

MODELISATION D'UN SYSTEME EN BOUCLE FERMEE

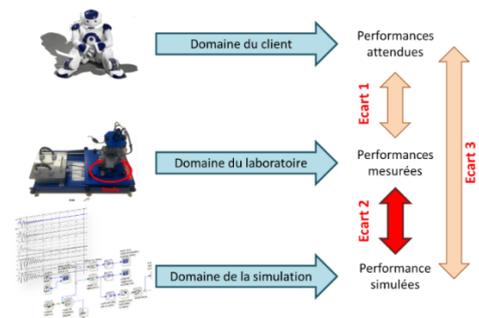
CHEVILLE NAO

BINOME - 2 SEANCES DE TP

1 OBJECTIFS DU TP

Les objectifs de ces deux séances de TP sont :

- de réaliser l'analyse structurelle du système ;
- de vérifier les exigences du cahier des charges ;
- de réaliser une identification temporelle du système en boucle fermée ;
- de réaliser une identification fréquentielle du système en boucle fermée ;
- de modéliser un correcteur numérique (temporel et fréquentiel)
- de comparer la réponse temporelle, l'identification temporelle et fréquentielle en utilisant **Python ET Matlab**.
- de réaliser un poster de synthèse.



2 DEROULE DES ACTIVITES

Activité 1 : Analyser le système

- Réaliser une analyse structurelle du système. La chaîne fonctionnelle sera détaillée (chaîne d'énergie et chaîne d'information).
- Détailler le fonctionnement de chacun des composants.
- Observer les exigences du cahier des charges.
- Réaliser une synthèse.**

Activité 2 : Modèle de comportement (identification temporelle)

- Dans les conditions que vous aurez choisies, réaliser une réponse indicielle en s'assurant que la commande du système ne sature pas (choix des valeurs de l'échelon, choix éventuel de paramètres des correcteurs).
- Réaliser une identification du comportement du système en boucle fermée.
- Réaliser une synthèse (en précisant notamment le protocole expérimental).**

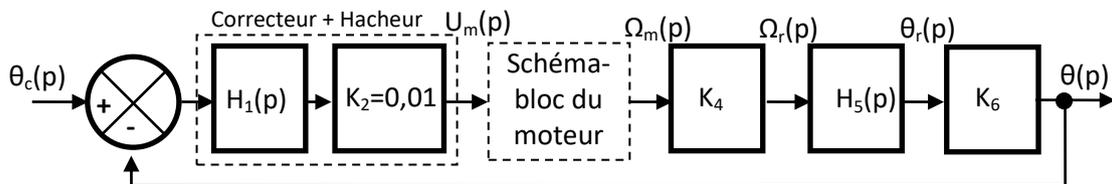
Activité 3 : Modèle de comportement (identification fréquentielle)

- Dans les conditions que vous aurez choisies, réaliser une réponse harmonique (sinus de différentes fréquences) en s'assurant que la commande du système ne sature pas (choix des valeurs de l'échelon, choix éventuel de paramètres des correcteurs).
- Réaliser une identification du comportement du système en boucle fermée.
- Réaliser une synthèse (en précisant notamment le protocole expérimental).**

Activité 4 : Modèle de connaissance (FT)

- Déterminer les valeurs des différents blocs
- Calculer la fonction de transfert en Boucle Fermée de votre système et la mettre sous forme canonique.

Le tibia est mis en mouvement par rapport à la noix par l'intermédiaire d'un moteur courant continu suivi d'un réducteur. Un capteur angulaire de gain K_{mes} ($K_{mes} = 1V/^\circ$) au niveau de l'axe de tangage permet de mesurer la rotation du tibia par rapport à la noix. Le moteur est piloté en tension par un hacheur situé à l'intérieur de la carte de commande embarquée dans la cheville. La carte traite les informations transmises par le capteur et élabore à l'aide d'un correcteur la consigne pour piloter le hacheur.



Avec :

- $\theta_c(p)$: Angle de consigne ($^\circ$)
- $U_m(p)$: Tension de commande du moteur (V)
- $\Omega_m(p)$: Vitesse de rotation arbre moteur (rad/s)
- $\Omega_r(p)$: Vitesse de rotation arbre réducteur (rad/s)
- $\theta_r(p)$: Position angulaire axe de tangage (rad)
- $\theta(p)$: Position angulaire axe de tangage ($^\circ$)

MODELE DE CONNAISSANCE DU MOTEUR :

On s'intéresse au moteur courant continu de l'axe de tangage dont on donne le modèle de connaissance.

$$u_m(t) = e(t) + R \cdot i_m(t) + L \cdot \frac{di_m(t)}{dt}$$

(Loi d'Ohm)

$$e(t) = K_e \cdot \omega_m(t)$$

(Equation de l'électromagnétisme)

$$J \cdot \frac{d\omega_m(t)}{dt} = C_m(t) - f \cdot \omega_m(t)$$

(Equation de la dynamique de l'arbre moteur)

$$C_m(t) = K_t \cdot i_m(t)$$

(Equation de l'électromagnétisme)

Avec :

- $u_m(t)$ = Tension du moteur [V]
- $e(t)$ = Force contre électromotrice du moteur [V]
- $i_m(t)$ = Intensité dans le moteur [A]
- $C_m(t)$ = Couple exercé par le moteur [N.m]
- $\omega_m(t)$ = Vitesse angulaire du moteur [rad/s]

$R = 5,4 \Omega$ = Valeur de la résistance

$K_e = 0,0194 \text{ V}/(\text{rad/s})$: Coefficient de la force contre électromotrice

$J = 1 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$: Inertie équivalente ramenée sur l'arbre moteur

$K_t = 0,0194 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{A}$: Constante de couple

$L = 0,6 \text{ mH}$: Inductance

$f = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$: Coefficient de « frottement visqueux total »

Une saturation en courant dans le moteur (saturation de $\approx 0,8 \text{ A}$ pour ce modèle) permet de limiter le courant aux bornes du moteur.

