaules (pattes antérieures) et des hanches (pattes postérieures) (Fig.4.a). Cette structure de base a été étudiée par [10], [19].

La structure quadrupède la plus complète dans le plan saggital (Fig.4.b) comprend de plus une articulation aux chevilles. Cette structure est habituellement appelée quadrupède à 13 corps.



FIG. 4 - Structures quadrupèdes dans le plan saggital

Le passage à des robots quadrupèdes en 3D nécessite des articulations supplémentaires dans le plan frontal. Les articulations se rajoutent aux liaisons déjà existantes dans le plan saggital (Fig.4.b). Les articulations supplémentaires sont placées aux hanches (Fig.5.b) et des chevilles. Elles permettent des mouvements latéraux et différentes allures de marche dynamiques.



FIG. 5 - Structures quadrupèdes dans le plan frontal

Tab.II résume l'ensemble des structures et donne leurs propriétés essentielles. Les robots quadrupèdes peuvent éven-

Structure	Nb. de	Nb. d'arti-	Nb.	Nb. de	Mouve-
	corps	culations	DOF	moteur	ment
Fig.4.a	11	8	14	8	3D
Fig.4.b	15	12	18	12	3D
Fig.5.b	15	20	26	20	3D
Fig.5.b	15	20	30	24	3D

TAB. II - Structures de quadrupèdes et degrés de liberté

tuellement être munis d'une tête montée par une liaison rotule. Le passage de la structure quadrupède aux robots multipèdes se fait par addition de pattes supplémentaires. Pour certains robots, les auteurs ont également prévu une articulation rotule au centre de la plateforme. L'articulation de la plateforme permet d'allonger la longueur des pas, en particulier lors du mouvement de course, et comportent habituellement une liaison rotoïde d'axe horizontal (modèle du cheval) ou vertical (modèle reptile). L'étude des robots quadrupèdes et multipèdes constitue un sujet de recherche qui n'est pas développé ici. Ils possèdent tous la propriété d'avoir une démarche stable à faible vitesse (l'allure de marche permettant de maintenir à tout instant un polygone de sustentation ) et d'accepter une charge utile importante.

## 4 Optimisation énergétique

#### 4.1 Introduction

Les études sur les robots bipèdes dit "passifs" ont clairement illustré cette problématique énergétique. Un robot est dit passif lorsqu'il ne nécessite pas d'énergie externe. Il ne possède donc pas d'actionneurs électriques ou autres. Par contre, un robot passif peut avoir plusieurs dispositifs de stockage d'énergie, tel des ressorts. Les travaux de McGeer [29][30] dans les années 1990 ont conduit plusieurs auteurs à s'intéresser à cette approche. L'idée principale consiste à chercher des structures mécaniques qui sous l'effet de la gravité et de leur fréquence de résonance propre reproduisent un mouvement d'avance qui nécessite très peu d'énergie [6][17][39]. Des robots bipèdes sans aucun moteur ont ainsi été réalisés. Leur mouvement paraît très fluide et naturel. La figure 6 montre le robot réalisé par Collins [15]. Les robots passifs ont la particularité de ne nécessiter que l'énergie perdue en interne dans le robot. Comme le robot ne possède pas d'actionneurs, il suffit de compenser les frottements mécaniques qui sont de deux types, les frottements dans les articulations et les frottements ou l'énergie dissipée au niveau du sol. Une étude faite par la société Honda [42] montre que les robots humanoïdes motorisés tel que le robot Asimo consomme à l'heure actuelle 16 fois plus d'énergie qu'un robot passif (ici le robot de Cornell University [15]) ou qu'un être humain. Cette étude ne donne cependant pas de précisions sur les vitesses de marche qui conduisent à ces consommations énergétiques, les données ne sont donc pas tout à fait comparables. Évidemment, les vitesses de marche des robots passifs sont liées très étroitement aux fréquences d'oscillations propres de la structure mécanique, ce qui limitent



FIG. 6 – Robot bipède de S. Collins



FIG. 7 – Comparaison des consommations énergétiques entre le robot Asimo, un robot passif et l'homme (d'après Honda Corp.)

considérablement les applications. Par contre, l'étude des robots passifs a permis de développer les méthodes d'optimisation des trajectoires de marche ou la synthèse de commande stabilisante. On admet généralement que les robots passifs ont une allure de déplacement très anthropomorphe. À l'inverse, ceci sous-entend que le mouvement de marche humain cherche à minimiser l'énergie consommée.

