

# DEVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE DU ROBOT BIPEDE ANTHROPOMORPHE BIP 2000.

Philippe SARDAIN, Guy BESSONNET, Mostafa ROSTAMI.

Laboratoire de Mécanique des Solides  
UMR 6610 CNRS-Université de Poitiers  
SP2MI, BP 179, 86960 Futuroscope Cedex.  
sardain@lms.univ-poitiers.fr

## RESUME

Le projet BIP 2000 a pour objectif la réalisation d'un robot bipède à fonctionnalité locomotrice anthropomorphe, pour la démonstration de différentes allures de marche. Le prototype, à l'étude depuis trois ans dans le cadre d'un projet impliquant quatre laboratoires français, possède quinze degrés de liberté. Ses dimensions et sa structure d'actionnement sont inspirées du marcheur humain. L'articulation type a été testée ; une structure de jambe à quatre ddl a été construite et validée ; les jambes définitives seront terminées en février 1999 et l'ensemble pelvis-tronc trois mois plus tard. Cet article décrit les solutions technologiques qui ont été développées pour ce robot, en s'appuyant sur des concepts cinématiques et des études de dimensionnement précis.

## ABSTRACT

The BIP 2000 project aims at the realization of a biped robot with anthropomorphic locomotion functionalities, for demonstration of various walking gaits. The prototype, the study of which began three years ago, within the framework of a project involving four French laboratories, has fifteen degrees of freedom. Its dimensions and its structure of actuation are inspired by the human walker. The typical articulation was tested ; a leg structure with four dof was constructed and it worked properly ; the final legs will be ended during february 1999 and the pelvis-trunk three months later. This paper describes the technological solutions we implemented for this robot, relying on accurate kinematical concepts and dimensional studies.

**MOTS-CLES :** robot bipède, conception mécanique, agencement cinématique, mécanisme parallèle, actionneur électromécanique.

## I. INTRODUCTION

Dans la classe des robots mobiles, les systèmes à pattes, par exemple hexapodes, sont en général mieux adaptés que les systèmes à roues lorsque des obstacles doivent être franchis. Lorsque ces obstacles apparaissent dans un environnement conçu par et pour l'homme, la technologie bipodale présente la meilleure adaptabilité, car en effet, la faible emprise au sol conjuguée à la grande mobilité des robots bipèdes peuvent leur permettre de se déplacer dans des couloirs étroits et sinueux, franchir des portes et monter-descendre des escaliers. La faisabilité de réalisation de telles machines est accréditée par le niveau actuel de la technologie, particulièrement bien représenté par les avancées réalisées dans le domaine informatique. De ce fait, la communauté roboticienne internationale s'intéresse aux systèmes dits humanoïdes depuis quelques années. Au delà de leurs applications

potentielles, la conception de tels systèmes présente un intérêt évident par la nécessaire conjonction de compétences diverses qu'elle appelle : automatique, informatique temps réel, mécanique, biomécanique. Quatre équipes appartenant à des laboratoires français représentant ces diverses mouvances se sont associées en 1995 pour élaborer le projet BIP 2000 [Espiau 97], dont l'objectif est de présenter les premières démonstrations de marche d'un robot bipède à fonctions locomotrices anthropomorphes en l'an 2000. La présentation publique du robot humanoïde du groupe HONDA Motors Co, en 1997, a définitivement démontré la faisabilité d'un tel projet, tout en plaçant la barre très haut en raison de l'importance des moyens mis en oeuvre pour aboutir à cette réalisation [Hirai 97].