MODELE DE COMPORTEMENT DU REDUCTEUR :

Effectuer 3 essais ayant pour consigne un échelon de position de -20° par rapport à la position tibia perpendiculaire à la semelle de la cheville (pour cela, entrer la valeur adéquate comme « Angle initial ($^\circ$) » dans l'interface d'acquisition), déterminer le rapport de réduction expérimental entre l'angle du moteur de tangage θ_m (en $^\circ$) et l'angle en sortie de réducteur θ_r (en $^\circ$).

Activité 5 : Résolution

- En utilisant **Python**, réaliser sur la même figure la réponse expérimentale et la réponse issue du modèle. Utiliser l'annexe sur python et le fichier fourni pour vous aider dans vos tracer ...
- En utilisant **Matlab**, réaliser sur le même figure la réponse du modèle de comportement identifié à l'activité 3 et la réponse issue du modèle de connaissance de l'activité 4.

Activité 6 : Modèle de comportement – Identification temporelle de la Boucle ouverte

- Dans les conditions que vous aurez choisies, réaliser une identification temporelle ET fréquentielle du système en boucle ouverte.
- Réaliser une synthèse (en précisant notamment le protocole expérimental).**

3 SYNTHÈSE**Activité 7 : Synthèse**

- Réaliser un poster de synthèse. Devront figurer :
 - le cahier des charges ;
 - la comparaison modèle-réel :
 - comparaison des différents modèles en BF ;
 - comparaison du modèle en BO bouclé et de la BF.
 - la quantification des écarts ;
 - l'explication des écarts ;
 - les limites d'une telle modélisation.

Mise en Œuvre de la Cheville NAO du Laboratoire

A - MISE EN MARCHÉ :

- Lancer l'interface de pilotage/acquisition sur l'ordinateur en



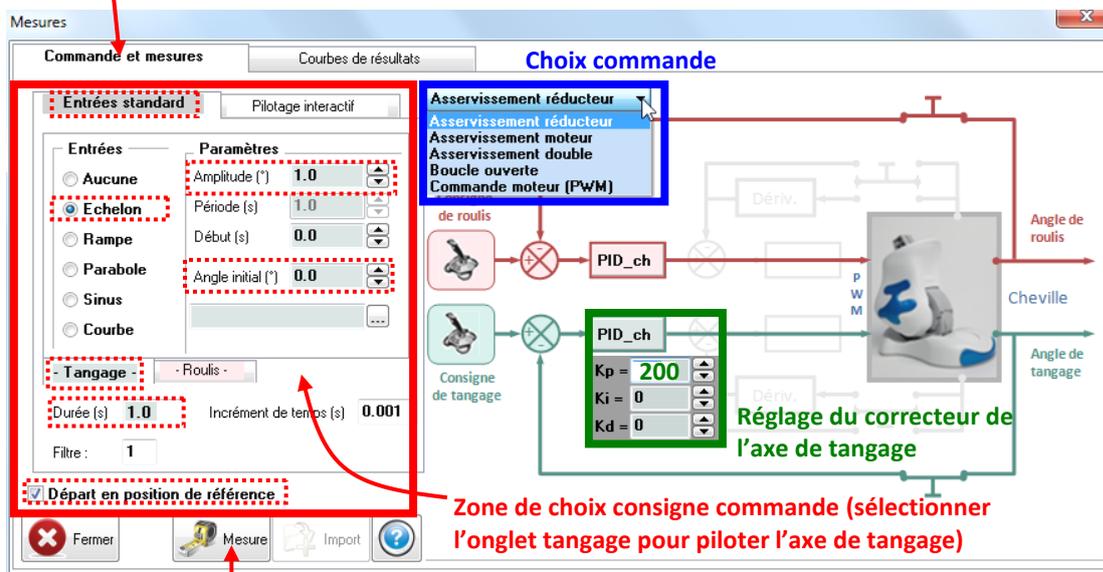
cliquant sur

- La fenêtre ci-contre s'ouvre. Cliquer sur l'icône « Réalisation de mesures », la fenêtre ci-dessous apparaît. Pratiquement toutes les fonctionnalités de la cheville sont accessibles depuis cette nouvelle fenêtre, on pourra commander tous les mouvements de la cheville et visualiser par la suite des mesures.



B - FENÊTRE COMMANDE ET MESURE (cliquer sur l'onglet « Commande et mesures » pour l'obtenir)