D'autre part, les travaux de recherche entrepris dans le cadre du projet Robéa du CNRS [41] montrent qu'un robot sans pied peut être commandé et stabilisé et que les trajectoires obtenues sont également d'allure anthropomorphe. La fonction essentielle des pieds est ainsi d'établir une liaison optimale avec le sol et d'augmenter l'adhérence afin de transmettre les forces motrices d'avance. Ces dernières remarques sont très importantes dans la démarche de conception d'un robot car elle permet de fixer les fonctions principales de chaque articulation.

L'étude des robots les plus simples (2 ou 3 corps) apporte des informations très pertinentes pour la conception et l'optimisation de structures à pattes. Les deux paragraphes suivants montrent les résultats obtenus avec deux structures simples.



FIG. 8 – Jambe en balancement

#### 4.2 Mouvement du double pendule entraîné à vitesse constante

Le cas de la jambe en balancement, reliée au niveau des hanches à un secteur circulaire muni d'un rayon (la jambe fixe) et entraînée dans un mouvement d'avance continu, est représenté Fig. 8. Ce système très simple permet déjà d'avoir un ordre de grandeur des énergies nécessaires à sa mise en marche. La figure 9 montre la consommation énergétique de ce système en fonction de la vitesse moyenne d'avance et pour différentes répartitions des masses entre la cuisse et le tibia (caractéristiques physiques données en annexe). La valeur  $z_2$  fixe la distance entre le centre de gravité du tibia et l'axe de rotation du genou. On peut remarquer que la meilleure solution est obtenue pour un centre de gravité placé plus près du genou (courbe verte). La courbe rouge est obtenue pour une masse du tibia  $m_2 = 2.2 \text{ kg}$ plus faible que pour la courbe en magenta ( $m_2 = 3,2$  kg). Les lignes horizontales en bleu indiqués la puissance fournie par un moteur à courant continu à aimants permanents au Samarium-Cobalt pour une masse donnée de moteur. Sur la figure représentant le cas de la jambe en balancement, on constate qu'avec une masse totale des moteurs de 1 kg, on peut atteindre toute la plage de vitesse proposée. Le cas de la jambe d'appui conduira à un dimensionnement bien plus lourd.

En conclusion, on a intérêt d'une part, à avoir les centres de gravité des corps placés le plus près des articulations correspondantes et d'autre part à avoir la masse du tibia la plus faible possible, même s'il est nécessaire d'augmenter la masse des cuisses. Le même raisonnement est valable pour un robot ayant des pieds et il est donc très important de diminuer le plus possible leur masse. Les moteurs de commande des degrés de liberté des chevilles seront donc placés sur le tibia et le plus près possible de  $O_3$ . De pus, on



FIG. 9 – Puissance totale consommée par la jambe en balancement



FIG. 10 – Pendule inverse

a intérêt à n'avoir que 2 degrés de liberté aux chevilles, la rotation du pied étant reportée au niveau du genou.

#### 4.3 Mouvement d'un robot ressemblant à un "compas"

Cette structure a été étudié en détail dans [20][21]. Ce robot est représenté Fig. 10. Il comprend une jambe en balancement, reliée au niveau des hanches à la jambe fixe en contact ponctuel avec le sol et est entraînée dans un mouvement de pendule inverse pour la jambe fixe et de pendule direct pour la jambe mobile, En l'absence de frottements et de pertes énergétiques au niveau du contact avec le sol, le mouvement de marche impose pour la jambe fixe, des vitesses de la hanche identiques en début et en fin de pas. Le contact avec le sol a l'effet d'un choc élastique sur la structure et on obtient ainsi une brusque variation de la direction de la vitesse des hanches (même effet qu'une bande de billard).

