

Modélisation et supervision d'une cheville du Robot NAO par l'outil Bond Graph, Validation expérimentale

B.Welhazi¹, N.Zanzouri²

¹Université de Carthage, Ecole Nationale d'ingénieurs de Carthage, Tunisia

²Université de Tunis El Manar, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis,
Laboratoire Analyse Conception et Commande des Systèmes (LACS) LR 11ES20,
Box 37, Le Belvedere 1002 Tunis-Tunisia

³Université de Tunis, Preparatory Engineering Institute of Tunis
2, Rue Jawaher Lel Nahrou - Monfleury - 1089 Tunis

brahimwelhazi15@gmail.com
Nadia.Zanzouri@enit.rnu.tn

Résumé—Cet article propose une modélisation d'une cheville de robot NAO.

Vue la structure mécatronique de la cheville nous avons choisi de la modéliser par l'outil Bond Graph.

Deux modèles (structure ouverte et asservie) de la cheville sont proposés, ils sont explicités pour générer un ensemble des équations analytiques (structurelles et constitutives) utiles par l'analyse et la commande de la cheville.

Les modèles sont validés par simulation et expérimentation

Mots clés—Cheville NAO, Modélisation, Bond Graph, Simulation, Expérimentation, Supervision.

I. INTRODUCTION

La mécatronique présente un domaine de recherche très intéressant, d'exploiter les méthodes de modélisation unifiantes telles que le formalisme Bond Graph qui, en offrant plus de cohérence dans la représentation de systèmes énergétiques hétérogènes et multidisciplinaires contribue à en donner une vision globale plus claire. De plus, il est apparu que l'exploitation des propriétés causales des transferts énergétiques ouvrait des perspectives intéressantes en termes d'analyse et supervision systémique.

L'objectif de ces travaux de recherche est d'élaborer un modèle Bond graph et un modèle analytique de la cheville de robot NAO en vue de sa supervision.

Le modèle proposé est validé expérimentalement sur une cheville d'un robot installé au laboratoire.

II. CHEVILLE NAO

La cheville NAO est la cheville du robot NAO. C'est un robot humanoïde autonome, présenté par la figure 1, développé par la société française Aldebaran Robotics [1], experte pour la robotique.



Figure 1 : Robot NAO

Le robot est composé de deux chevilles (gauche et droite) identiques. Pour assurer au robot NAO des performances élevées, le constructeur a choisi de mettre en place une double articulation au niveau de sa cheville, présentée par la figure 2, alors la cheville comporte deux axes de liberté nommés :

- Axe de tangage
- Axe de roulis

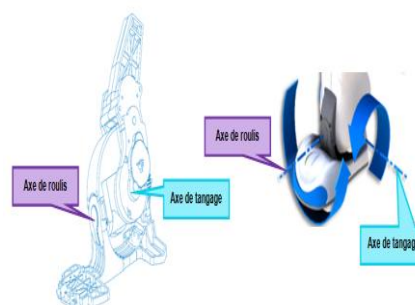


Figure 2 : Axes de la cheville

Le modèle cinématique de la cheville comporte 11 pièces et 18 liaisons. La structure de base est constituée de trois pièces : le pied, la cheville et le tibia liées par deux pivots d'axes orthogonaux : axe de roulis entre le pied et la cheville, axe de tangage entre la cheville et le tibia.

L'autre partie du mécanisme est constitué de deux réducteurs à engrenages cylindriques à denture droite, assurant la transmission de mouvement depuis le moteur jusqu'à la liaison pivot de sortie, roulis ou tangage.

La figure 3 montre un vue 3D relatif à ce modèle cinématique.

Le graphe de structure montre clairement les deux sous ensemble "Roulis" et "Tangage".