Onglet commande et mesure



Départ commande

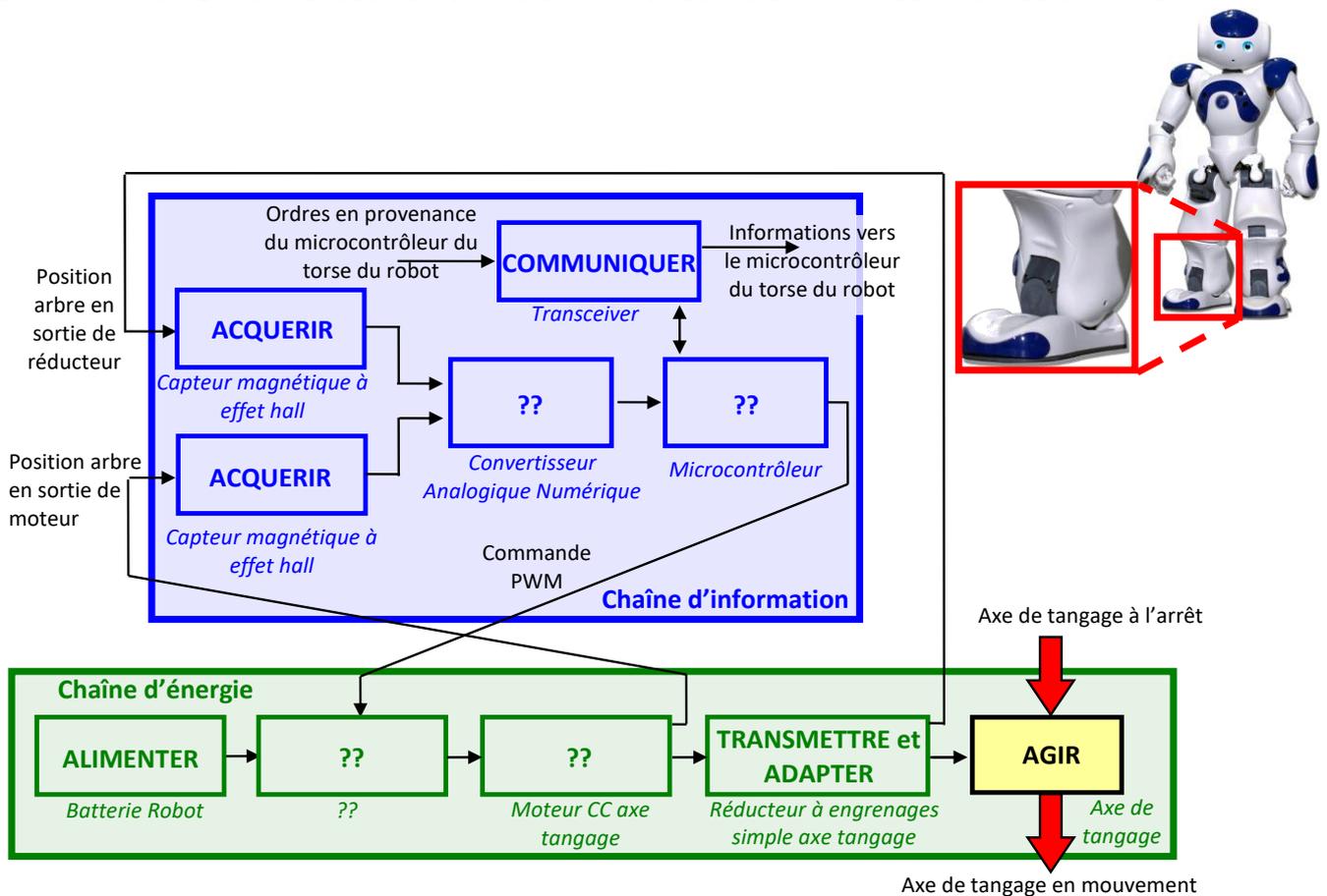
- Dans la zone de choix de consigne commande, sélectionner l'onglet « Tangage » sur la partie gauche de la fenêtre pour définir la commande de l'axe de tangage. Cliquer sur l'onglet « Entrées standard » et imposer un **échelon de -20°** d'amplitude pour une durée de **5s** à partir de la position de référence (cocher pour cela la case « Départ en position de référence » et imposer un « Angle initial » de 0°).
- La partie droite de la fenêtre propose les structures de commande, asservies ou en boucle ouverte. Le schéma affiché en arrière plan illustre la structure du système correspondant à ce choix. **Sélectionner pour ce TP « Asservissement réducteur ».**
- Régler le correcteur de l'asservissement de l'axe de tangage avec les paramètres suivants : **$K_p=200$, $K_i = 0$ et $K_d = 0$.**
- Cliquer sur mesure pour commander le mouvement.

Présentation Fonctionnelle de la Cheville du Robot NAO

A - EXTRAIT PARTIEL DU CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DE LA CHEVILLE NAO :

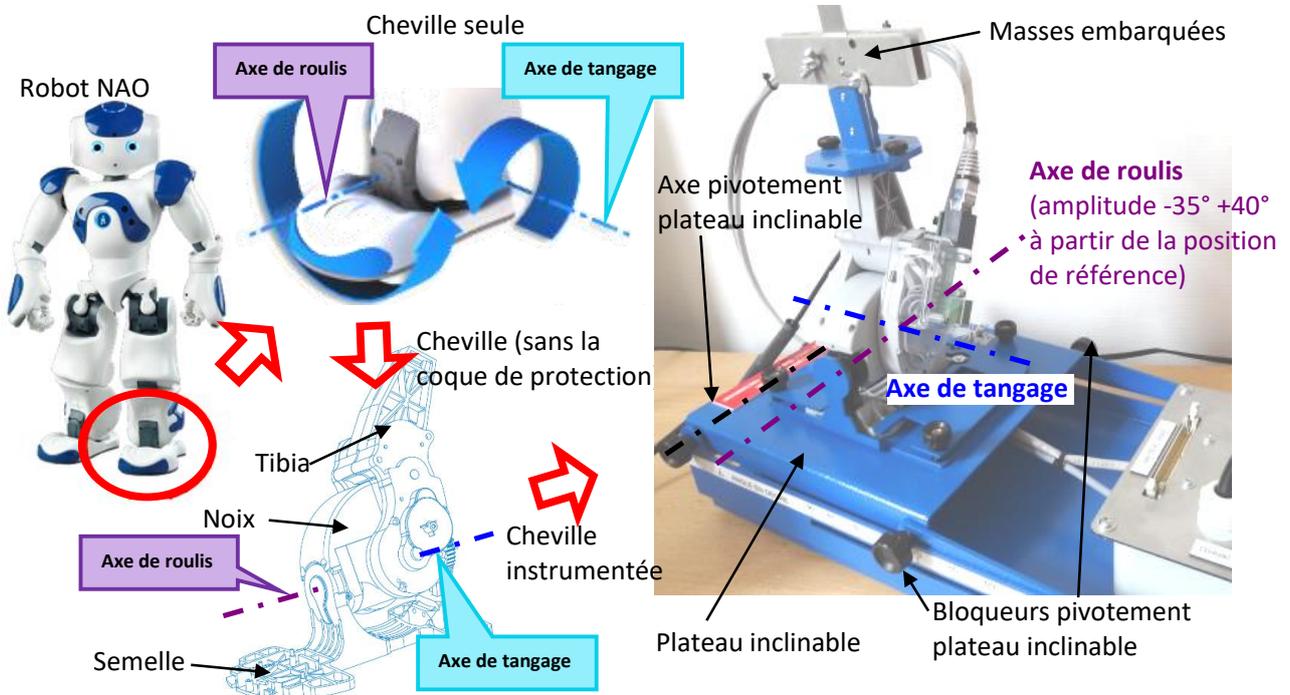
Exigences		Critères		Niveaux
E1	Le système doit permettre le déplacement du robot Nao en marche rapide (1 pas/seconde)	C1	Angle de tangage tibia / noix+semelle mesuré à partir de la position tibia \perp à semelle.	- 40° (extension) à + 20° (flexion)
		C2	- Bande passante à -3dB - Ecart statique - Marge de phase - Dépassement pour une consigne en échelon	> 1 Hertz < 1° > 45° < 10 %
		C3	Charges à mouvoir. (*) = valeurs ramenées aux possibilités d'expérimentation	0,28 kg (*) à 0,17 m (*) de l'axe de la cheville

