NAO, un robot bien chevillé

PHILIPPE DUBOIS, CÉDRIC GAMELON [1]

Initialement imaginé pour tenir compagnie au grand public, ce robot humanoïde capable de marcher et de parler huit langues part à la conquête de nos salles de TP.

mots-clés
équipement didactique, post-bac, travaux pratiques

La robotique humanoïde est un projet qui a connu de très forts développements ces dernières années. Après des premiers essais peu concluants, les robots ont atteint des performances remarquables, mais à un coût unitaire extrêmement élevé et donc non industrialisable.

En France, la société Aldebaran Robotics a mis en œuvre un programme de développement de robot humanoïde autonome au coût limité et industrialisable. Quelque cent cinquante ingénieurs de tous domaines scientifiques ont travaillé pendant près de dix ans à mettre au point un petit robot humanoïde ayant les capacités de parler, de répondre à des questions, de reconnaître un être humain ou un objet, de se lever, de marcher : en somme, d'interagir avec l'homme. Cette société a démontré son savoir-faire en commercialisant le robot NAO de 60 cm 1. Elle travaille actuellement sur le projet d'un autre robot humanoïde appelé ROMEO, qui mesure environ 1,50 m et pèse 40 kilos. Il est essentiellement destiné à l'aide à la personne.

La marche, un problème complexe

La locomotion est une des problématiques majeures de la robotique humanoïde. Recréer la marche nécessite un nombre important de degrés de libertés et de multiples capteurs. Un robot NAO possède par exemple 25 degrés de libertés, 32 capteurs à effet Hall, un gyroscope et un accéléromètre. Les matériaux utilisés sont variés et permettent d'atteindre les exigences en termes de rigidité et de poids, dans des coûts maîtrisés. L'acier fritté, les polyamides à 30 % de fibre de verre ou à 50 % de fibre carbone, l'ABS permettent d'obtenir un robot d'environ 5 kilos.

L'architecture informationnelle du robot est construite autour d'un processeur de type PC. Chaque articulation remonte au processeur, via un bus cadencé à 10 ms, les informations nécessaires à la locomotion. Par ailleurs, afin d'obtenir les performances de fluidité, de souplesse et de stabilité, les articulations les plus importantes sont dotées d'une carte électronique spécifique qui gère leur vitesse et position, grâce à un double asservissement. La cadence de cette carte est inférieure à la milliseconde.

[1] Enseignants CPGE PT lycée La-Martinière de Lyon (69).

1 Le robot NAO

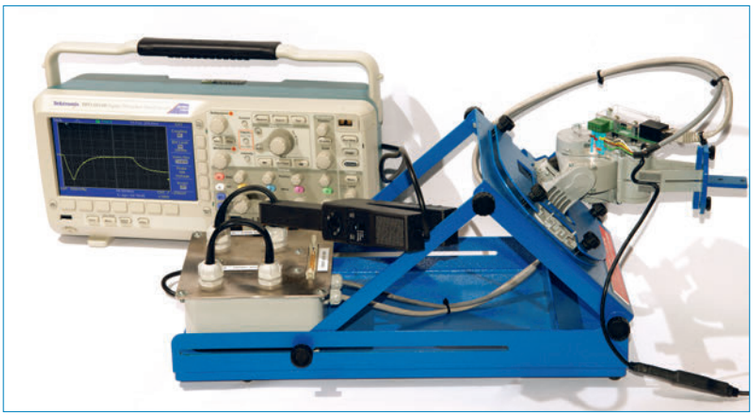
Les informations exportables du robot lors de la locomotion sont très nombreuses : vitesses de rotation d'une articulation, position, température, intensité et tension moteur, etc. Cependant, le processeur n'ayant ces informations « que » toutes les 10 ms, il n'est pas possible de travailler finement sur le comportement d'une articulation. Industriellement, cette cadence est suffisante, mais, pédagogiquement, il est nécessaire d'obtenir des informations plus rapidement pour analyser la commande. Par ailleurs, cette commande comporte des sécurités qui évitent des défaillances globales du robot et permettent de protéger ses actionneurs et articulations. L'ensemble de ces sécurités sont trop contraignantes pour étudier une commande d'axe. Le robot n'a d'ailleurs pas été conçu pour cela.

