



HAL
open science

L'effets des Articulations Compliantes sur l'Efficacité Énergétique d'un Robot Bipède

Abdul Haq, Yannick Aoustin, Christine Chevallereau

► **To cite this version:**

Abdul Haq, Yannick Aoustin, Christine Chevallereau. L'effets des Articulations Compliantes sur l'Efficacité Énergétique d'un Robot Bipède. Septième Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA 2012), Jul 2012, Grenoble, France. hal-00716302

HAL Id: hal-00716302

<https://hal.science/hal-00716302>

Submitted on 10 Jul 2012

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.

L'effets des Articulations Compliantes sur l'Efficacité Énergétique d'un Robot Bipède ^{*}

A. Haq Y. Aoustin C. Chevallereau

*LUNAM, Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de
Nantes UMR CNRS 6597, CNRS, Université de Nantes, 1 rue de la
Noë, 44321 Nantes Cedex 3, France
E-mail : Abdul.Haq@irccyn.ec-nantes.fr,
Yannick.Aoustin@irccyn.ec-nantes.fr,
Christine.Chevallereau@irccyn.ec-nantes.fr*

Résumé : Les effets énergétiques de blocage de genou et l'ajout de ressorts aux différentes articulations d'un bipèdes sont étudiés. L'objectif est de réduire la consommation d'énergie durant la marche. Une allure de marche sans impact est définie pour l'étude de la consommation d'énergie. Le coût énergétique de la marche est déterminé sans raideur articulaire et sans blocage des genou comme une base de comparaison. La trajectoire d'allure est optimisée avec des ressorts aux différentes articulations et le coût énergétique de la marche est calculé pour différentes vitesses de marche. Le genou de support est alors bloqué mécaniquement et l'allure est optimisé afin de calculer le coût de la marche. Le coût énergétique de la marche déterminé pour les deux cas ci-dessus est ensuite comparé au coût de base. Il est observé que l'ajout de ressorts de torsion aux genoux réduit le coût de marche jusqu'à 62% à basses vitesses et pour les hanches jusqu'à 35% à hautes vitesses de marche avec une raideur du ressort comme un paramètre d'optimisation pour les deux cas. Le blocage mécanique du genou de support peut réduire le coût de la marche jusqu'à 84% à basses vitesses de marche en optimisant l'allure et l'angle de blocage de genou.

Keywords: Efficacité énergétique, génération de trajectoire, ressorts, raideur, bipède, optimisation.

1. INTRODUCTION

Au cours des deux dernières décennies, les études sur les robots passifs ont considérablement attiré l'attention des chercheurs afin de résoudre le problème d'optimisation énergétique de la marche. Un robot est appelé passif lorsque aucune énergie externe (actionneur) est nécessaire pour la marche. McGeer (1990) a tout d'abord présenté ses travaux sur la marche dynamique passive et a démontré comment il est possible d'exploiter la distribution de masse du robot pour le faire marcher sans actionnement sur une pente douce.

A partir du travail de McGeer qui concerne les marcheurs passifs, la communauté de recherche en robotique humanoïdes a développé les marcheurs passifs dynamiques avec un actionnement minimal juste suffisant pour maintenir un mouvement périodique, qui est fonction de la structure mécanique du bipède, sur un sol horizontal (Collins and Ruina, 2005). Ces robots horizontales ont des coûts énergétiques presque égaux à celui de l'humain. Les trois fameux robots marcheurs basés sur la conception de rampe-marche et capable de marcher sur le sol plat sont le bipède de Cornell, le bipède de Delft (Denise) (Anderson et al., 2005; Wisse et al., 2006) et le bipède du MIT (Collins et al., 2005). Ces bipèdes ont des mouvements proches de ceux de

leurs homologues rampe-marcheurs (Collins et al., 2005). Gini et al. (2007), ont étendu cette idée à la réalisation des robots complètement actionnés et construit leur robot avec des articulations compliantes et une articulation spéciale du genou afin d'améliorer l'efficacité de la marche.