B - ANALYSE STRUCTURELLE DE L'AXE DE TANGAGE DE LA CHEVILLE DU ROBOT NAO :

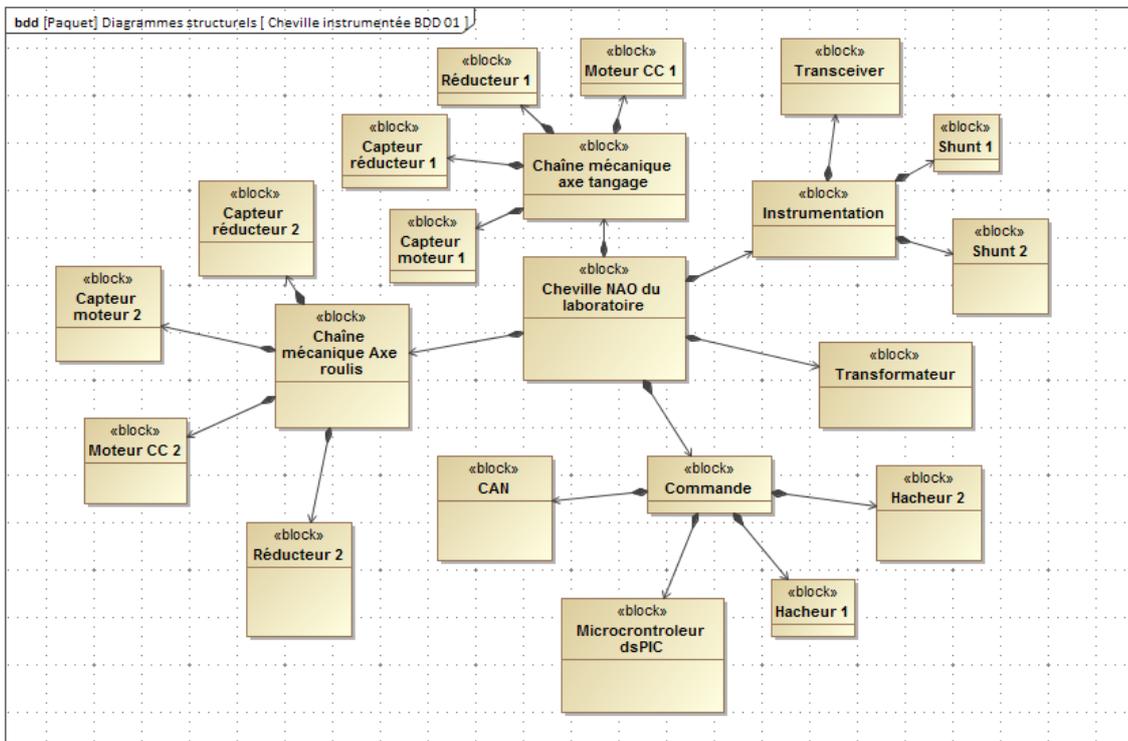


Description de la Cheville Instrumentée du Laboratoire

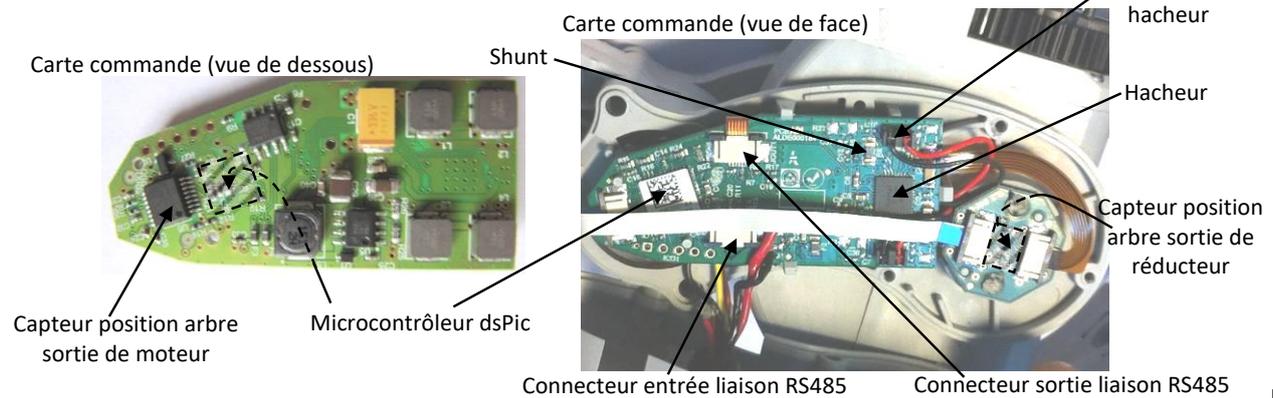
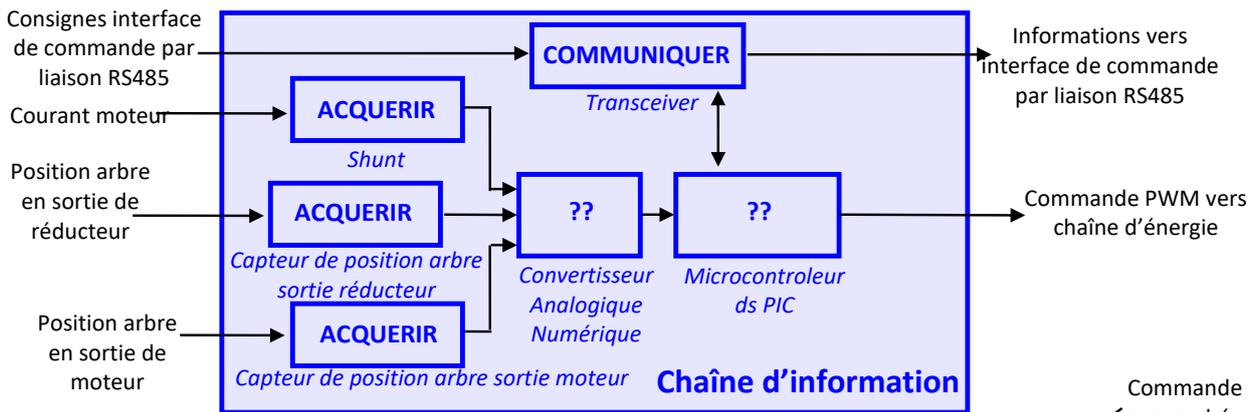
A - DU ROBOT NAO A LA CHEVILLE NAO DU LABORATOIRE :



B - DIAGRAMME DE DEFINITION DE BLOCS (BDD) DE LA CHEVILLE NAO:

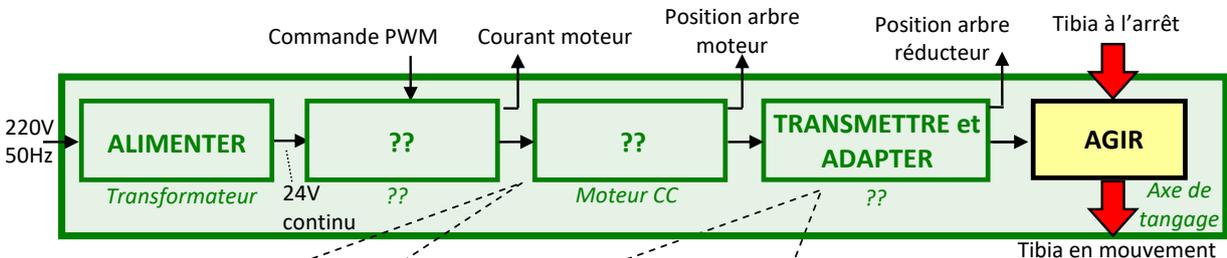


C - CHAINE D'INFORMATION DE L'AXE DE TANGAGE DE LA CHEVILLE NAO :



D -

CHAINE D'ENERGIE DE L'AXE DE TANGAGE DE LA CHEVILLE NAO DU LABORATOIRE :



Portescap

Moteur CC

MOTOR TYPE Brush DC Coreless

Model	22NT82213P
Number	x2
No load speed	8300 rpm ±10%
Stall torque	68 mNm ±8%
Continuous torque	16.1mNm max

Rapport de réduction : 1/130,85

	Module (mm)	Z (dents)	Entraxe (mm)
Pignon 1	0,3	20	15
Roue 2		80	