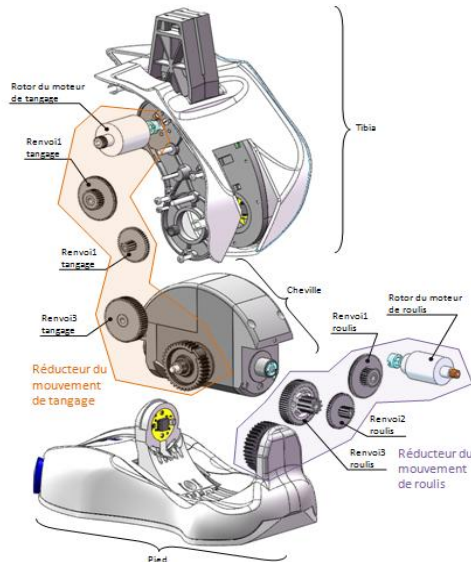


Figure 3 : Vue 3D de la cheville

La structure d'un axe (tangage ou roulis) peut être représentée par une chaîne fonctionnelle, présentée par la figure 4, constituée d'une chaîne d'énergie et d'une chaîne d'information, élaborant le déplacement du tibia pour l'axe de tangage.

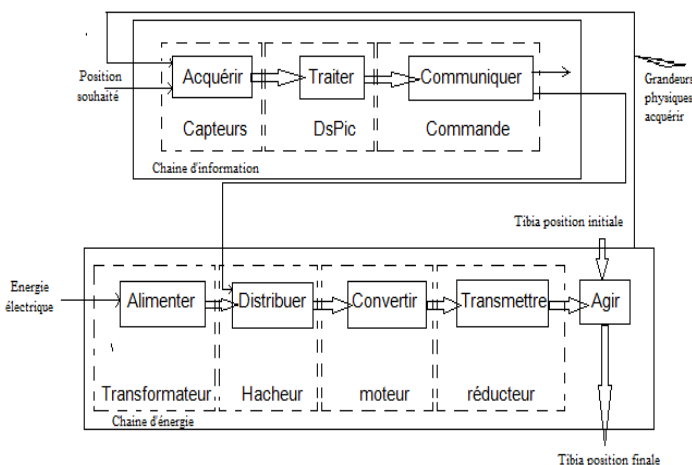


Figure 4 : Chaîne fonctionnelle

Pour mettre en place cette structure asservi, on remplace la chaîne d'information par un correcteur, la fonction de distribution par le hacheur, la fonction de conversion par le moteur et la fonction de transmission par de

réducteur, alors on obtient le schéma bloc en boucle fermée de la figure 5.

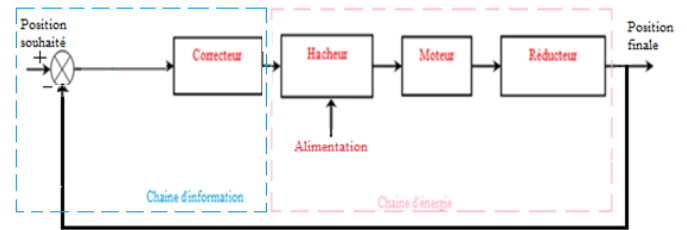


Figure 5 : Schéma bloc d'axe de tangage

III. MODELISATION ET SUPERVISION PAR BOND GRAPH DE LA CHEVILLE

Nous avons souligné précédemment que les deux axes de la cheville (roulis et tangage) sont identiques. Chaque axe de la cheville se décompose en 3 blocs principaux comme le montre le modèle bond graph à mot de la figure 6.

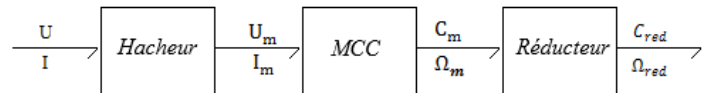


Figure 6 : Bond graph à mots de l'axe tangage (ou roulis)

Dans ce qui suit, on utilise le logiciel 20-sim [2], développé par controllab, pour modéliser notre système en graphes de liaisons et des composants physiques [3] [4] [5] afin d'obtenir un modèle validé.

Le moteur est modélisé par la résistance et l'inductance d'induit (R_m et L_m) en série du côté électrique. Du côté mécanique, nous considérons le frottement et l'inertie de l'arbre du moteur (F_m et J_m).