Les robots humanoïdes sont des robots inspirés par la nature. Ils ressemblent à un humain ayant deux jambes, le torse et les mains, bien que plusieurs types de robots bipèdes ont seulement une partie du corps. Par exemple, la plupart des bipèdes marcheurs dynamiques dans les laboratoires de recherche ont seulement deux jambes et un torse (Scheint et al., 2008; Silva and Tenreiro Machado, 1999; Fujimoto, 2004). Mais le nombre de robots humanoïdes ayant des bras, une tête et des pieds croît et les chercheurs se concentrent sur les effets énergétiques des bras, des pieds et la compliance dans les allures de marche en ajoutant des ressorts aux articulations du bipède. La plupart des chercheurs, y compris (Farrell et al., 2007; Schauss et al., 2009; Scheint et al., 2008; Nakano et al., 1994) font hypothèse que des bipèdes avec des chevilles compliantes peuvent être en mesure de marcher plus naturellement et avec plus d'efficacité énergétique durant la marche que des bipèdes sans compliance. Plusieurs chercheurs ont montré que la conception de l'articulation du genou peut aider à améliorer l'efficacité de la marche (Hamon and Aoustin, 2009) et d'autres se sont concentrés sur l'ajout de ressort aux genoux et aux hanches. Cette compliance peut réduire le coût énergétique du robot en produisant des couples

*. Ce travail est soutenu par des subventions ANR pour le projet R2A2 et par la Commission de l'enseignement supérieur (HEC) du Pakistan en vertu du programme de bourses d'études à l'étranger.

qui compensent les effets de la gravité et réduisent ainsi le travail nécessaire des actionneurs pendant la phase de transfert (Migliore et al., 2010).

L'un des problèmes les plus cruciaux dans le domaine de la robotique, en particulier dans la génération de trajectoire du robot humanoïde, est la consommation d'énergie durant la marche. Les chercheurs tentent d'obtenir la marche bipède, la plus proche possible de celle de la marche humaine tout en étant stable (Collins and Ruina, 2005; Ni et al., 2009; Yamaguchi et al., 1998). Des études montrent que les jambes du robot humanoïde consomment plus d'énergie durant la phase d'appui que durant la phase de transfert (Daniela Förg, 2010). Cette différence dans la consommation d'énergie est due à la demande de couples élevés pour soutenir le poids du robot sur le sol. Par conséquent, il est possible de diminuer de façon significative la consommation d'énergie de la jambe d'appui par optimisation. Förg (Daniela Förg, 2010) a montré que l'articulation la plus inefficace est l'articulation du genou de support. Il a donc introduit des ressorts pour réduire la consommation d'énergie.

Récemment, des membres flexibles ont été utilisés pour récupérer l'énergie perdue, diminuer la consommation d'énergie et à stabiliser l'allure de marche (Wisse et al., 2006). Dans la plupart des cas, les ressorts sont ajoutés à la cheville du bipède pour stocker l'énergie et l'utiliser en cas de besoin surtout pendant le décollement de la cheville juste avant l'impact du talon de la jambe libre. Geyer et al. (2006) ont introduit l'idée de jambes élastiques avec des ressorts de compression pour marcher et courir. Ils ont montré que les jambes compliantes sont essentielles pour expliquer la mécanique de marche. Ils ont étudié un modèle masse-ressort du bipède qui comprend le double appui comme une partie essentielle de son mouvement et reproduit la dynamique des caractéristiques de la marche. La dynamique des allures de marche et de course est prise en compte par un même modèle.