La figure 11 montre les courbes de puissance du moteur de hanches nécessaire pour différentes masses de la jambe mobile. On peut remarquer une augmentation significative de la puissance nécessaire en fonction de la masse. Les minimums locaux de la courbe sont atteints pour les fréquences de résonance de la structure mécanique. Les lignes



FIG. 11 - Puissance consommée par la jambe fixe

horizontales en bleu indiquent comme précédemment la puissance fournie par un moteur à courant continu à aimants permanents au Samarium-Cobalt pour une masse donnée de moteur. Si l'on répartit les masses en mouvement entre le moteur et les autres éléments de la jambe à raison de 50%, ces courbes montrent (en première approximation) qu'une masse de la jambe de 6 kg (donc 3 kg pour le moteur) permet d'atteindre une vitesse maximale de 1,37 m/s. Pour une masse de la jambe de 10 kg, le point d'intersection des courbes avec la courbe bleu à 5 kg donne une vitesse maximale de 1,3 m/s.

En conclusion, on a intérêt à avoir les masses des jambes les plus faibles possibles et les actionneurs électriques avec la puissance massique la plus importante pour pouvoir atteindre des vitesses de déplacement élevées.

#### 4.4 Critères d'optimisation

L'utilisation du robot bipède exige une autonomie maximale et par conséquent d'économiser l'énergie contenue dans une masse limitée de batteries. L'analyse des flux d'énergie dans l'alimentation et les moteurs électriques ainsi que dans la structure mécanique des robots aide à définir le critère d'optimisation le plus adaptée. Les moteurs habituellement utilisés sont des moteurs à courant continu ou des moteurs synchrones triphasés ("brushless"). Ces moteurs sont alimentés par des convertisseurs de puissance commandés en MLI.

Les différentes structures possibles sont représentées sur les figures 12 et 13. La structure électronique classique utilisée dans la majorité des robots ne permet pas un transfert bidirectionnel de l'énergie. En cas de renvoi de l'énergie cinétique vers l'alimentation, un module dissipatif évacue cette énergie. Le critère énergétique le mieux approprié pour l'optimisation est alors donné par :

$$\Gamma = \frac{1}{2} \left[ \left| \sum_{i=1}^{n} P_i \right| + \sum_{i=1}^{n} P_i \right]$$
(1)



FIG. 12 – Structure d'alimentation classique



FIG. 13 – Structure d'alimentation d'un robot autonome

avec  $P_i$  la puissance fournie à la  $i^{ime}$  articulation motorisée du robot et n le nombre d'axes motorisés.

Dans le cas d'une structure d'alimentation par batterie (Fig.13), le stockage de l'énergie fournie par le système mécanique lors de certaines phases du mouvement est possible. Le critère énergétique le plus approprié est alors donné par :

$$\Gamma = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} P_i \tag{2}$$

Ce dernier critère revient au même que de minimiser l'ensemble des pertes (pertes Joule, pertes mécaniques par frottement dans les transmissions et les articulations, pertes de contact avec le sol). Les deux critères évoqués diffèrent de ceux habituellement utilisés en automatique. Ils ne peuvent pas être écrits sous une forme quadratique de la commande et/ou de l'état.

#### 4.5 Écriture du problème d'optimisation

Le comportement du robot peut être décrit par l'équation différentielle suivante :

$$\dot{X} = F(X,t) + BU + J_e^T(X,t)F_e \tag{3}$$

avec X le vecteur d'état du système composé de l'ensemble des coordonnées articulaires et des coordonnées de position et d'orientation dans l'espace du robot, ainsi que des dérivées des grandeurs précédentes. Le vecteur F(X,t)contient l'ensemble des forces d'accélération, inertielles et de Coriolis issus des équations de Lagrange. La matrice de commande B définit l'action des moteurs. La matrice  $J_e^T(X,t)$  définit l'effet du vecteur des forces extérieures  $F_e$  sur le robot.



FIG. 14 – Consommation énergétique du robot bipède du LSIIT

Le robot est soumis à un ensemble d'équations de contraintes. On distingue les contraintes géométriques (butées, espace atteignable, etc.), les contraintes dynamiques (vitesses maximales, couples maximums), les contraintes d'environnement (obstacles, tâches prédéfinies, etc.) et les contraintes de contact (contact unilatéral avec le sol). Ces contraintes sont mises sous forme d'inégalités g(X,t) < 0 ou d'égalités h(X,t) = 0.