L'équipe « Mécanismes et Robotique » du LMS a la charge du développement technologique du prototype BIP 2000. Les solutions présentées dans cet article sont le fruit d'un processus itératif qui a permis de mettre en adéquation les caractéristiques géométriques de l'ensemble (paramètres cinématiques, masses et inerties), avec les capacités en terme de couples et de vitesses des actionneurs électromécaniques, ces capacités étant liées de façon non linéaire à la masse des actionneurs, qui représente elle-même une part importante de la masse totale. La partie II décrit la structure articulaire du bipède, à 15 degrés de liberté actifs, et présente un exemple d'étude dynamique s'y rapportant (synthèse d'un mouvement simulant la montée d'une marche d'escalier). Les mouvements des articulations sont obtenus par des actionneurs combinant des moteurs à courant continu à commutation électronique et des transmetteurs spécifiquement conçus décrits dans la partie III. Est ensuite abordée la partie concernant l'instrumentation et l'électronique, de puissance et de commande, dans l'optique de cet article, c'est-à-dire principalement d'un point de vue technologique, avec pour conséquence le calcul de la masse à embarquer. Des protocoles de tests respectant une progression pas-à-pas ont été définis. Ils sont rapportés, ainsi que certains des résultats expérimentaux obtenus, dans la partie V.

## II. STRUCTURE ARTICULAIRE

La figure 1 schématise l'agencement cinématique de la structure articulaire de BIP : 15 degrés de liberté actifs, plus 2 passifs, nous ont paru indispensables pour un marcheur sans bras ni tête. Le raisonnement est simple. En effet, le modèle plan anthropomorphe minimaliste comporte 7 corps ( 1 pelvis-tronc, 2 cuisses, 2 jambes, 2 pieds) et 6 articulations parallèles pour les mouvements de flexion-extension (2 hanches Z5 et Z10, 2 genoux Z4 et Z11, 2 chevilles Z3 et Z12). Pour l'aptitude aux changements de direction, il faut scinder le pelvis et le tronc en deux parties, les articuler autour de leur axe vertical Z15, et ajouter un degré de liberté en rotation verticale à chaque hanche, Z6 et Z9. Pour le contrôle de l'équilibre dans le plan latéral, évitant le basculement autour des arêtes du pied dans la phase de simple appui, et pour le contrôle des transferts latéraux, permettant de changer de pied pendant la phase de double appui, il faut ajouter 5 degrés de liberté, parallèles à la direction horizontale de la marche, au niveau des chevilles, Z2 et Z13, des hanches, Z7 et Z8, et des lombes, Z16. Pour rendre complètement indépendants le système locomoteur et le système d'équilibrage, il faut encore ajouter un degré de liberté entre le pelvis et le tronc, parallèlement à l'axe de flexion-extension, Z17. On parvient ainsi à un total de 15 articulations actives. Lors de la phase de double appui, la redondance est d'ordre 6. BIP est pourvu de deux avant-pieds, reliés aux pieds par des articulations passives. L'intérêt est de reconstituer une marche possédant une phase de soulever de talon, au cours de laquelle sera impulsé le pas en avant. Par rapport aux autres robots bipèdes (un état de l'art est proposé dans [Sardain 98], un aspect original de l'agence-

ment cinématique de BIP réside en la décomposition du corps principal en un pelvis et un tronc, articulés autour de la liaison à 3 ddl dite lombaire. Revenons sur les raisons justifiant ce choix. Cette liaison autorise une légère contre-rotation du tronc autour de son axe vertical, pour pouvoir stabiliser les effets dynamiques autour de cet axe durant la marche. De plus, la possibilité d'incliner le pelvis autour de l'axe de « roulis » permet d'atténuer la flexion latérale du tronc quand le centre de masse doit être déplacé latéralement, pour l'équilibration de la phase de simple support, et permet également de franchir des escaliers constitués de marches de hauteur importante.