Des études indiquent qu'il y a un lien direct entre l'impulsion de l'orteil de la jambe arrière et le couple de rotation entre les jambes aux hanches (Lewis and Ferris, 2008). En utilisant l'impulsion de l'orteil seul pour la marche on consomme quatre fois moins d'énergie qu'en utilisant le couple de la hanche seule (Kuo, 2002; Lewis and Ferris, 2008). Une autre méthode de réduction de la consommation d'énergie est le blocage mécanique du genou de support juste avant l'impact et la libération du blocage à la fin de la phase de double appui. Le genou d'appui avec un mécanisme actif est jugée technologiquement simple et efficace énergiquement (Trifonov and Hashimoto, 2007). Toutefois, ni les effets combinés du blocage du genou et l'ajout de ressorts ont été explorés, ni les effets de la compliance sur la consommation d'énergie ont été présentés en fonction de la vitesse de marche.

Dans cet article, nous avons réalisé quatre études différentes, la première sur le robot sans ressort et sans blocage, la deuxième en mettant des ressorts sur différentes articulations, la troisième avec blocage du genou lors de la phase de support et la quatrième en bloquant le genou de support et en ajoutant des ressorts sur d'articulations de la hanche. Nous supposons que le genou de support peut être bloqués mécaniquement et que le couple nécessaire

est fourni par le blocage mécanique. Il est considéré que la masse du mécanisme de blocage est négligeable, que tous les actionneurs sont sans frottement et que les discontinuités du couple ne sont pas autorisées.

Notre robot est composé d'un tronc dont la masse comprend, deux cuisses, deux tibias et deux pieds. On considère la marche cyclique avec des phases de simple appui séparées par des impacts impulsionnels, à pied à plat. Les trajectoires de référence de la marche sont définies par des fonctions splines cubiques en fonction de position articulaire.

Cet article est structuré comme suit : le robot étudié est présenté section 2. La section 3 présente le modèle dynamique du robot. La section 4 une stratégie d'optimisation avec et sans ressorts et blocage du genou est expliquée. Une étude numérique de l'influence de ressorts et de blocage du genou sur la consommation d'énergie avec des trajectoires de référence pour des vitesses de marche différentes est proposé. Les résultats sont expliqués dans section 5. La section 6 présente nos conclusions et perspectives.

2. PRÉSENTATION DU BIPÈDE

Notre robot présenté figure 1, est un robot bipède 2D, constitué de deux jambes identiques et d'un torse. Chaque jambe comprend une cuisse, le tibia et un rigide. Les corps sont supposés rigides. Ils sont connectés par des articulations rotoïdes considérées comme idéales (pas de jeu mécanique, pas d'élasticité), et ne peuvent se déplacer que dans le plan sagittal. Notre bipède est l'équivalent 2D du robot humanoïde HYDROiD (Alfayad et al., 2009), qui a des masses et une taille similaires à celles d'un humain.

FIGURE 1. La représentation des coordonnées généralisées et les couples appliqués

L'allure désirée se compose de phases de simple appui séparées par des phases de double support instantanées sans impact (le pied libre entre en contact avec le sol avec une vitesse nulle). Le pied droit est le pied d'appui et le pied gauche est le pied libre. Le pas de la marche commence par une phase de simple appui et se termine avec le contact sans impact du pied à plat sur le sol où les pieds échangent leur rôle c'est à dire que le pied d'appui devient le pied libre et vice versa.

Plusieurs études ont été menées sur le bipède :

- cas A.** Les trajectoires du robot sont optimisées et le coût énergétique de la marche est calculé sans ajouter des ressorts et sans bloquer le genou.
- cas B.** Les ressorts sont ajoutés à la hanche, au genou ou à la cheville du robot.
 - cas B1.** Le ressort est ajouté uniquement sur les articulations de jambe d'appui (cheville, genou ou hanche).
 - cas B2.** Des ressorts identiques sont ajoutés à la fois sur les articulations des deux jambes (cheville, genou ou hanche).