On désire minimiser le critère énergétique  $\Gamma$  défini précédemment. Ce critère est multimodal et très sensible aux variations de la structure du robot, en particulier aux variations des contacts avec le sol. De plus, la détermination précise de l'énergie consommée nécessite une modélisation très précise et très fine de toutes les formes de frottements. L'énergie perdue dans le contact avec le sol (en particulier en cas de choc) est très difficile à obtenir et demandera encore des études.

#### 4.6 Méthodes d'optimisation

De nombreux auteurs se sont intéressés au problème d'optimisation des allures de robots à pattes [3][4][5][8][9][11][12][14][16][28][31][32] [33][34][35]. Les allures étant dans la plupart des cas cycliques, on cherche généralement des solutions optimales avec des configurations spatiales initiale et finale identiques. La cyclicité a conduit de nombreux auteurs à paramétrer les coordonnées du vecteur d'état X sous forme de développement en série (série de Fourier, de Legendre, série entière). Les travaux plus récents ont montré que l'écriture des coordonnées articulaires sous forme de polynôme de Bezier est la plus intéressante [34][35].

La résolution du problème d'optimisation donne bien sûr l'allure du déplacement du robot. La longueur des pas  $L_p$ est habituellement fixée. En faisant varier  $L_p$ , on obtient un ensemble de courbes d'isoénergie qui permettent de choisir au mieux la trajectoire des pattes d'un robot. La figure 14 montre ces courbes optimales dans le cas du robot bipède développé au LSIIT [5]. On remarque qu'on a intérêt à augmenter légèrement la longueur des pas lorsque l'on veut augmenter la vitesse de marche.

Il est alors également possible de chercher des solutions

optimales en terme de structure, de position des masses, de longueur des segments des pattes, etc. Ce problème d'optimisation de structure ou de placement des éléments de la conception mécanique des robots à pattes est nettement plus ardu. Le nombre de paramètres à optimiser augmente rapidement. Les algorithmes d'optimisation paramétrique basés sur les méthodes du simplex ou les algorithmes génétiques sont alors à privilégier [5].

# 5 Solutions technologiques pour les robots à pattes

#### 5.1 Éléments de choix de la motorisation

La conception des robots à pattes nécessite des composants pour la réalisation de chaînes cinématiques complexes. L'essentiel des mouvements à générer étant des mouvements de rotation, on a besoin de deux fonctions de base : la réduction de la vitesse de rotation et la modification de l'orientation ou le décalage d'un axe de rotation [36][37]. La première fonction est rendue nécessaire par l'emploi de moteur électrique. Ces moteurs n'ont un bon rendement que pour des vitesses de rotation permet de déplacer la masse des moteurs et des réducteurs dans une zone du robot intéressante, soit du point de vue énergétique comme on a vu précédemment, soit du point de vue conception en occupant mieux le volume dédié au robot.

Le choix des moteurs est une étape capitale de la conception d'un robot à pattes [13]. L'augmentation de la charge du robot passe par une diminution des masses des éléments mécaniques, des transmissions et des moteurs. Les travaux de dimensionnement des moteurs électriques [27][40] montrent que l'élément déterminant pour le choix d'un moteur de robot bipède est son coefficient d'efficacité. Ce coefficient est défini par référence au moteur à courant continu, mais un coefficient similaire peut être obtenu pour tous les moteurs électriques. Le coefficient d'efficacité  $K_m$ est défini par :

$$K_m = \frac{C_{lim}}{\sqrt{P_J}} = \frac{k_e}{\sqrt{R}} \tag{4}$$

avec  $C_{lim}$  le couple moteur instantané limite,  $P_J$  les pertes Joule correspondantes,  $k_e$  la constante de couple et R la résistance d'induit. Le coefficient d'efficacité est proportionnel à la masse du moteur puissance 5/6.