Pignon 3	0,4	25	14,5
Roue 4		47	
pignon 5	0,4	12	14,5
Roue 6		58	
Pignon 7	0,7	10	16,8
Roue 8		36	

Systeme d'Acquisition de Cheville NAO

A - GENERATION DE COURBES DE RESULTATS :

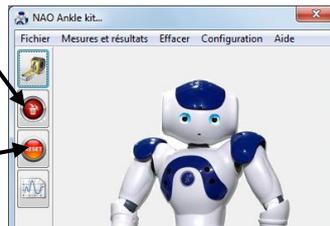
- Une fois le mouvement commandé après avoir cliqué sur « Mesure » (voir fiche « fonctionnement »), cliquer sur « Import » afin d'enregistrer les mesures en vue d'une exploitation.
- Jusqu'à 10 mesures peuvent être sauvegardées. Pour effacer des mesures utiliser les icones « Effacer des mesures » ou « Effacer toutes les mesures » disponibles sur la fenêtre principale.

Effacer des mesures sélectionnées

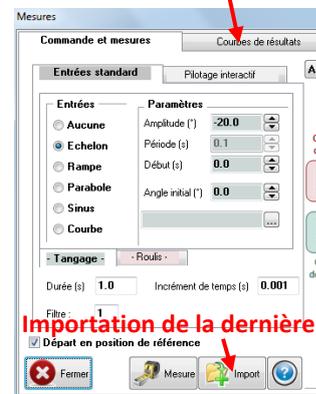
Permet la suppression d'une ou plusieurs mesures choisies.

Effacer toutes les mesures

Permet de supprimer toutes les mesures de la session en cours.