Dans tous les cas où un ressort est ajouté à l'une des articulations, le coefficient de raideur du ressort K est optimisé avec la trajectoire. L'angle

de biais (ou l'angle de repos du ressort) de ressort q_{sj} est fixé à zéro pour permettre de garder le bipède en position verticale et de réduire le couple de l'actionneur.

cas C. Le genou du support est bloqué mécaniquement à l'impact et pendant toute la phase de support sans ajout de ressorts à aucune des articulations.

cas C1. L'angle de blocage du genou (β) et l'allure de marche sont optimisés.

cas C2. A partir sur les valeurs numériques obtenues dans le cas **C1**, une valeur constante de β est sélectionnée, puis la trajectoire de la marche est optimisée.

cas D. Le genou d'appui est bloqué mécaniquement et des ressorts identiques sont ajoutés à la hanche. L'angle de blocage du genou β et la raideur du ressort K sont optimisés avec la trajectoire de marche.

3. MODÈLE DU BIPÈDE

3.1 Modèle dynamique en phase de simple appui

Le modèle dynamique peut être développé en utilisant la formulation de Lagrange. En considérant une liaison implicite de la position du pied avec le sol c'est à dire qu'il n'y a pas de décollement ni de glissement lors de la phase de simple appui, le modèle dynamique est :

$$\mathbf{A}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \Gamma \quad (1)$$

ou avec des ressorts,

$$\mathbf{A}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \mathbf{\Gamma}_s = \Gamma \quad (2)$$

where $\mathbf{A}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ est la matrice d'inertie, $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ contient les forces de Coriolis et centrifuges, $\mathbf{G}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ est le vecteur des forces de gravité, $\mathbf{\Gamma}_s \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ est le vecteur de couple fourni par des ressorts et est calculé par l'équation (3).

$$\mathbf{\Gamma}_s = \sum_{j=1}^n \mathbf{\Gamma}_{sj} \quad (3)$$

Ici, j est l'articulation sur lequel ressort est installé, n est le nombre total des articulations et $\mathbf{\Gamma}_{sj}$ est le couple fourni par le ressort installé à l'articulation j .

$$\mathbf{\Gamma}_{sj} = \frac{\delta U_j}{\delta q} \quad (4)$$

U_j est l'énergie potentielle du ressort.

4. OPTIMISATION DE TRAJECTOIRE

Dans le problème d'optimisation, la trajectoire de référence pour un pas de la marche est générée et ensuite optimisée pour minimiser un critère sous contraintes. Nous utilisons un polynôme d'ordre quatre pour l'évolution des mouvements articulaires en fonction du temps pour générer la trajectoire de référence. Afin de réduire le nombre

de paramètres d'optimisation, on considère que la trajectoire de référence est cyclique. La trajectoire est répétée à chaque pas de marche. Les configurations articulaires initiale et finale sont identiques. Les vitesses articulaires initiales et après l'impact sont égales. La fonction polynôme de référence est représentée ci-dessous :

$$q_i(t) = \sum_{k=0}^4 a_k t^k \quad \text{for } i=1 \text{ to } 6 \quad (5)$$

Afin de déterminer les coefficients de l'équation (5), cinq contraintes sont nécessaires. Ce sont la configuration articulaire initiale q_{ini} , les vitesses \dot{q}_{ini} au temps zéro, les configurations intermédiaires q_{int} au temps $T/2$, les configurations finales q_{fin} et les vitesses \dot{q}_{fin} au temps T .

4.1 Les paramètres d'optimisation

Les paramètres d'optimisation du robot sont présentés dans cette section. Ces paramètres sont optimisés en utilisant la procédure d'optimisation paramétrique pour trouver la solution optimale en minimisant la consommation énergétique du robot. La méthode de programmation quadratique séquentielle (SQP) est utilisée afin d'optimiser la trajectoire de référence en utilisant la fonction *fmincon* du Matlab. Cette fonction Matlab nous permet d'optimiser une fonction objective (critère) sous des contraintes linéaires et non-linéaires. Par conséquent, nous devons définir le critère à minimiser, les paramètres à optimiser et les contraintes du robot doivent être satisfaites durant la marche. Les paramètres d'optimisation utilisés dans notre étude sont :

- 4 paramètres définissant la configuration de double appui juste avant l'impact (c'est à dire la configuration de la hanche (h_x, h_y), angle du tronc autour de l'axe horizontal et la longueur d du pas).
- 6 paramètres définissant les vitesses finales juste avant l'impact. Les vitesses initiales (vitesses, juste après l'impact) peuvent être trouvées par le modèle d'impact.
- 6 paramètres définissant la configuration intermédiaire du robot.