Lorsqu'il est nécessaire de comparer des moteurs de puissance ou de couple moteur très différent, il est utile de parler du coefficient de qualité  $Q_m$  du moteur défini par :

$$Q_m = \frac{K_m}{m^{5/6}} = \frac{C_{lim}}{\sqrt{P_J}m^{5/6}}$$
(5)

avec m la masse du moteur.

La figure 15 donne les valeurs du coefficient de qualité pour différentes technologies et différents dimensionnements de moteurs électriques. Les moteurs considérés ici



FIG. 15 – Coefficient de qualité pour différents types de moteurs

sont tous des moteurs à courant continu à aimants permanents. Le matériau de l'aimant et la forme du rotor caractérisent chaque type de moteur. Les types de moteur représentés sur la figure sont réalisés avec des aimants permanents en ferrite ou en Samarium-Cobalt (noté SmCo) ou en Neodym-Bore (noté Neodym). Les autres types sont caractérisés par des moteurs sans matériau ferromagnétique au rotor (noté sans fer) ou par des grands couples moteurs (noté direct). Les moteurs dit "moteur couple" ou "direct drive" forment une catégorie particulière qui ne nécessite pas de réducteur.

Certains moteurs nécessitant un réducteur et d'autres pas, la comparaison entre les différentes technologies évoquées précédemment demandent donc la prise en compte de la masse de la transmission mécanique. On peut ainsi définir par analogie un coefficient de qualité  $Q_a$  de l'association moteur-réducteur. Ce coefficient est défini par :

$$Q_{a} = \frac{C_{max}}{\sqrt{P_{J}}(m_{r}+m)^{5/6}}$$
(6)

ou encore Q en tenant compte également des pertes mécaniques dues au réducteur

$$Q = \frac{C_{max}}{\sqrt{P_J + P_M} (m_r + m)^{5/6}}$$
(7)

avec  $m_r$  la masse et  $P_M$  les pertes mécaniques des éléments de transmission (réducteur). On obtient ainsi les résultats Fig. 16.

La comparaison entre les deux figures montre clairement comment le réducteur permet d'augmenter le coefficient de qualité de l'association. On aura intérêt à monter des réducteurs et des éléments de transmission mécanique sur chaque axe.

En conclusion sur le choix de la motorisation, il apparaît nécessaire de choisir des moteurs électriques ayant des aimants permanents de grandes efficacités, c'est-à-dire capable de produire une pression magnétique importante



FIG. 16 – Coefficient de qualité de l'association réducteurmoteur



FIG. 17 – Photo de la conception de la liaison des chevilles du robot Bip

pour une masse d'aimant minimale. Les moteurs notés "SmCo" et "Neodym" sont donc à privilégier de même que les moteurs "sans fer au rotor" qui ne sont disponibles que pour des petites puissances.

#### 5.2 Éléments de choix des transmissions

La conception des chevilles et des pieds est l'un des problèmes les plus difficiles. Il est nécessaire dans un espace réduit de mettre en place deux articulations motorisées et éventuellement des articulations passives. Le pied contient également plusieurs capteurs (détection de contact, mesure d'efforts et de mouvement de dérapage, etc.). Les moteurs doivent être placés le long du tibia afin de mieux utiliser l'espace utile, de diminuer la taille du pied et de rapprocher les masses du tronc. Les transmissions à renvoie conique, les systèmes vis à billes et les structures parallèles sont donc à privilégier. Une très bonne conception des liaisons de la cheville a été proposée par Sardain et al. dans [36][37] et est représentée Fig.17.



FIG. 18 – Détails de la conception de l'articulation du genou du robot Rabbit

Pour l'articulation des genoux, l'utilisation d'un réducteur de type "Harmonic Drive" est à privilégier, car il possède un bon coefficient de qualité, il permet de réaliser également directement la fonction de guidage et une transmission par courroie permet de rapprocher le moteur des hanches et ainsi de remonter leur masse. Cette solution a été adoptée pour la construction du robot Rabbit (Fig.18). La complexité de réalisation de l'articulation des hanches vient du fait qu'il est nécessaire de motoriser une liaison rotule complète. La place pose dans une certaine mesure moins de problèmes car les moteurs sont ici placés sur le corps central du bassin. Plusieurs développements [23][24][25][37] très réussis ont été proposés (voir Fig.19). Néanmoins, ces conceptions sont souvent très fragiles. Les évolutions possibles de la conception de l'articulation des hanches doivent tenir compte des travaux sur les robots parallèles [1]. Les liaisons rotules à centre de rotation variant dans le temps sont également à envisager avec la plus grande attention.