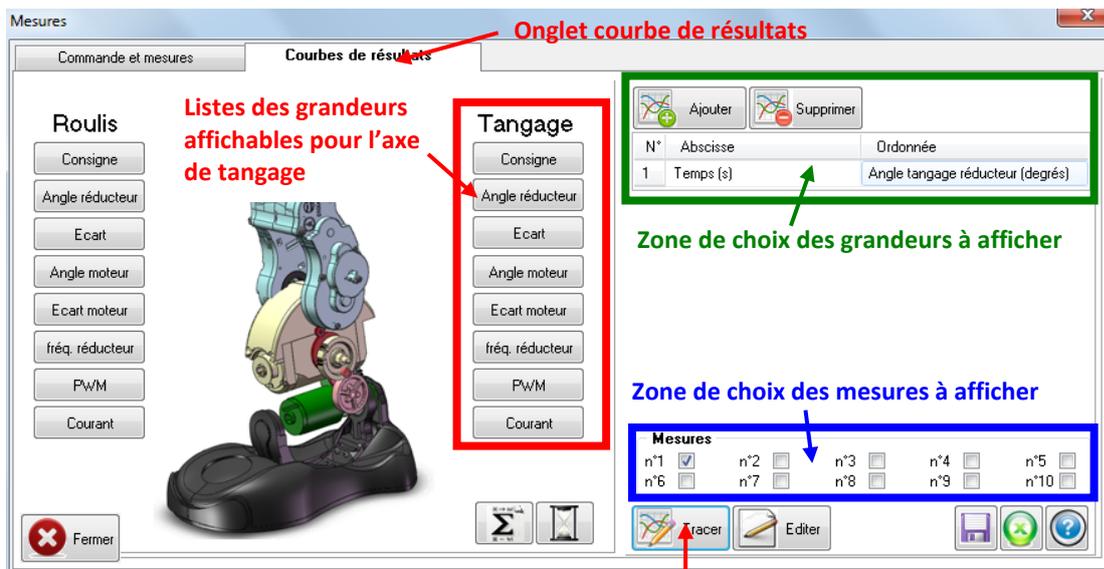


Onglet courbe de résultats



Importation de la dernière mesure

B - EXPLOITATION DES COURBES DE RESULTATS : (cliquer sur l'onglet « Courbes de résultats »)



Onglet courbe de résultats

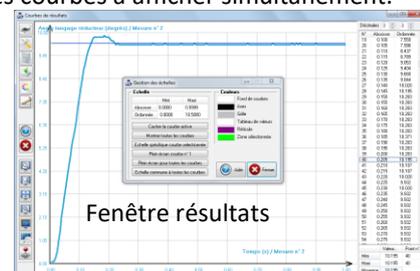
Listes des grandeurs affichables pour l'axe de tangage

Zone de choix des grandeurs à afficher

Zone de choix des mesures à afficher

Affichage des mesures sélectionnées

- Dans la zone de choix des grandeurs à afficher, cliquer sur « Ajouter » et choisir la grandeur à afficher en ordonnée en cliquant sur l'icône de la grandeur souhaitée disponible dans la zone des grandeurs affichables.
- Cliquer de nouveau sur « Ajouter » pour ajouter, si besoin, d'autres courbes à afficher simultanément.
- Cocher dans la zone de choix des mesures à afficher les mesures que vous souhaitez voir affichées.
- Cliquer sur « Tracer » pour afficher les courbes de résultats.
- Un clic sur une courbe affichée la met en surbrillance et permet d'accéder aux valeurs numériques disponibles dans le tableau sur la droite.
- Un clic droit dans le graphe fait apparaître un menu de gestion des échelles.



Pour effectuer d'autres acquisitions, retourner sur l'onglet « Commandes et mesures ».

Python

A- FREQUENTIEL :

Dans le fichier **frequentiel.py** le modèle du second ordre est étudié (avec la fonction de transfert ou l'équadiff) et on fera varier le paramètre z :

$$\omega_0^2 \frac{d^2 s(t)}{dt^2} + 2 \cdot z \cdot \omega \frac{d s(t)}{dt} + s(t) = e(t)$$

On pose $x = \frac{\omega}{\omega_0}$ afin de faire la fonction de transfert

$$H(x, z) = \frac{1}{1 + j \cdot 2 \cdot z \cdot x - x^2}$$

Pour tracer des diagrammes de Bode avec Python, on utilise les modules :

```
from scipy import *
from pylab import *
```

On utilise l'échelle logarithmique en base 10 :

```
x = logspace(-2, 2, 500) .
```

`log10(x)` pour les abscisses

Ici le facteur de qualité avec $Q=1/2z$ est utilisé.

Voici les fonctions de transfert de filtres classiques que vous pouvez utiliser dans le fichier :

```
Rejecteur (1-x**2)/(1+1j*x/Q-x**2)
Passe haut -x**2/(1+1j*x/Q-x**2)
Passe bas 1/(1+1j*x/Q-x**2)
Passe bande 1j*x/Q/(1+1j*x/Q-x**2)
```

Tracé avec une liste de valeur de z : $\left[5, 1, \frac{\sqrt{2}}{2}, 0.1\right]$

Pour avoir une jolie figure :

```
fig = plt.figure()
fig.subplots_adjust(hspace=0.1) # Espace entre les graphiques
```

Graphique du **gain** obtenu avec la fonction **abs** pour le module.

Graphique de la **phase** obtenu avec la fonction **angle** pour avoir l'argument, et conversion en degré !