La vitesse de marche est donnée, le temps T du pas est calculé à partir de la distance parcourue d (longueur de pas) et la vitesse choisie.

4.2 Le critère d'optimisation

Le critère que nous avons utilisé est basé sur le couple de l'actionneur. Ce critère est utilisé pour optimiser la trajectoire et minimiser l'effort des actionneurs pour faire un pas c'est à dire couvrir la distance d sur un cycle de durée T ,

$$C_{\Gamma} = \frac{1}{d} \int_0^T \mathbf{\Gamma}^t \mathbf{\Gamma} dt. \quad (6)$$

C_{Γ} est la fonction objectif à minimiser et $\mathbf{\Gamma}$ représente le vecteur des couples articulaires.

Notre objectif est de minimiser le critère d'optimisation C_{Γ} en trouvant les valeurs optimales des variables d'optimisation P_0 sous contraintes non linéaires. Le mouvement

est défini avec des fonctions polynomiales de degré quatre. Le problème d'optimisation est formulé comme ceci

$$\begin{cases} \text{Minimize } C_{\Gamma}(P_0) \\ \text{Subject to } g_j(P_0) \leq 0, j = 1, 2, \dots, l \end{cases} \quad (7)$$

$C_{\Gamma}(P_0)$ est la fonction objectif à minimiser sous les contraintes l et $g_j(P_0) \leq 0$ à satisfaire. Pour notre problème d'optimisation paramétrique, nous avons 16 paramètres à optimiser pour notre trajectoire du robot, sans ajouter de ressort.

4.3 Les contraintes d'optimisation

Afin d'assurer que la trajectoire est possible, un certain nombre de contraintes doivent être satisfaites. Deux types de contraintes sont appliquées afin d'assurer la marche sur un sol plat.

(1) Contraintes de base :

La composante verticale des forces de réaction du sol (GRF) sur pied d'appui doit être positive pour que le pied du robot reste sur le sol durant toute la phase de transfert. Le pied d'appui ne doit pas glisser pendant la marche. Une valeur du coefficient de frottement μ est choisie. on écrit alors :

$$\{ R_y > 0, \text{ et } \mu R_y \geq |R_x| \quad (8)$$

R_y et R_x sont les composantes verticale et horizontale de la force de réaction.

Pour éviter une rotation du pied de support autour d'un de ses bords, le ZMP du bipède doit être à l'intérieur du polygone de support.

$$l_p \leq ZMP_x \leq l_d \quad (9)$$

Ici, l_p est la longueur du pied entre le talon et la cheville et l_d est la longueur de l'orteil à la cheville.

Le pied libre ne doit pas toucher le sol pendant la phase de transfert, c'est à dire que les distances du talon du pied et des orteils du pied doivent être positives.

$$y_{heel} > 0 \text{ et } y_{toe} > 0 \quad (10)$$

Ici, y_{heel} et y_{toe} sont respectivement les distances verticales du talon et de l'orteil du pied libre durant la phase de transfert.

Les vitesses des orteils et du talon du pied en partant du sol juste après l'impact doit être positives pour assurer le décollage (11) et le pied venant en contact avec le sol ne doit pas glisser ou rebondir lors de l'impact (12).

$$V_{heel} \geq 0 \text{ et } V_{toe} \geq 0 \quad (11)$$

$$I_y > 0 \text{ et } \mu I_y \geq |I_x| \quad (12)$$

(2) Contraintes technologiques : Ces contraintes correspondent aux limitations physiques des actionneurs et des articulations du robot. Chaque actionneur ne peut produire qu'un couple et une vitesse limités. Les limites supérieure et inférieure de configuration articulaires doivent également être satisfaites :

$$\begin{cases} |\Gamma_i| - \Gamma_{i,max} \leq 0, \text{ for } i = 1, \dots, 6 \\ |\dot{q}_i| - \dot{q}_{i,max} \leq 0, \text{ for } i = 1, \dots, 6 \\ q_{i,min} \leq q_i \leq q_{i,max}, \text{ for } i = 1, \dots, 6 \end{cases} \quad (13)$$