## 6 Conclusion

Ce document présente d'abord les analogies entre les structures de locomotion à roue et à pattes. Les structures cinématiques bipèdes et quadrupèdes dans les plans sagittal et frontal sont ensuite présentées et analysées.

La détermination des trajectoires optimales est un sujet très important puisqu'il détermine l'autonomie énergétique du robot. Leur détermination peut se faire par une résolution de commande optimale, mais au vu du grand nombre d'articulation et de trajectoires possibles, les méthodes paramétriques sont à privilégier. L'optimisation sous contrainte peut être effectuée avec des critères énergétiques ou de minimisation de la commande. L'analyse des puissances consommées par des structures simples comme une seule jambe en balancement ou un robot de type "compas" a per-



HRG AIST & KAWADA INDUSTRIES, INC.

FIG. 19 – Détails de la conception des articulations des hanches du robot HRP2

mis de fournir des règles de conception de ces robots.

Les principales règles qu'il est nécessaire d'appliquer lors de la conception et du dimensionnement des robots à pattes ont été rappelées. L'analyse énergétique montre qu'il est nécessaire de remonter le centre de gravité des corps du robot et donc placer les actionneurs des pattes le plus haut possible dans la structure. Ce placement impose des transmissions cinématiques qui augmente la masse. L'efficacité de l'ensemble moteur-transmission mécanique représente ainsi le meilleur critère pour le choix des technologies. Un second critère important est la puissance massique de la chaîne d'actionnement. L'étude de structures très simples comme un double pendule ou un robot type "compas" donnent des indications très intéressantes sur les choix à effectuer. Les principales solutions pour la motorisation, les transmissions cinématiques ont été exposées et comparées.

## Annexes

Le modèle dynamique du robot de la figure 8 s'écrit :

$$M\ddot{X} + N + Q = \Gamma \tag{8}$$

avec  $X^T = [y z q_3 q_5], M = [M_{ij}], (i, j) \in [1, 2]; N = [N_i]; Q = [Q_i]$ . Les coefficients des matrices et des vecteurs sont donnés par :

$$\begin{split} M_{11} &= m_2 \, z_2^2 - 2 \, m_3 \, z_3 \, L_2 \, \cos(q_5) + m_3 \, z_3^2 + m_3 \, L_2^2 \\ M_{12} &= M_{21} = m_3 \, z_3 \, (z_3 - L_2 \, \cos(q_5)) \\ M_{22} &= m_3 \, z_3^2 \\ N_1 &= m_3 \, z_3 \, L_2 \, (2 \, \dot{q}_3 + \dot{q}_5) \, \dot{q}_5 \, \sin(q_5) \\ &- (m_2 \, z_2 + m_3 \, L_2) \, \ddot{y} \cos(q_3) + m_3 \, z_3 \, \ddot{y} \cos(q_3 + q_5) \\ &- (m_2 \, z_2 + m_3 \, L_2) \, \ddot{z} \sin(q_3) + m_3 \, z_3 \, \ddot{z} \sin(q_3 + q_5) \end{split}$$

$$N_{2} = -m_{3} z_{3} L_{2} \dot{q}_{3}^{2} \sin(q_{5}) + m_{3} z_{3} \ddot{y} \cos(q_{3} + q_{5}) + m_{3} z_{3} \ddot{z} \sin(q_{3} + q_{5}) Q_{1} = -g (m_{2} z_{2} + m_{3} L_{2}) \sin(q_{3}) + g m_{3} z_{3} \sin(q_{3} + q_{5}) Q_{2} = g m_{3} z_{3} \sin(q_{3} + q_{5})$$

Pour déterminer les résultats de la figure 9, on a choisi les valeurs numériques suivantes :  $L_2 = 0, 4 \text{ m}, z_3 = 0, 2 \text{ m}$  et  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .

# Références

- S.K. Agrawal, G. Desmier, S. Li. Fabrication and analysis of a novel 3DOF parallel wrist mechanism, *Journal of Applied Mechanics*, 117:343-345, 1995.
- [2] J.V. Basmajian. The human bicycle, *BiomechanicsV-A*, In P.V. Komi (Ed.), Baltimore, MD, university Park Press, pp. 297-302.
- [3] V.V. Beletskii, V.E. Berbyuk, V.A. Samsonov. Parametric optimization of motions of a bipedal walking robot, *Izvestiya AN SSSR Mekhanika Tverdogo Tela [Mechanics of Solids]*, 17(1):28-40.
- [4] Y.V. Bolotin. Energetically optimal gaits of a bipedal walking robot, *Mechanics of Solids*, 19(6) :44-51.
- [5] G. Cabodevilla, N. Chaillet, and G. Abba. Near Optimal Gait for a Biped Robot, *In Proc. of the AMS'95*, Kalrsruhe, Germany, 1995.
- [6] G.A. Cavagna, N.C. Heglind, and C.R. Taylor. Mechanical work in terrestrial locomotion : Two basic mechanisms for minimizing energy expenditure. *American Journal of Physiology*, 233 :R243-R261, 1977.
- [7] P.H. Channon, S.H. Hopkins, D.T. Pham. Derivation of Optimal Walking Motions for a Bipedal Walking Robot, *Robotica*, Vol. 10, pp. 165-172, 1992.
- [8] P.H. Channon, S.H. Hopkins, D.T. Pham. A variational approach to the optimization of gait for a bipedal robot, *Proceedings of INSTN MECH ENGRS, ImechE*, Vol.210, pp. 177-186, 1996.
- [9] S. Chesse. Dynamique optimale de systèmes articulés à cinématique fermée. Application à la synthèse d'allures de marche optimales. Thèse, Université de Poitiers, Septembre 2002.
- [10] C. Chevallereau, A.M. Formal'sky, B. Perrin. (1997) Control of a Walking Robot with Feet Following a Reference Trajectory Derived from Ballistic Motion, *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Albuquerque, NM, USA, Vol. 2, pp. 1094-1099.
- [11] C. Chevallereau, Y. Aoustin. Optimal running trajectories for a biped, CLAWAR 99, 2nd Int. Conf. on Climbing and Walking Robots, Portsmouth, Sept. 1999.
- [12] C. Chevallereau and Y. Aoustin. Optimal reference trajectories for walking and running of a biped robot. *Robotica*, 19(5)557:569, Sept. 2001.

- [13] C. Chevallereau, G. Abba, Y. Aoustin, E.R. Plestan, F. Westervelt, C. Canudas de Wit, J.W. Grizzle. Rabbit : A testbed for advanced control theory. *IEEE Control Systems Magazine*, 23(5) :57-79, October 2003.
- [14] C.K. Chow and D.H. Jacobson. Studies of Locomotion Via Optimal Programming, *Studies of Human Locomotion via Optimal Programming, Mathematical Biosciences* Vol. 10, pp. 239-306, 1971.
- [15] S. Collins, M. Wisse, A. Ruina. A 3D passive dynamic walking robot with two legs and knee, *The Int. J. Robotics Res.*, 20(7) :607-615.
- [16] O. Coussi. De l'observation cinématique à l'étude dynamique et énergétique de mouvements humains. Thèse, Université de Poitiers, Septembre 1997.
- [17] H. Dankowicz, J. Adolfsson, A. Nordmark. 3D passive walkers : finding periodic gaits in presence of discontinuities, *Nonlinear Dynamics*, 24 :205-229.
- [18] B. Espiau and the Bip Team. BIP : a joint project for the development of an anthropomorphic biped robot, *Proc. 1997 IEEE Int. Conf. on Advanced Robotics*, Monterey, CA, USA, pp. 267-272.
- [19] J. Furusho, M. Sano, M. Sakaguchi, E. Koizumi. Realization of bounce gait in a quadruped robot with articular-joint-type legs. *IEEE Int. Conf. on Robotics* and Automation, Nagoya, Japan, Vol. 1, pp. 697-702, May 22-27, 1995.
- [20] A. Goswami, B. Espiau, A. Keramane. Limit cycles and their stability in a passive bipedal gait, *Proc. 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Minneapolis, MN, USA, vol.1, pp. 246 - 251, April 22-28, 1996.
- [21] A. Goswami, B. Thuilot, B. Espiau. A study of passive gait of a compass-like biped robot : symmetry and chaos, *Int. J. of Robotics Research*, 17(12) :1282-1301.
- [22] A.A. Grishin, A.M. Formal'sky, A.V. Lensky, S.V. Zhitomirsky. Dynamic walking of a vehicle with two telescopic legs controlled by two drives, *The Int. J. Robotics Res.*, 13(2):137-147.
- [23] M. Gunther, R. Blickman. Joint stiffness of the ankle and the knee in running, *Journal of Biomechanics*, 35:1459-1474.
- [24] K. Hirai. The Honda Humanoid Robot, Proc. 1997 IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Grenoble, France, pp. 499-508.
- [25] K. Hirai, M. Hirose, T.T. Kenada. The development of Honda humanoid robot, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, May 1998, Leuwen, Belgium, pp. 1321-1326.
- [26] J.K. Hodgins. Biped gait transitions. Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation, Sacramento, California, pp. 2092-2097, April 1991.