B- TEMPOREL (MODELISER UN CORRECTEUR NUMERIQUE) :

Ouvrir le fichier **1er ordre temporel.py**

1 Equations aux différences

On peut considérer qu'un correcteur qui traite les informations de façon échantillonnée fait une bonne approximation d'un correcteur continu à partir du moment où la période d'échantillonnage T_e est faible devant la dynamique des grandeurs physiques (*théorème de Shannon* $f_e > 2 \cdot f_{max}$)

L'implémentation d'un correcteur dans un micro contrôleur ou dans un ordinateur se fait grâce à un programme qui se décompose en 4 étapes et qui se répètent à chaque période d'échantillonnage :

- La lecture des données d'entrées (consigne et mesure pour un asservissement) ;
- Le calcul de l'écart, puis de la sortie du correcteur, le plus souvent grâce à une équation aux différences ;
- L'écriture de la sortie ;
- Le vieillissement des données (les x_n deviennent les x_{n-1})

Lorsque la période d'échantillonnage est suffisamment faible devant la dynamique du système, on peut alors faire l'approximation des dérivées temporelles, ce qui permet ensuite de trouver l'équation aux différences à implémenter numériquement et qui caractérise une relation de récurrence :

$$\frac{dx}{dt} \approx \frac{x_n - x_{n-1}}{T_e}$$

Pour une dérivée seconde on utilise les différences finies centrées :

$$\frac{d^2x}{dt^2} \approx \frac{x_{n+1} + x_{n-1} - 2x_n}{T_e^2}$$



Méthode Obtenir la relation de récurrence à partir d'une fonction de transfert

1. À partir de la fonction de transfert, retrouver l'équation dans le domaine de Laplace qui ne fasse intervenir que des multiplications par p ;
2. exprimer cette équation dans le domaine temporel ;
3. utiliser l'approximation sur la dérivée temporelle pour obtenir une équation aux différences ;
4. réorganiser les termes pour obtenir la nouvelle valeur de la sortie à l'échantillon n en fonction des valeurs de l'entrée à l'échantillon n et des valeurs de l'entrée et de la sortie aux échantillons précédents ($n - 1$, $n - 2$, etc.).

2 Structure générale d'une commande numérique

Il est important de distinguer les différents types de signaux que l'on peut rencontrer dans la chaîne d'information/commande d'un système (c.f. FIGURE 1), soit :

- signal analogique ;
- signal échantillonné ;
- signal numérique ;
- signal quantifié.

Un signal analogique est une image continue de la grandeur physique mesurée (possédant une relation affine ou linéaire entre la grandeur mesurée et le signal délivré par le capteur).

Le signal échantillonné est une discrétisation temporelle du signal analogique, dont chaque échantillon est espacé dans le temps de la période d'échantillonnage T_e .

Le signal numérique est une discrétisation de l'amplitude du signal échantillonné, il dépend de l'espace mémoire alloué à la variable numérique de la carte de commande numérique (pour n bits d'espace mémoire alloué, on aura alors 2^n valeurs numériques possibles pour la variable).

Le signal quantifié est l'image continue du signal numérique, le système commandé étant de nature continue, il lui faut un signal de commande qui est continue, c'est le signal quantifié.

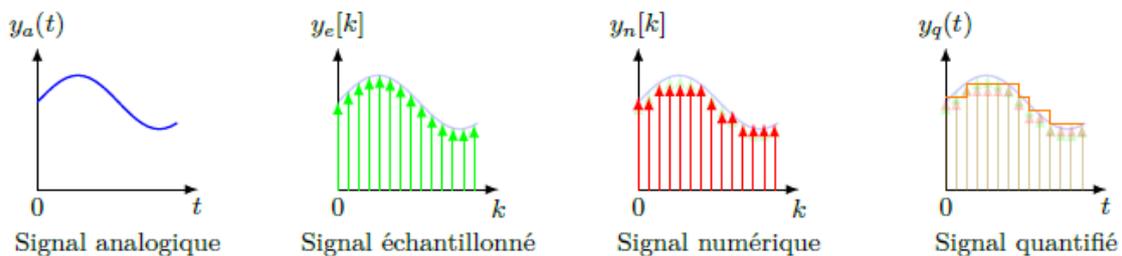


FIGURE 1 – Différents types de signaux

Le système évolue de manière continue (caractérisé par des équations différentielles), mais la carte de commande numérique évolue de manière discrète (caractérisée par des suites). La commande du système nécessite donc l'usage de différents éléments permettant de passer d'une expression continue à une expressions discrète, ce sont les CAN (convertisseur analogique/numérique) et CNA (convertisseur numérique/analogique). Voici en FIGURE 2, un schéma représentant la position de ces composants dans la structure d'une commande numérique.

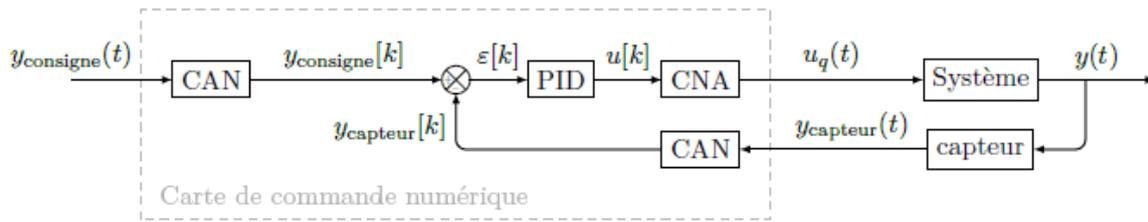


FIGURE 2 – Schéma d'une structure de commande numérique

Dans la suite de ce document, on confondra signal échantillonné et signal numérique, en faisant l'hypothèse que la mémoire allouée pour la variable mesurée est infinie. Cette hypothèse est souvent prise en compte, ce qui n'empêche pas d'étudier à part l'impacte d'une taille de mémoire finie sur la résolution de mesure.