Un élément TF est associé à un réducteur de transmission de rapport N et de frottement F_r , le rapport de transformation de TF est $m = \frac{1}{N}$, en respectant la convention d'écriture: m est dimensionné à l'aide de la relation :

$$e_{entrée} = m e_{sortie} \text{ et } f_{sortie} = m f_{entrée} \quad (1)$$

Soit ici :

$$\Omega_r = N \cdot \Omega_{red} \text{ et } C_{red} = N \cdot C_r \quad (2)$$

Le moteur est couplé avec une charge mécanique réalisée par une inertie J_r à travers le réducteur. Le couple de charge est modélisé par une source d'effort C_{ch} .

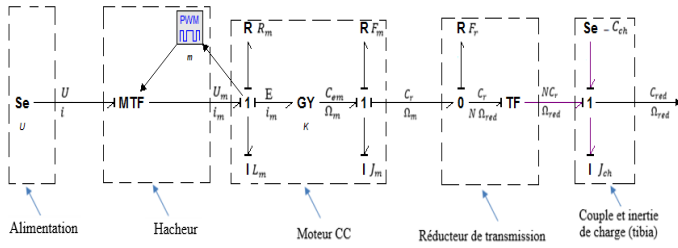


Figure 7 : Modèle en boucle ouverte de l'articulation de tantage (ou roulis)

La commande en courant est réalisée par un bloc de commande en MLI.

Le hacheur est considéré parfait sans pertes de puissance. Il permet de commander la tension et le courant d'entrée du moteur. En valeur moyenne, nous avons la relation suivante :

$$U_m = (2\alpha - 1) U \text{ où } \alpha \in [0, 1] \quad (3)$$

Le coefficient α est le rapport cyclique de hacheur, associé à la commande.

L'élément *MTF* associé au hacheur a un rapport de transformation variable $m = \frac{1}{2\alpha - 1}$ pour respecter la convention d'écriture pour le *MTF* : m est dimensionné à l'aide de la relation de l'équation (1). Soit ici :

$$U = m \cdot U_m \text{ et } I_m = m \cdot I \quad (4)$$

Sur ce bond graph non causal, de la figure 7, nous affectons la causalité et après l'implantation sous 20-sim nous obtenons le bond graph en boucle ouverte de la figure 8.

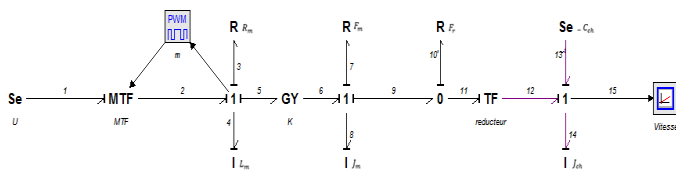


Figure 8 : Modèle BG causal de la cheville

Le vecteur d'état, noté X , est composé des variables d'énergie p et q associées aux éléments de stockage I et C .

A partir de ce bond graph causal, nous déduisons que nous avons 3 éléments de stockage :

- Inductance du moteur « L_m ».
- Inertie du moteur « J_m ».
- Inertie du charge « J_{ch} ».

Donc le système est d'ordre 3 ($n=3$), et les composantes d'état sont les suivantes :

$$x_1 = L_m f_4 \quad (5)$$

$$x_2 = J_m f_8 \quad (6)$$

$$x_3 = J_{ch} f_{14} \quad (7)$$

Les équations structurelles déduites à partir des jonctions du modèle BG sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Les équations structurelles des jonctions

Jonction	Loi
MTF	$e_1 = m e_2 ; f_2 = m f_1$
1	$f_2 = f_3 = f_4 = f_5 ; e_4 = e_2 - e_3 - e_5$
GY	$e_5 = K f_6 ; e_6 = K f_5$
1	$f_6 = f_7 = f_8 ; e_8 = e_6 - e_7 - e_9$
0	$e_9 = e_{10} ; f_{10} = f_9 - e_{11}$
TF	$e_{12} = N ; f_{11} = N f_{12}$
1	$f_{12} = f_{13} = f_{14} = f_{15} ; e_{14} = e_{12} - e_{13} - e_{15}$

Les équations constitutives déduites à partir des éléments BG sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Les équations constitutives des éléments