- [27] J.M. Hollerbach, I.W. Hunter, J. Ballantyne. A Comparative "Analysis of Actuator Technologies forRobotics". *The Robotics Review*, Vol.2, O. Khatib and J. Canny and T. Lozano-Perez, MIT Press, 1992.
- [28] D.C. Kar, I.K. Kurien, K. Jayarajan. Gaits and energetics in terrestrial legged locomotion, *Mechanism and Machine Theory*, 38:355-366.
- [29] T. McGeer. Passive walking with knees. In Proc. of the 1990 IEEE International Conf. on Robotics and Automation, pp. 1640-1645, 1990.
- [30] T. McGeer. Passive Dynamic Walking, *The Int. J. Robotics Res.*, 9(2):62-82.
- [31] M. Rostami, G. Bessonnet, P. Sardain. Optimal Gait Synthesis of a Planar Biped, *IFAC Int. Workshop on Motion Control*, Grenoble, France, 1998.
- [32] M. Rostami, G. Bessonnet. Sagittal gait of a biped robot during the single support phase. Part 2 : Optimal motion, *Robotica*, 19 :241-253.
- [33] L. Roussel, C. Canudas-de-Wit and A. Goswani. Generation of Energy Optimal Complete Gait Cycles for Biped. *IEEE Robotics and Automation Conf.*, Leuwen, Belgium, pp. 2036-2042, 1998.
- [34] T. Saidouni and G. Bessonnet. Gait trajectory optimization using approximation functions. *Proc. Int. Conf. on Climbing and Walking Robots*, Paris, France, Sept. 2002.
- [35] T. Saidouni. Synthèse numérique d'allures de marche optimales de robots bipèdes anthropomorphes, Thèse, Université de Poitiers, 11 Janvier 2005.
- [36] P. Sardain, M. Rostami, G. Bessonnet. An anthropomorphic biped robot : dynamic concepts and technological design, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 28 :823-838.
- [37] P. Sardain, M. Rostami, E. Thomas, G. Bessonnet. Biped robots : Correlations between technological design and dynamic behavior, *Control Engineering Practice*, 7(1999) :401-411.
- [38] R. Sellouati, F.B. Ouezdou. Design and control of a 3DOFs parallel actuated mechanism for biped application, *Mechanism and Machine Theory*, 2005.
- [39] A.C. Smith, M.D. Berkemeier, Passive Dynamic Quadrupedal Walking. Proc. of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, NM, USA, - April 1997, Vol.1, pp.34-39,
- [40] R.S. Wallace, J.M. Selig. Scaling Direct Drive Robots. Technical Report TR1994-669, New York University, August 1994.
- [41] Site web du robot bipède Rabbit, http://robot-rabbit.lag.ensieg.inpg.fr, 2005.
- [42] Site web du robot Honda Asimo, http://asimo.honda.com/, 2005.