3 Capteur, CAN et CNA

3.1 Capteur

Les capteurs peuvent renvoyer différents types de signaux, on les distingue alors comme :

- capteur analogique (potentiomètre, jauge d'extensiométrie) ;
- capteur numérique (codeur incrémental, codeur absolu).

Le signal renvoyé par un capteur est continu, il faut donc le convertir en un signal numérique pour que la carte de commande numérique puisse traiter cette information afin de commander le système.

3.2 CAN - convertisseur analogique/numérique

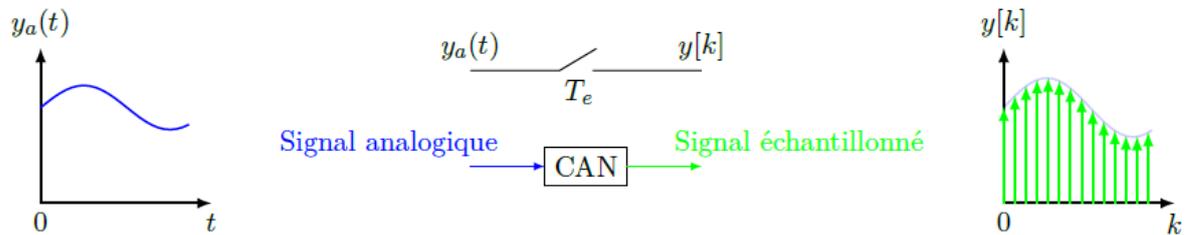


FIGURE 3 – CAN : convertisseur analogique/numérique

Le CAN est modélisé par un interrupteur commandé de rapport cyclique nul et de période T_e .

3.3 CNA - convertisseur numérique/analogique

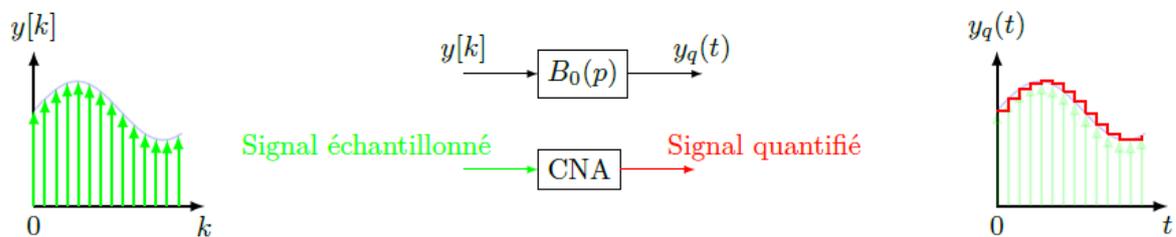


FIGURE 4 – CNA : convertisseur numérique/analogique

Le CNA est modélisé par un bloqueur d'ordre 0. Il permet d'obtenir un signal continu discret.

Matlab – Simulink

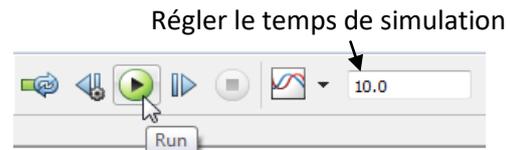
A - DEMARRAGE MATLAB-SIMULINK :

- Lancer Matlab à l'aide de l'icône 
- Lancer Simulink en cliquant sur l'icône disponible dans le menu Applications.
- Cliquer sur fichier → Ouvrir et choisir le modèle Simulink à ouvrir (fichier .slx).



B - LANCER UNE SIMULATION :

Pour lancer une simulation cliquer simplement sur l'icône « Run » disponible dans les icônes de lancement rapide de la fenêtre de travail.

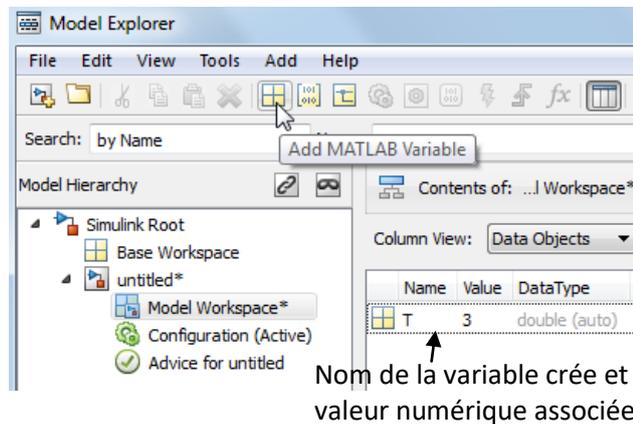


C - UTILISATION DE PARAMETRES DANS UN MODELE :

Double cliquer gauche sur chaque bloc pour entrer ses paramètres (entrée, fonction de transfert, valeur de gain, ...).

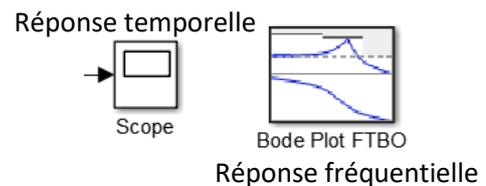
Pour étudier l'influence d'un paramètre on peut utiliser des variables littérales et tester plusieurs valeurs numériques pour une variable.

- Ouvrir le « Model Explorer » avec ctrl+H, puis dans le « Model Workspace » ajouter une variable Matlab, la nommer puis lui affecter une valeur.



D - EXPLOITATION DES FENETRES DE RESULTATS :

- Double cliquer gauche sur le « Scope » du modèle Simulink pour afficher la réponse temporelle.
- Double cliquer gauche sur le « Bode Plot » adéquat du modèle Simulink pour afficher la réponse fréquentielle voulue. Cliquer ensuite sur « Run » pour afficher le diagramme de Bode.
- Pour zoomer sur la(les) courbe(s) affichée(s) utiliser les options de zoom disponibles.



Options de zoom pour la(les) courbe(s) de résultats