Le produit pédagogique « Cheville NAO »

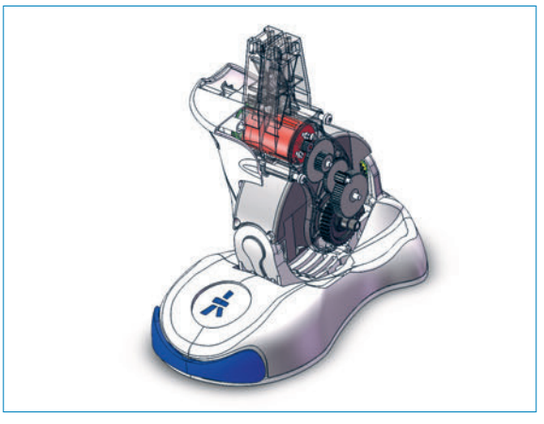
Les comportements des articulations de chevilles du robot ont une influence directe sur sa stabilité. D'un point de vue pédagogique, il est donc intéressant d'étudier avec précision l'ensemble de ce type d'articulation, qui comporte deux axes asservis par cheville. Pour cela, il faut accéder aux informations locales de la carte spécifique d'une cheville et s'affranchir au moins partiellement des sécurités présentes sur le robot complet. Il ne suffit donc pas d'extraire une partie du robot, mais il faut développer un nouveau produit, ce qui a été possible grâce à la collaboration étroite de trois acteurs :

– l'entreprise Aldebaran, qui a modifié en profondeur sa conception pour permettre le retour sur PC des informations disponibles au niveau de la cheville et qui a apporté son expertise sur la commande d'axe ;

– une équipe d'enseignants, qui a développé le cahier des charges pédagogique du produit didactisé et qui a tenu le rôle de chef de projet ;



2 Cheville didactisée en fonctionnement



3 Moteur et train d'engrenage de l'axe de tangage

– ERM Automatismes Industriels, qui a développé l'industrialisation, la commercialisation et le service après-vente du produit didactisé **2**.

Ce projet pédagogique s'est déroulé sur trois ans, depuis les premières démarches et la réalisation des premiers produits didactisés appelés « Cheville NAO ».

Le squelette de la cheville NAO, composé d'un tibia, d'un pied et d'une pièce intermédiaire, a une structure mécanique en PA66 chargé avec 30 % de fibres de verre, ce qui lui permet d'avoir une résistance mécanique relativement élevée (100 MPa environ) pour une densité de 1,3.

Deux moteurs coreless à courant continu alimentés par un hacheur sous une tension maximale de 18 V assurent la motorisation. À vide, ils peuvent tourner à environ 8 000 tours par minute, ce qui nécessite une transmission qui réduit fortement la vitesse. Les deux axes sont légèrement différents, puisque celui de roulis (c'est-à-dire l'axe qui permet au robot de se balancer de droite à gauche) possède un réducteur de rapport de 200, alors que celui de tangage (c'est-à-dire l'axe qui permet au robot de se balancer d'avant en arrière) a un rapport de 130 **3**.

Ces deux réducteurs sont réalisés par des engrenages de trains simples dont les pignons (en acier fritté ou en PA66 fibré avec 50 % de fibres de carbone) sont guidés directement sur des arbres en acier inoxydable. Le carbone permet d'obtenir, à un coût relativement réduit, des pignons dont la résistance mécanique est proche de celle d'un acier, mais avec la densité du plastique. Deux capteurs par axe, l'un placé sur l'arbre moteur et l'autre à la sortie du réducteur, mesurent des positions angulaires. Ce sont des capteurs magnétiques sans contact MRE AS5045, issus du domaine automobile. Ils fonctionnent sur la mesure du champ magnétique créé par un aimant permanent installé sur la partie mobile. Cette technologie permet d'avoir une résolution de 9/100 de degré. L'ensemble du produit est placé sur une embase permettant d'orienter la cheville dans toutes les positions et de lui connecter des instruments de mesures externes.

Une attache spécifique permet de solliciter le tibia avec différents composants : tiges rigides ou lame souple et différentes masses.