$\Gamma_{i,max}$ et $\dot{q}_{i,max}$ représentent les valeurs maximales du couple et de la vitesse respectivement, pour chaque actionneur et $q_{i,min}$ et $q_{i,max}$ sont les limites minimales et maximales des positions articulaires.

5. RÉSULTATS

5.1 Introduction de ressorts

Sur la figure 2, on présente la valeur de la fonction objectif en fonction de la vitesse d'avance de notre bipède dans le cas **A**, le cas **B1** où le ressort a été ajouté à la jambe d'appui et cas **B2** où les ressorts identiques ont été ajoutés aux jambes. Il est à noter que les ressorts identiques ont été ajoutés à la même articulation des deux jambes. La figure 2 montre que le critère d'optimisation est considérablement réduit après l'introduction de ressorts identiques à la fois aux deux articulations de la hanche ou du genou, en parallèle avec les actionneurs.

Nos résultats montrent que la manière la plus efficace pour réduire la consommation d'énergie durant la marche est d'ajouter des ressorts aux articulations de la jambe d'appui seulement. La manière la plus efficace est de mettre un ressort sur l'articulation du genou d'appui (voir fig. 3) qui économise jusqu'à 92% de l'énergie à 0,30m/sec.

FIGURE 2. Valeur de la fonction objectif en fonction de la vitesse de marche (lignes pleines pour des ressorts aux deux articulations à la fois et les lignes pointillées pour les ressorts sur la jambe d'appui)

L'ajout de ressorts uniquement à la jambe d'appui est possible en ayant un mécanisme de raideur variables (Yamaguchi et al., 1998) capable de produire raideur du ressort de zéro à la valeur requise. Cependant, ce mécanisme va ajouter une masse supplémentaire et les paramètres du robot changeront. Lors de nos tests de simulation, nous avons supposé que ce mécanisme n'a pas de masse et que l'énergie consommée par le mécanisme est négligeable.

Le temps d'activation et de désactivation du ressort à raideur variable est très important. Si le ressort n'est pas activé au bon moment, l'énergie est perdue. Pour éviter ce mécanisme à raideur variable, nous nous sommes attachés à l'option simple et ainsi étudier les effets de l'ajout de ressorts de torsion identique aux deux jambes à la fois.

FIGURE 3. Pourcentage d'économie d'énergie en fonction de la vitesse de marche (lignes pleines pour des ressorts aux deux articulations à la fois et les lignes pointillées pour les ressorts sur la jambe d'appui)

Sur la figure 3, on observe dans le cas **B2** que les ressorts aux genoux sont efficaces à faibles vitesses de marche tandis que les ressorts de la hanche sont efficaces pour des vitesses de marche plus élevées. Les deux courbes se croisent à la vitesse de marche des 0.70m/sec ce qui signifie que si le domaine d'application est inférieur à ce point, il faut utiliser des ressorts au genou sinon il faut utiliser des ressorts à la hanche. Il a cependant été observé que

l'ajout de ressorts aux chevilles n'est pas efficace pour notre robot. Ceci est contraire à (Schauss et al., 2009) et (Wisse et al., 2006) où les auteurs ont trouvé que les ressorts aux chevilles sont utiles pour la stabilité et l'efficacité énergétique. C'est probablement parce que nous avons considéré l'allure de marche sans impact et pied à plat et qu'il n'y a pas de rotation du pied d'appui lors de la phase de transfert. En plus nous avons choisi l'angle de repos du ressort égal à zéro. Ce qui peut influencer le rôle des ressorts aux chevilles.