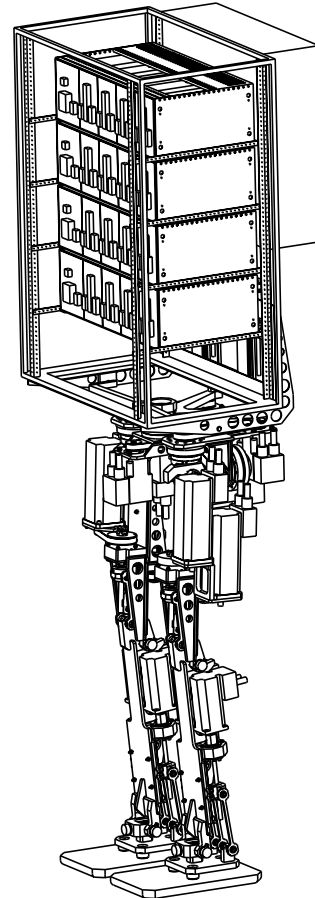
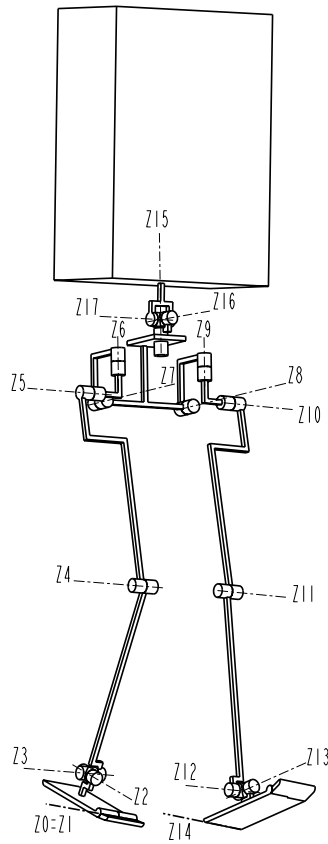


FIGURE 1 - Schéma cinématique de BIP.

FIGURE 2 - BIP vu de 3/4 avant.

Plusieurs études dynamiques de synthèse de mouvements de marche ont été effectuées avec les caractéristiques géométriques de BIP. [Sardain 98] présente une synthèse de marche passive, au cours de laquelle le mouvement de la phase de simple appui s'opère sans apport énergétique. Bien que les mouvements passifs obtenus ne présentent pas les allures anthropomorphiques requises, des résultats intéressants concernant la répartition des masses sont apparus : plus les masses des segments balancés sont hautes, plus la longueur du pas naturel est grande. [Rostami 98] présente en détail les éléments sous-tendant la synthèse de mouvements actifs. Il sont générés par optimisation sur la base d'un modèle dynamique complet. Ces études s'inscrivent dans le cadre de la théorie du contrôle optimal. La technique utilisée fait appel au principe du maximum de Pontryaguine. Les couples et vitesses présentés sur la figure 3 sont les résultats d'une synthèse de mouvement obtenue entre les positions initiale et finale de la phase de simple appui dans une montée d'escalier. Le couple articulaire no.2 est optimal pour le genou de la jambe d'appui. Sa valeur maximum est élevée : 250 Nm. La vitesse articulaire no.5 est optimale pour le ge-

nou de la jambe balancée. Sa valeur maximum est également élevée : 12 rad/s. Autrement dit, l'articulation genou doit être capable, selon la phase du mouvement considérée, de délivrer un couple élevé ou de se mouvoir à grande vitesse.