Élément	Loi
$S_e : U$	$e_1 = U$
$R : R_m$	$e_3 = R_m f_4$
$I : L_m$	$e_4 = L_m f_4 = x_1$
$R : F_m$	$e_7 = F_m f_8$
$I : J_m$	$e_8 = J_m f_8 = x_2$
$R : F_r$	$e_{10} = F_r f_{14}$
$I : J_{ch}$	$e_{14} = J_{ch} f_{14} = x_3$
$S_e : -C_{ch}$	$e_{13} = -C_{ch}$

A partir de ces équations, nous pouvons déduire la représentation d'état de la cheville pour l'articulation tantage (ou roulis) suivante :

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t) \quad (8)$$

$$y(t) = C \cdot x(t) \quad (9)$$

Avec :

$$x(t) = [x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T \quad (10)$$

$$u(t) = [U \quad C_{ch}]^T \quad (11)$$

La matrice d'état :

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_m}{L_m} & -\frac{K}{J_m} & 0 \\ \frac{K}{L_m} & -\frac{F_r + F_m}{J_m} & N \frac{F_r}{J_{ch}} \\ 0 & N \frac{F_r}{J_m} & -N^2 \frac{F_r}{J_{ch}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

La matrice de commande :

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{m} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

La matrice d'observabilité :

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{J_{ch}} \end{bmatrix} \quad (14)$$

A partir de ces équations d'état nous déduisons que le système est commandable et observable. Donc on peut modéliser, observer et commander le système en boucle fermée.

Pour améliorer les performances de la cheville, un correcteur PI est implémenté pour diminuer les erreurs et obtenir la sortie souhaitable. Le modèle Bond Graph de l'axe de tangage en boucle fermée est présenté par la figure 9.

Nous obtenons un angle de sortie de l'axe étudié par une intégration qui assure la transformation vitesse-angle. Pour les paramètres de PI, nous avons simulé le modèle obtenue en variant les gains de K_p et de K_i afin de déterminer les bonnes valeurs, on obtient $K_p = 1000$, $K_i = 10^{-4}$, pour une consigne d'angle de position de tangage de 25° .

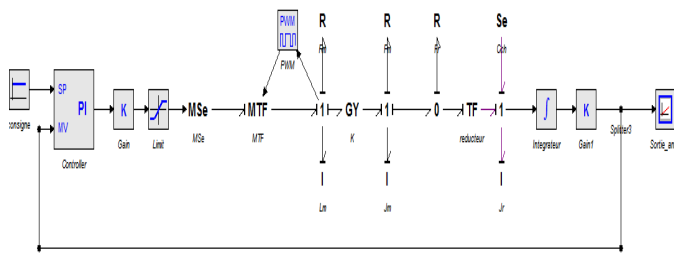


Figure 9 : Modèle en boucle fermée de l'articulation de tangage (ou roulis)

Le tableau 3 comporte les valeurs numériques des paramètres du système étudié.

Tableau 3 : Les valeurs numériques

Symbole	Valeur(unité)	Description
U	24(v)	Tension d'alimentation
Rm	$5.8 \cdot 10^{-4}$ (H)	Résistance de l'induit du moteur
Lm	$2.11 \cdot 10^{-4}$ (Kg.m ²)	Inductance de l'induit du moteur
K	0.0194	Constante électromagnétique du moteur
Fm	$2.11 \cdot 10^{-4}$ (Kg.m ²)	Frottement visqueux de l'arbre du moteur
Jm	$5 \cdot 10^{-7}$ (N.m.s.rad ⁻¹)	Inertie de l'arbre du moteur
Fr	$1.3 \cdot 10^{-3}$ (N.m.s.rad ⁻¹) [tangage] $8 \cdot 10^{-4}$ (N.m.s.rad ⁻¹) [axe de roulis]	Frottement torsionnel de la souplesse d'accouplement
N	130.8 [tangage] 201.3 [roulis]	Rapport de réduction
Jch	0.2 (Kg.m ²)	Inertie de la charge

IV. RESULTATS DE SIMULATION ET D'EXPERIMENTATION

Pour valider le modèle obtenu à la section III, nous avons comparé les résultats de simulation avec la réponse réelle de la cheville. La figure 10 présente la cheville réelle du robot NAO installé au laboratoire.