FIGURE 4. Valeur de la fonction objectif en fonction de la vitesse de marche

Sur la figure 4 donne la comparaison des courbes de critères en fonction de la vitesse de marche pour les cas **A**, **B2** (ressorts identiques sur les deux hanches), **C1**, où l'angle de blocage β du genou a été optimisé, **C2** où β de 8,3 degrés a été obtenu à partir des résultats d'optimisation du cas **C1** et **D** pour un bipède avec un ressort identique sur les deux hanches et le genou d'appui bloqué. Ici, des ressorts de la hanche sont choisis pour la comparaison et l'addition éventuelle avec blocage au genou. En effet il n'est pas raisonnable d'envisager en phase de support la mise en place de ressort sur un genou bloqué.

FIGURE 5. Pourcentage de l'économie d'énergie en fonction de la vitesse de marche

Nos résultats de simulation montrent que le blocage du genou est économique pour une allure de marche sans impact du bipède à faibles vitesses de marche et plus coûteux à des vitesses élevées. Les deux courbes pour les cas **C1** et **C2**. Elles indiquent donc que le genou peut être bloqué à un angle constant pour toutes les vitesses possibles de marche. D'après la figure 4, l'ajout de ressorts au niveau des articulations de la hanche tandis que le genou d'appui est bloqué, a des effets négligeables sur les économies d'énergie par rapport au cas du seul blocage des genoux.

Il a également été observé qu'aucune trajectoire de marchent faisable a été trouvée avec le genou de support bloqué au-dessus de 0.6m/sec alors que sans blocage du genou, le bipède est capable de marcher à 1.25m/sec. Lorsque le genou de support a été bloqué, la contrainte de ZMP n'était pas satisfaite à des vitesses de marche supérieures à 0.6m/sec.

La figure 5 montre que l'efficacité énergétique pour le cas **D** est presque la même que celle pour le cas **C2**. Il est clair qu'à partir de nos résultats de simulation que le blocage du genou est efficace à des vitesses de marche inférieure (jusqu'à 0.5m/sec) et pour des vitesses supérieures à 0,5m/sec, le seul choix est de mettre les ressorts à la hanche.

6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans ce papier, des trajectoires sans impact ont été générées pour un robot bipède à sept corps avec trois stratégies différentes. La première est d'ajouter des ressorts de torsion aux différentes articulations. La seconde est de bloquer le genou d'appui. Enfin la troisième combine

les deux stratégies en bloquant le genou de support mécaniquement et en ajoutant des ressorts identiques aux articulations de la hanche. L'objectif principal de l'étude était d'économiser la consommation d'énergie durant la marche.

Nous concluons de cette étude que la consommation d'énergie d'un bipède a été considérablement réduite en ajoutant des ressorts de torsion identiques à l'articulation de la hanche et en bloquant le genou de support mécaniquement. Cependant la vitesse de marche maximale atteignable a été réduite. Le rendement énergétique du blocage du genou seul à faibles vitesses et en ajoutant les ressorts uniquement aux articulations du genou ou de la hanche est également perceptible. La mise en pratique de cette stratégie aura pour objectif d'améliorer considérablement l'efficacité énergétique et donc l'autonomie de notre bipède.

En accord avec les recherches antérieures, notre étude renforce l'idée qu'utiliser la raideur articulaire passive en particulier sur les articulations de la hanche permet d'améliorer l'efficacité énergétique du bipède. Cependant, contrairement aux travaux précédents, les ressorts aux chevilles ne sont pas efficaces dans notre étude.

Dans la perspective de cette étude, la prochaine étape est d'explorer les effets d'angle de repos des ressorts et des ressorts de la cheville avec la rotation du pied sur l'efficacité énergétique du bipède. Cela peut aussi être étendu pour étudier les effets sur un robot bipède en 3D.