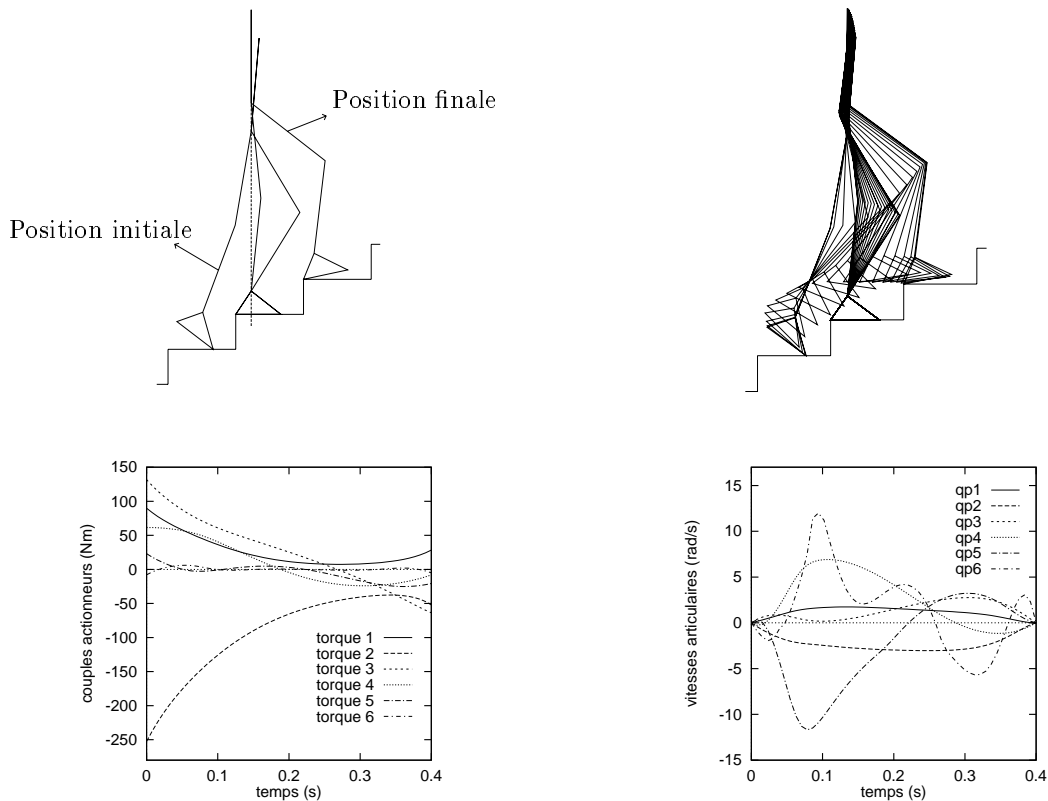


FIGURE 3 - *Synthèse d'un mouvement de montée d'escalier.*

### III. SYSTEMES DE TRANSMISSION

En ce qui concerne le choix des actionneurs et des transmetteurs, il ne s'agit pas de copier le système musculaire et tendinique de l'être humain, basé sur des rétractions antagonistes. Il faut dégager les caractéristiques intrinsèques du système locomoteur humain, puis concevoir un système mécanique présentant des fonctionnalités similaires. Codé en jargon de mécaniciens, on peut dire que le système locomoteur humain possède un bon rendement, une réversibilité quasi-parfaite, une absence de jeu et de friction, une grande précision, un avantage mécanique variable (diminuant à proximité des butées), et une grande puissance massique. Le système actionneur de BIP a été conçu en cherchant à se rapprocher de ces caractéristiques. Les moteurs sont à courant continu à commutation électronique, les transmetteurs sont des systèmes vis-écrou couplés à des systèmes bielle-manivelle, comme le montre la photo de la cuisse et du genou, figure 4. L'écrou à rouleaux satellites est inséré dans un chariot guidé en translation le long du segment. Le chariot pousse ou tire sur des biellettes qui agissent sur un bras du segment adjacent. Ce système permet d'obtenir un grand rapport de réduction (variant de 70 à 115 dans le domaine articulaire anthropométrique) pour une masse totale faible (1 kg tout compris i.e. vis + écrou + chariot + biellettes). Les caractéristiques du moteur choisi pour le genou sont : vitesse de rotation 7100 t/min, couple nominal 1.9 Nm, couple impulsionnel 5.25 Nm. Les tests réalisés montrent qu'il est possible de considérer comme couple maximal les deux

tiers du couple impulsif, soit 3.4 Nm. Ainsi, la transmission décrite ci-dessus permet d'obtenir au niveau articulaire des couples allant de 240 à 400 Nm et des vitesses allant de 6 à 10 rad/s. Les tests montrent également que l'utilisation d'écrous à rouleaux satellites de haute technologie garantit une bonne réversibilité, autrement dit le poids agissant sur le bipède est capable d'entraîner les rotors des moteurs lors des phases de flexion.