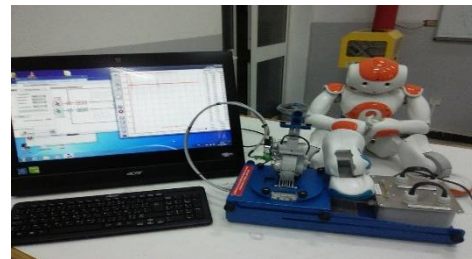


Figure 10 : Cheville réelle du robot NAO installée au laboratoire

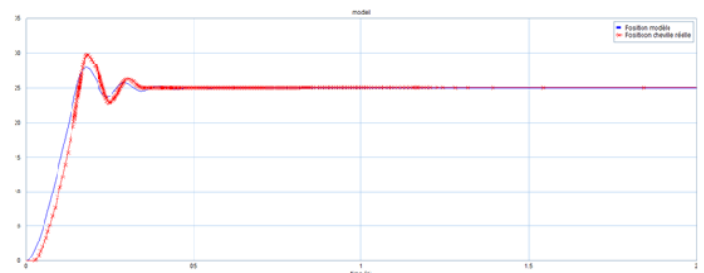


Figure 11 : Evolution des courbes de position d'axe de tangage

La figure 11 montre l'évolution de l'angle de l'axe de tangage de la cheville par simulation et expérimentale pour les mêmes paramètres de réglage du correcteur.

Les deux courbes sont assez confondues, elles ont le même régime transitoire et la même valeur pour le régime permanent avec le même temps de réponse.

On remarque que le modèle Bond Graph proposé est très rapproché au système réel. Ce modèle décompose le système en sous-systèmes connectés et respecte les transferts de puissances entre les différents éléments de la cheville.

Le système modélisé est satisfaisant en termes de précision et de rapidité. L'erreur statique est pratiquement nulle et le temps de réponse ne dépasse pas 0.3 secondes. Mais au niveau de la stabilité, on remarque des dépassements importants avant que le système atteigne son régime permanent.

Cette instabilité (dépassements) est l'image de la commande au niveau de la vitesse, où l'accélération et le freinage ne fonctionnent pas d'une façon suffisante pour que le système soit parfaitement stabilisé. Pour améliorer les performances de stabilité de la cheville, et puisque les composantes de l'état (courant moteur I_m , la vitesse moteur Ω_m et la vitesse du réducteur Ω_{red}) du système sont accessibles à la mesure, on pourra envisager pour des futurs travaux une commande par retour d'état de l'axe de tangage pour assurer une meilleure stabilité, précision et rapidité de la cheville.

V. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons proposé un modèle Bond Graph de la cheville NAO. Ce modèle est validé expérimentalement sur une cheville réelle du laboratoire.

Nous avons souligné l'importance et l'intérêt d'un formalisme unifiant tel que le Bond Graph dans le cadre de la modélisation des systèmes mécatroniques. Cette méthodologie permet de modéliser, de manière homogène, les systèmes multidisciplinaires (« électrique-mécanique » dans notre cas). Couplée aux possibilités offertes en termes d'analyse par le Bond Graph et la notion de causalité, cette vision unifiante facilite l'approche "système" de conception. Ce travail nous a permis d'envisager dans les futurs travaux de recherche l'étude des algorithmes de surveillance et de commande tolérante aux défauts de la cheville, et d'étendre la modélisation aux autres articulations du robot.

REFERENCES

- [1] Robot NAO, ERO.
Rapport Technique Aldebaran Robotics,
<http://www.aldebaran-robotics.com>.
- [2] 20-sim support.
<http://www.20-sim.com>
- [3] G. Dauphin-Tanguy.
"Les bond graphs et leur application en mécatronique," *Techniques de l'Ingénieur : Informatique Industrielle, Automatique*, S 7 222, Paris, 1999
- [4] G. Dauphin-Tanguy.
Les Bond Graphs, édition Hermès, Paris, 2000.
- [5] D. Karnopp, D. Margolis, R. Rosenberg.
System Dynamics : Modeling and Simulation of Mechatronic Systems, John Wiley & sons, 2000 (3rd edition).
- [6] P. Coiffet,
La robotique principes et applications.
3^{ème} Editions, Editions hermès Paris 1992.