Enfin, une interface intuitive a été développée pour minimiser le temps de prise en main du produit et pour permettre de gérer toutes les mesures sur la cheville NAO, tout en laissant une grande liberté à l'élève **4**.

L'asservissement de position

La cheville peut être pilotée soit en commande directe non asservie, soit en commande asservie :

– la commande directe, donc sans retour capteur, peut se faire en boucle ouverte, en envoyant une consigne angulaire passant par le correcteur, ou directement en alimentant le moteur avec une tension en créneaux appelée PWM (*Pulse Width Modulation*) ;

– la commande asservie peut être réalisée par une mesure de la position via le capteur en sortie du

Aldebaran Robotics

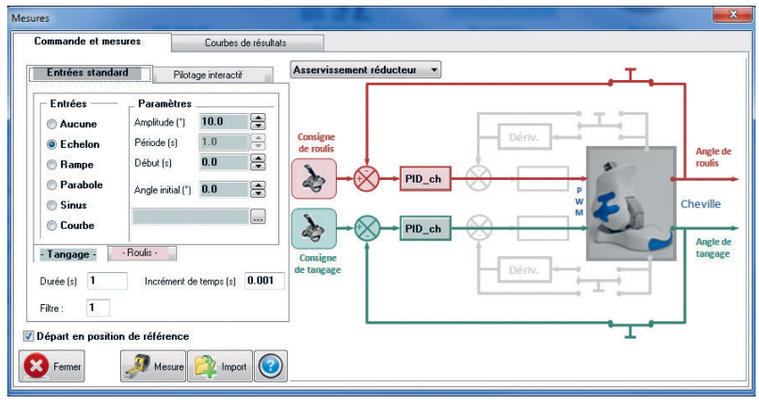
Fondée en 2005 par Bruno Maisonnier, cette société française de robotique fait partie des leaders mondiaux de la robotique humanoïde. Elle a développé plusieurs modèles de robots : NAO, tourné vers la programmation, l'enseignement et la recherche ; ROMEO, destiné à l'aide aux personnes ; Pepper réservé aux relations clients ou usagers.
La société par actions simplifiée (SAS) est actuellement détenue à 95 % par l'opérateur télécoms japonais SoftBank et dirigé par Fumihide Tomizawa, actuel président de la branche robotique de SoftBank.

réducteur – c'est l'asservissement le plus proche de la réalité du robot –, via le capteur sur l'arbre moteur, ou encore en réalisant une double boucle d'asservissement via les deux capteurs. L'information « vitesse » est ensuite obtenue par dérivation de la position. Les consignes de position peuvent être de type : échelon (changement de position brutal), rampe (changement de position progressif), sinusoïde (alternance de positions opposées, balancement), ou toute autre forme de courbes.