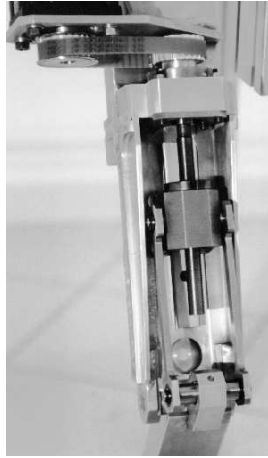


FIGURE 4 - *Genou.*



FIGURE 5 - *Cheville.*

Les rotations de la cheville autour de ses deux axes perpendiculaires  $Z2$  et  $Z3$  sont couplées et sont commandées par deux systèmes actionneurs parallèles, comme le montre la photo de la figure 5. Le principe est simple. Pied et tibia sont liés par un joint de cardan. Si les deux chariots se déplacent identiquement, alors cela provoque une flexion ou une extension autour de l'axe  $Z3$ . Sinon, le pied tourne aussi autour de l'axe  $Z2$ . Cet agencement parallèle permet de localiser les deux moteurs dans la partie supérieure du tibia, ce qui est conforme à une répartition de masse anthropométrique. Il autorise aussi la conjugaison des actions des deux moteurs, ce qui permet d'en diminuer la taille par rapport au cas où ils agiraient en série. L'inconvénient de cet agencement parallèle réside dans la complexité des modèles cinématiques. Ceux-ci sont soigneusement définis dans [Sardain 99]. Le problème cinématique direct ne possède pas de solutions analytiques. Mais, étant donnée une configuration des actionneurs, toutes les orientations possibles du pied par rapport au tibia peuvent être obtenues numériquement. Le nombre maximum de solutions est 8, chacune définissant un mode d'assemblage du mécanisme. La difficulté consiste alors à choisir la solution correspondant au mode d'assemblage réel. Quant au problème cinématique inverse, donnant la configuration des actionneurs correspondant à une orientation désirée du pied par rapport au tibia, il se résout formellement sans difficulté.

Les 5 autres articulations sont équipées de réducteurs classiques (type Harmonic-Drive): il s'agit des 3 rotations d'axe vertical  $Z6$ ,  $Z9$  et  $Z15$  permettant les changements de direction, ainsi que des 2 rotations d'axe horizontal des hanches pour les mouvements d'abduction-adduction.

Chaque jambe a une masse de 18 kg. Celle du pelvis vaut 20kg.

#### IV. INSTRUMENTATION ET ELECTRONIQUE

L'élaboration du système de contrôle-commande d'un robot aussi complexe est une tâche de longue haleine. Toutes les équipes participant au projet y contribueront. Dans ce cadre, la tâche du développeur consiste à intégrer à la mécanique tous les capteurs

proprioceptifs susceptibles d'être utiles aux différents partenaires du projet, donc à la fois des capteurs de position et des capteurs de force.

Il faut mesurer les positions instantanées (plus exactement, mesurer les positions à chaque période d'échantillonnage). Les 15 moteurs à commutation électronique possèdent par construction un codeur incrémental intégré. Ces derniers mesurent les rotations relatives du rotor par rapport au stator avec une précision de 4096 points par tour. Les positions absolues au niveau articulaire sont données par des potentiomètres placés au niveau des axes. Il s'agit de potentiomètres classiques à un tour, sauf pour les axes construits autour d'Harmonic-Drive, où des pistes résistives en quart de cercle ont été développées. Deux butées électriques de fin de course équipent chaque axe. Pour les 10 actionneurs utilisant un système vis-écrou, les butées sont placées à proximité des limites de course des chariots. Pour les cinq réducteurs Harmonic- Drive, elles sont placées entre le carter et le flasque de sortie lente. Cet inventaire conduit au bilan suivant : 15 codeurs incrémentaux, 15 potentiomètres, 30 butées électriques.