RÉFÉRENCES

- Alfayad, S., Ouedzou, F., and Namoun, F. (2009). New three dof ankle mechanism for humanoid robotic application : Modeling, design and realization. In *proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2009)*, 4969–4976.
- Anderson, S., Wisse, M., Atkeson, C., Hodgins, J., Zeglin, G., and Moyer, B. (2005). Powered bipeds based on passive dynamic principles. In *proceedings of the 2005 5th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 110–116.
- Collins, S. and Ruina, A. (2005). A bipedal walking robot with efficient and human-like gait. In *proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2005)*, 1983–1988.
- Collins, S., Ruina, A., Tedrake, R., and Wisse, M. (2005). Efficient bipedal robots based on passive-dynamic walkers. *Science*, 307(5712), 1082–1085.
- Daniela Förg, Martin Förg, H.U. (2010). A bipedal robot model with elastic actuation. In *proceedings of the 1st Joint International Conference on Multibody System Dynamics*.
- Farrell, K., Chevallereau, C., and Westervelt, E. (2007). Energetic effects of adding springs at the passive ankles of a walking biped robot. In *proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2007)*, 3591–3596.
- Fujimoto, Y. (2004). Minimum energy biped running gait and development of energy regeneration leg. In *proceedings of the 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC '04)*, 415–420.

- Geyer, H., Seyfarth, A., and Blickhan, R. (2006). Compliant leg behaviour explains basic dynamics of walking and running. In *proceedings of the Royal Society B*.
- Gini, G., Scarfogliero, U., and Folgheraiter, M. (2007). Human-oriented biped robot design : Insights into the development of a truly anthropomorphic leg. In *proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '07)*, 2910–2915.
- Hamon, A. and Aoustin, Y. (2009). Study of different structures of the knee joint for a planar bipedal robot. In *proceedings of the 9th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2009)*, 113 – 120.
- Kuo, A.D. (2002). Energetics of actively powered locomotion using the simplest walking model. *Journal of Biomechanical Engineering*, 124(1), 113–120.
- Lewis, C.L. and Ferris, D.P. (2008). Walking with increased ankle pushoff decreases hip muscle moments. *Journal of Biomechanics*, 41(10), 2082–2089.
- McGeer, T. (1990). Passive dynamic walking. *The International Journal of Robotics Research*, 9(2), 62–82.
- Migliore, S., Ting, L., and DeWeerth, S. (2010). Passive joint stiffness in the hip and knee increases the energy efficiency of leg swinging. *Autonomous Robots*, 29, 119–135.
- Nakano, Y., Chono, K., Yoneda, K., and Kameishi, H. (1994). A dynamic biped walking robot based on the momentum mechanism with flexible beams. In *proceedings of the IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems '94. 'Advanced Robotic Systems and the Real World', IROS '94*, volume 2, 1318–1323.
- Ni, X., Chen, W., and Liu, J. (2009). A comparison between human walking and passive dynamic walking. In *proceedings of the 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA 2009)*, 2552–2555.
- Schauss, T., Scheint, M., Sobotka, M., Seiberl, W., and Buss, M. (2009). Effects of compliant ankles on bipedal locomotion. In *proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '09)*, 2761–2766.
- Scheint, M., Sobotka, M., and Buss, M. (2008). Compliance in gait synthesis : Effects on energy and gait. In *proceedings of the 8th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Humanoids 2008*, 259–264.
- Silva, F. and Tenreiro Machado, J. (1999). Energy analysis during biped walking. In *proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '09)*, volume 1, 59–64.
- Trifonov, K. and Hashimoto, S. (2007). Active knee-lock release for passive-dynamic walking machines. In *proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2007)*, 958–963.
- Wisse, M., Hobbelen, D., Rotteveel, R., Anderson, S., and Zeglin, G. (2006). Ankle springs instead of arc-shaped feet for passive dynamic walkers. In *proceedings of the 6th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 110–116.
- Yamaguchi, J., Nishino, D., and Takanishi, A. (1998). Realization of dynamic biped walking varying joint stiffness using antagonistic driven joints. In *Proceedings of the IEEE 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 3, 2022–2029.