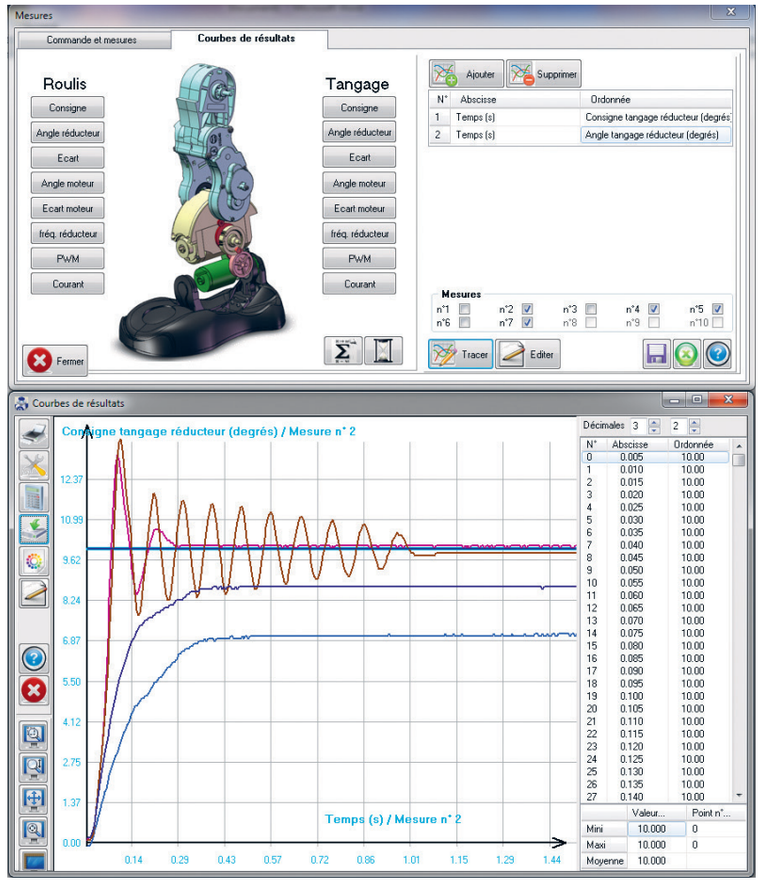
Les informations directement disponibles sur l'interface sont enregistrées à une cadence d'environ 1 ms sur chaque axe : la consigne, l'angle en sortie du réducteur (appelé angle réducteur), l'écart entre la consigne et l'angle réducteur, l'angle au niveau du moteur (angle moteur), la vitesse de rotation du réducteur (fréquence réducteur) et le courant moteur. Cette dernière mesure est réalisée par un shunt qui n'a la capacité de mesurer le courant que dans les phases motrices d'utilisation. La mesure de l'intensité dans toutes les phases de fonctionnement (c'est-à-dire dans les quatre quadrants de fonctionnement du moteur) peut se faire à l'aide d'un oscilloscope et d'une pince ampèremétrique directement sur les fils d'alimentation des moteurs. Des boucles de fils électriques alimentant ces derniers ont été spécialement aménagées sur le produit pour permettre une mesure facile.

L'interface permet de tracer des courbes d'évolution de toutes ces grandeurs en fonction du temps ou en fonction des unes et des autres **5**. Les mesures obtenues peuvent être filtrées numériquement. Les valeurs maximales et minimales, les valeurs moyennes et toutes les valeurs de mesure sont disponibles. Un export vers un tableur est aussi possible pour faire un post-traitement. Une maquette numérique industrielle de la cheville, très détaillée, sous la forme d'un modèle volumique SolidWorks, a été fournie directement par Aldebaran et a servi au développement du robot NAO. Afin de permettre la simulation du comportement global de la cheville, une réflexion pédagogique a abouti à la construction de deux modélisations multiphysiques, l'une réalisée sous MATLAB et l'autre sous SinusPhy.

Les exploitations pédagogiques sont aujourd'hui utilisées essentiellement en classes préparatoires aux grandes écoles (CPGE) et en premières et terminales S-SI. L'activité développée ci-après a été présentée en CPGE dans la filière physique et technologie, sous la forme de travaux pratiques (TP).



4 Choix de la consigne (à gauche), réglage de l'asservissement (à droite)



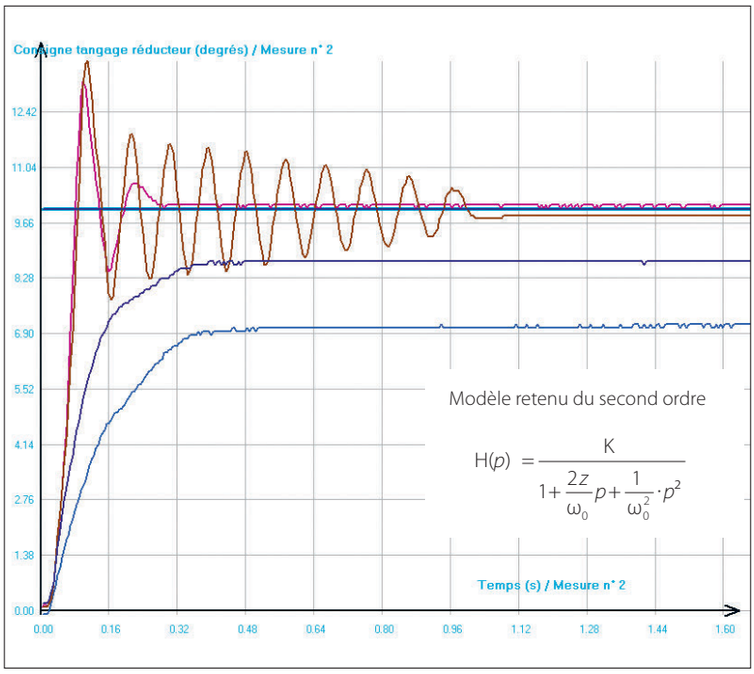
5 Choix des grandeurs à tracer et exemple de courbes