Les paires de biellettes utilisées dans les 10 articulations principales de BIP constituent un corps d'épreuve de qualité pour recevoir des jauges électriques. Mesurant l'effort transmis par ces biellettes, dans une position elle-même mesurée, on peut reconstruire le couple articulaire, aux frottements près qui apparaissent dans la chaîne de transmission entre les biellettes et l'axe d'articulation, c'est-à-dire au niveau de la liaison pivot de l'axe lui-même. Ces frottements sont réduits par l'utilisation de roulements, ce qui permet d'espérer que les mesures seront facilement exploitables. Durant la marche, le pied et la cheville jouent un grand rôle dans le contrôle des équilibres globaux. La technique dite du ZMP (Zero Moment Point) est appliquée dans le contrôle de plusieurs bipèdes, notamment celui du robot HONDA [Hirai 98]. Ce point est le point du sol par lequel passe la résultante des actions de gravité et d'inertie agissant sur le bipède. Comme le bipède n'est par ailleurs soumis qu'aux actions de contact avec le sol, c'est donc aussi le centre des pressions agissant sur la ou les semelles du ou des pieds en appui. Ainsi ce point peut être calculé en injectant positions, vitesses et accélérations dans le modèle dynamique, et il peut également être mesuré en instrumentant le pied. [Thomas 99] propose pour BIP une première solution à base de capteurs FSR (Force Sensor Resistor) disposés à l'extérieur de la semelle. Cette solution permet de déterminer la position du centre de pression et la composante normale de l'action de contact. L'inconvénient de cette technologie est qu'on ne peut procéder à cette reconstruction que lorsque le pied est en appui plan sur le sol. Or, durant la phase de reprise d'appui, le contact pied/sol s'effectue au niveau du talon, et il existe une phase au cours de laquelle le marcheur se propulse en appui sur l'avant-pied. Ces phases, même si elles sont de courte durée, semblent conditionner l'élégance et le coulé de la marche. Aussi une deuxième solution est en cours de développement pour instrumenter le pied de BIP. Elle consiste à transmettre les actions entre la semelle et la base du tibia par trois points, et de mesurer au niveau de ces trois points l'intensité des trois composantes normales transmises. Ces mesures s'effectueront par l'intermédiaire de jauges électriques. Le bilan est donc de 16 capteurs de force (10 pour les articulations, 3 par pied).

Les moteurs sont de capacités très différentes, avec un couple nominal de 0.28 Nm pour les axes verticaux et 1.9 Nm pour les genoux. Les couples impulsionsnels correspondant valent respectivement 0.66 Nm et 5.25 Nm. Les cartes servo-amplificatrices associées délivrent des courants pouvant aller respectivement jusqu'à 3 A et jusqu'à 30 A, sous une tension de 135 V. La masse de ces cartes est élevée. Cette partie de l'équipement embarqué, schématisée sur la figure 2 par quatre paniers au format 3U superposés dans

le tronc, a une masse de 35 kg.

Les algorithmes de contrôle sont exécutés sur un processeur 68040 dans un environnement de bus VME. La technologie mezzanine a été choisie pour sa compacité. Les cartes sont de type MVME et les modules d'interfaçage de type IP sur cartes porteuses. Dans une première version, pour traiter les seules informations proprioceptives, cinq cartes au format 6U sont nécessaires. Le boîtier de commande, contenant ces cartes ainsi que les alimentations, est disposé sur le tronc tel une hotte, comme le montre la figure 2. Sa masse est de 10 kg.

## V. BANCS D'ESSAIS

Des protocoles de test ont été définis de manière progressive. Le premier banc d'essai a permis de tester l'actionneur décrit dans la partie III en vitesse et en force. Il était constitué d'un bâti équipé d'une glissière d'axe vertical sous le chariot de laquelle était placée une jambe munie d'un seul actionneur situé au genou. La masse du chariot représentait la masse totale du bipède diminuée de la masse d'une jambe, 85 kg. L'ensemble du système était une chaîne fermée à 1 degré de liberté. La trajectoire imposée au moteur était sinusoïdale. Cet essai a validé les technologies utilisées, en particulier l'écrou à rouleaux-satellites et son montage. Les résultats obtenus ont mis en évidence la proportion du couple impulsif qu'il est possible d'obtenir sans mettre en défaut le servo-amplificateur : on a établi que, dans les conditions de fonctionnement de BIP, le couple maximal peut valoir les  $2/3$  du couple impulsif.