La séquence pédagogique en CPGE

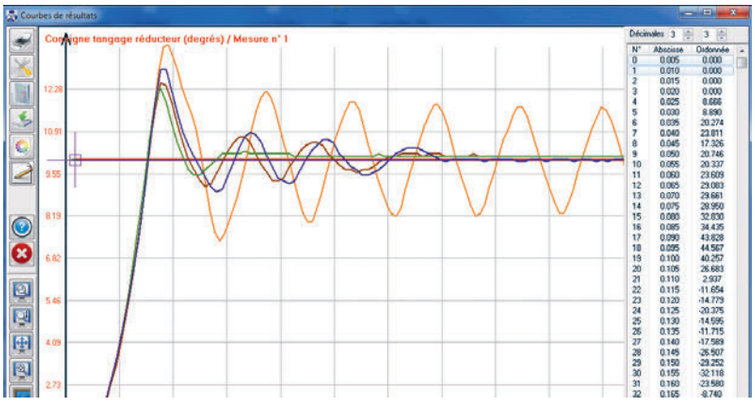
Les TP sont utilisés en seconde année de classe préparatoire. Ce type de support se prête aussi bien à l'organisation « classique » qu'à l'organisation en îlots. Là où l'organisation en centre d'intérêt demande des énoncés très détaillés (les élèves répondent aux questions les unes après les autres selon une démarche prédéfinie), l'organisation en compétences, qui se traduit physiquement par des îlots, amène une problématique plus générale : par exemple « Optimiser un correcteur PID pour répondre aux exigences d'un cahier des charges ». Les consignes tiennent sur une seule page.

Dans cette organisation, les élèves sont plus actifs dans leur apprentissage. Cela permet d'aborder également la compétence « Communiquer » lors de la restitution à la classe. La séquence se déroule sur 2, voire 3 TP.

La problématique posée est de caractériser les performances de la chaîne d'énergie et de la chaîne



6 Évolution de l'angle de tangage pour différents gains proportionnels



7 Évolution de l'angle de tangage pour différentes valeurs du gain intégral

d'information par des mesures sur la cheville du robot didactisée. Ces mesures sont effectuées directement à partir du logiciel de commande et de visualisation.

La première partie de ce TP s'attache à la mise en évidence des performances de l'axe de tangage du système en réponse à un échelon. Les mesures se font à partir d'une analyse temporelle en boucle fermée. Les critères d'évaluation de la performance d'un système asservi sont la rapidité, caractérisée en CPGE par le temps de réponse à 5 %; la précision, caractérisée par l'erreur en régime établi (erreur statique); et enfin la stabilité, caractérisée en boucle fermée par le nombre d'oscillations du système avant son arrêt, tous trois en réponse à un échelon dans le domaine temporel. La stabilité est aussi couramment évaluée en boucle ouverte par la marge de gain et la marge de phase en réponse à une sollicitation fréquentielle (sinusoïdale).

Le point délicat concerne le rôle d'une fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) et d'une fonction de transfert en boucle fermée (FTBF). On analyse un diagramme de Bode en boucle ouverte (BO) pour conclure sur la stabilité en boucle fermée (BF).

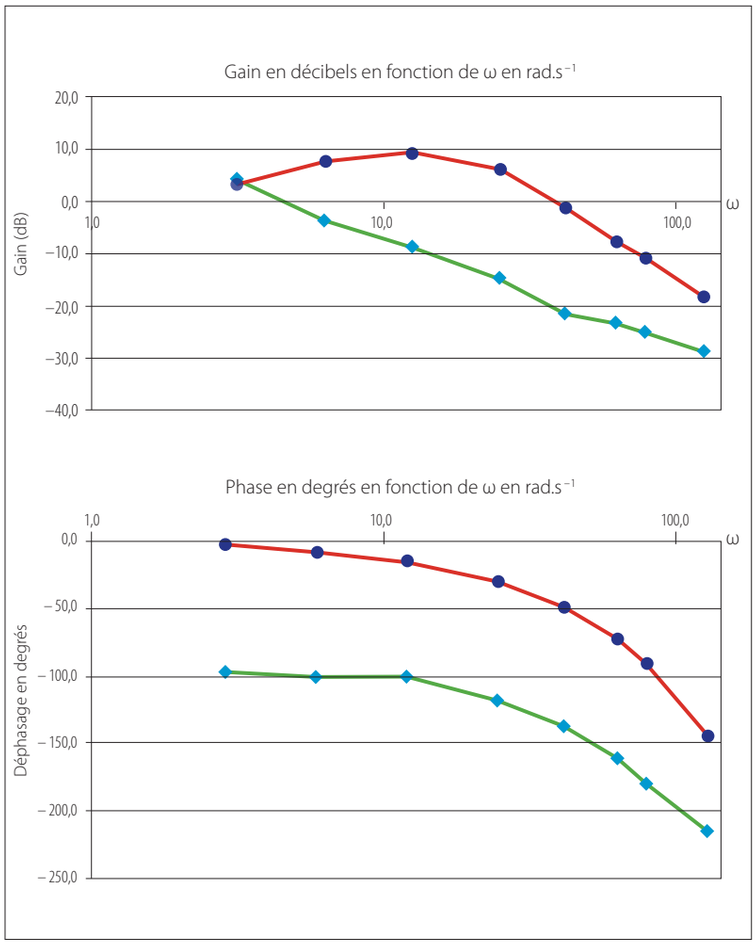
L'objectif de cette première partie est de mesurer l'influence de chaque paramètre du correcteur, c'est-à-dire l'influence du gain proportionnel et du gain intégral. Il n'est en effet pas possible de travailler avec un dérivateur pur qui fait apparaître beaucoup de bruit et créer un retard entraînant l'apparition très rapide d'instabilité.

La première série de mesures s'effectue en agissant sur le gain proportionnel (les gains du dérivateur et de l'intégrateur étant nuls). Le système est soumis à une entrée de type échelon (de 10°). La valeur du gain proportionnel est augmentée à chaque mesure. Les résultats obtenus sont présentés **6**. Les conclusions résultant de cette première série de mesures sont les suivantes : la précision et la rapidité du système augmentent lorsque le gain proportionnel augmente, cependant la stabilité diminue (le nombre d'oscillations augmente). La réponse du système peut être associée à la réponse d'un système modélisé par une fonction de transfert du second ordre. L'identification de cette fonction de transfert (c'est-à-dire l'identification des paramètres caractéristiques d'une fonction du second ordre) est une activité élève. À la fin de cette première série de mesures, l'élève conclut sur la pertinence de ce modèle et essaie de prévoir le comportement global de la cheville en fonction des trois paramètres qu'il a identifiés : la pulsation propre (ω_0), le coefficient d'amortissement (z) et le gain statique (K).

Une deuxième série de mesures permet de mesurer l'influence d'un gain intégral sur le système, les résultats obtenus sont présentés **7**. L'objectif principal de ce correcteur est d'améliorer la précision du système, mais son inconvénient est d'augmenter le risque d'instabilité. L'analyse des mesures doit permettre d'illustrer ce comportement. Les mesures mettent en évidence que la visée, ici 10°, est atteinte, mais que le nombre d'oscillations est en augmentation, c'est-à-dire que la stabilité est moins bonne.

L'analyse de l'influence du correcteur peut se faire également en faisant une analyse fréquentielle du système. Le principe des mesures effectuées dans ce cadre est d'exciter la cheville non asservie (en BO) avec des consignes de positions sinusoïdales de différentes fréquences. La période de ces sollicitations sinusoïdales est comprise entre 2 s et 0,05 s. La réponse du système à une entrée sinusoïde est une sinusoïde de période identique à la période d'excitation, mais d'amplitude différente (gain supérieur ou inférieur à 1) et en retard (déphasage) par rapport à la sinusoïde d'entrée. C'est le résultat attendu d'un système causal.