FIGURE 6 - *Photo du monopode et mouvement de flexion-extension.*

Le second banc d'essai a permis de tester l'ensemble de la jambe, en particulier l'agencement en parallèle des deux actionneurs au niveau de la cheville. Comme le montre la photo de la figure 6, la charge de 85 kg (représentant pelvis + tronc + jambe balancée) est soutenue par une jambe équipée de quatre actionneurs (deux à la cheville, un au genou et un à la hanche). L'ensemble, correspondant au bipède en équilibre sur un pied, est modélisé par une chaîne ouverte à 4 degrés de liberté. Une trajectoire de flexion-extension avec inclinaison du tronc vers l'avant a été définie de la façon suivante : mouvement sinusoïdal imposé au genou, mouvements des trois autres articulations calculés de manière à ce que le centre de masse de l'ensemble se déplace vers l'avant, comme cela apparaît sur le schéma de la figure 6, afin d'atteindre les couples maximums aux quatre moteurs en

fin de flexion, simultanément. Ce mouvement a été exécuté selon des périodes de durées différentes, de 6 secondes pour une étude quasi-statique, jusqu'à 1 seconde pour étudier les effets dynamiques. La figure 7 montrent les couples effectifs mesurés aux moteurs cheville (C1 et C2), au moteur genou (C3) et au moteur hanche (C4), dans le cas d'une période de 2 secondes. On constate que les couples développés par les deux moteurs de la cheville, C1 et C2, sont différents, ce qui s'explique par le fait que le centre de masse de l'ensemble n'est pas dans le plan médian du pied. On constate, à mi-période, lorsque le mouvement de flexion est terminé et que commence le mouvement d'extension, les effets du frottement : une brutale variation de couple est nécessaire pour inverser le sens des mouvements de rotation. Ces tests ont servi à établir les lois de frottement des actionneurs de BIP. Ils ont montré que la technologie utilisée pour les articulations (à l'origine des paliers lisses) n'était pas satisfaisante. Ils ont validé les études de dimensionnement des pièces structurales en aluminium, sauf au niveau des butées mécaniques qui étaient sous-évaluées.

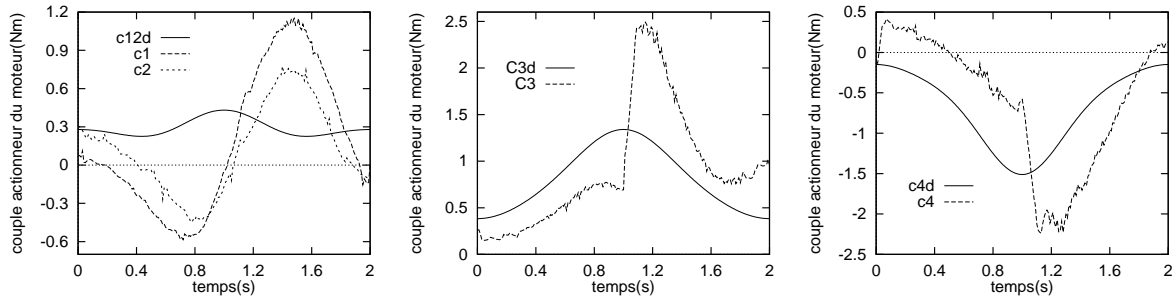


FIGURE 7 - *Couples moteurs mesurés lors du mouvement de flexion-extension.*

Un troisième banc d'essai va permettre à une version simplifiée de BIP d'effectuer ses premiers pas dans le plan sagittal. Cette version sera composée de deux jambes à quatre degrés de liberté et d'un tronc. L'ensemble sera guidé dans le plan sagittal par un chariot roulant. Les axes d'inflexion latérale Z2 et Z13 sont dans le plan sagittal, ils ne serviront qu'à poser les pieds à plat. Ainsi, on considérera un modèle à 6 degrés de liberté. Seront expérimentées sur ce banc d'essai les trajectoires obtenues par synthèse, telles que celle présentée dans la partie II.