L'objectif de la troisième série de mesures est de tracer expérimentalement des diagrammes de Bode



8 Diagramme de Bode – Gain en décibels (en haut) déphasage en degrés (en bas)

pour pouvoir conclure selon les correcteurs choisis sur la stabilité du système en BO. La construction d'un diagramme de Bode expérimental permet de matérialiser une notion relativement abstraite, mais aussi d'aborder expérimentalement la notion de stabilité par une entrée autre que l'échelon. L'analyse d'un diagramme de Bode expérimental est nécessairement fondée sur la notion d'écart entre les réponses du système issues de la mesure, représentées ici par le diagramme de Bode, et les résultats d'un modèle que sont les résultats classiques connus de l'élève pour des modèles dont la fonction de transfert est d'ordre un ou deux, avec ou sans retard.

L'analyse de ces écarts permet à l'élève de progresser dans sa compétence à concevoir des modèles pertinents, c'est-à-dire de remettre en cause les choix qu'il a faits. Cela lui permet aussi d'identifier les limites des modèles simples qu'il connaît.

Les deux courbes des diagrammes de Bode obtenus 8 correspondent à deux correcteurs différents (gain proportionnel en vert et gain dérivé en rouge). Les réflexions menées par l'élève doivent s'articuler autour des notions de « marge de phase », « marge de gain », de l'effet des trois correcteurs PID et des liens entre réponses temporelles et fréquentielles. En modifiant les coefficients des correcteurs, l'élève comprend l'influence de chacun et appréhende la complexité du réglage de ces paramètres. Dans l'exemple présenté, l'utilisation d'un correcteur dérivé « remonte » la phase de 90° environ, augmentant ainsi la « marge de phase » et améliorant la stabilité. La démarche de réglage d'un correcteur PID n'est pas aux programmes des CPGE. Cependant, par « tâtonnements », l'élève obtient souvent un réglage satisfaisant vis-à-vis des critères fixés par le cahier des charges. La pertinence du gain proportionnel le conduit généralement à essayer de maximiser la valeur de ce coefficient, ce qui l'amène à constater sur le diagramme de Bode que les marges de stabilité diminuent. L'élève observe que la valeur du coefficient du gain pour laquelle la cheville devient instable sur le diagramme de Bode est la même (aux erreurs de mesures près) que pour une sollicitation par un échelon. Ce lien relativement théorique qui est fait de manière mathématique par la décomposition en série de Fourier sur un modèle d'asservissement linéaire continu invariant est parfaitement illustré par ces manipulations.

L'activité proposée aux élèves amène à construire un modèle numérique sous Scilab ou MATLAB. Après avoir constaté des écarts entre les résultats obtenus par la simulation et par la mesure, il reste à en déterminer les causes. La réponse la plus courante est « à cause des frottements », alors que l'écart peut venir de saturations, de la non-linéarité (influence du poids par exemple) ou encore du retard (temps de calcul et de communication PC-cheville).

À tout instant, l'élève doit confronter ses savoirs dans le domaine de l'asservissement, ses compétences à concevoir des modèles et à en exploiter les résultats et ses compétences à expérimenter. Sur la cheville, comme dans tous TP, les allers-retours permanents entre la réponse d'un système et les résultats de modèles pourtant relativement simples permettent de structurer l'apprentissage de futurs ingénieurs. ■

NAO en quelques chiffres

Dimensions H 574 × P 275 x L 311 mm
Poids 5,4 kg
Matériaux ABS-PC/PA-66/XCF-30
input 100 to 240 Vac – 50/60Hz – Max 1.2A
Batteries Lithium-Ion 21.6V/2.25
Autonomie de 60 à 90 min
Connexion Ethernet et wifi
2 enceintes de 2 W et 4 microphones
2 Infra rouges,
2 émetteurs et 2 récepteurs à ultrasons
1 Gyromètre et 1 accéléromètre
2 caméras de 1,22 MPixels
2 moto-réducteurs à la tête, 6 aux bras, 6 aux jambes