## VI. CONCLUSION

Les partenaires du projet BIP 2000 qui se chargent des aspects informatique et automatique ont effectué plusieurs travaux en amont. Des études théoriques et expérimentales ont abouti à la modélisation de cycles naturels de systèmes mécaniques avec impacts, et des lois de commande ont été proposées. Un environnement logiciel complet permettant la spécification, la vérification formelle et la programmation temps réel automatique du contrôle-commande a été réalisé. Ils vont pouvoir implémenter leurs premières commandes sur le prototype.

Parallèlement, les mécaniciens vont poursuivre leurs recherches à caractère fondamental sur la dynamique de la marche. La modélisation dynamique du système nécessite le développement de formulations adaptées à chacune des deux phases principales de la marche.

- Phase unipodale : système en simple appui, structure cinématique arborescente. Dans ce cas, les deux approches de type dynamique inverse et dynamique directe sont à traiter,

selon qu'il va s'agir d'analyser la dynamique d'un mouvement spécifié (dynamique inverse) ou d'engendrer un mouvement optimisé sur la base d'un critère dynamique à minimiser.

- Phase bipodale: système en double appui, à chaîne cinématique fermée. Dans ce cas, on peut focaliser l'étude sur l'analyse de modèles dynamiques inverses (cinématique spécifiée), pour tirer parti de l'indétermination des efforts actionneurs articulaires et des efforts de contact pied-sol (système redondant). Le problème consiste alors à extraire une solution satisfaisant à un critère de minimisation des efforts ainsi qu'à des contraintes de bornes sur certains d'entre-eux, principalement les efforts de contact. On trouverait là une possibilité pour maîtriser les efforts de contact, sous les aspects adhérence et propulsion, qui revêtent une importance essentielle en phase bipodale, par leurs effets à la fois stabilisateurs et propulsifs.

## REFERENCES

- [Espiau 97] B. Espiau and the BIP team, *BIP: A Joint Project for the Development of an Anthropomorphic Biped Robot*, Proc. IEEE Int. Conf. on Advanced Robotics, 1997, Monterey, CA-USA (pp.267-272).
- [Hirai 97] K. Hirai, *The Honda Humanoid Robot*, Proc. IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 1997, Grenoble, France (pp.499-508).
- [Hirai 98] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa, T. Takenaka, *The Development of Honda Humanoid Robot*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotic and Automation, 1998, Leuven, Belgium (pp.1321-1326).
- [Rostami 98] M. Rostami, G. Bessonnet, P. Sardain, *Optimal Gait Synthesis of a Planar Biped*, Proc. Third IFAC Int. Workshop on Motion Control, 1998, Grenoble, France (pp. 185- 190).
- [Sardain 98] P. Sardain, M. Rostami, G. Bessonnet, *An Anthropomorphic Biped Robot: Dynamic Concepts and Technological Design*, IEEE Trans. on Systems Man and Cybernetics, Vol. 28A, No. 6, 1998 (pp. 823-838).
- [Sardain 99] P. Sardain, T. Saidouni, G. Bessonnet, *Kinematic Analysis of a Parallel Mechanism Actuating the Ankle of a Biped Robot*, Proc. Tenth World Congress on Theory of Machines and Mechanisms, 1999, Oulu, Finland (à paraître).
- [Thomas 99] E. Thomas, G. Bessonnet, *Etude et mise en oeuvre expérimentale de capteurs plantaires pour la détermination du centre de pression d'un robot bipède en vue de sa commande*, Actes du 14ème Congrès Français de Mécanique, 1999, Toulouse, France (soumis).