

**Objectifs :**

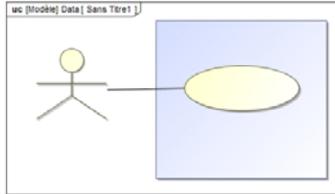
- Déterminer la fonction de transfert d'un système par une analyse harmonique,
- Comparer le modèle au réel.

**Présentation de la maquette.**

Pour assurer au robot NAO des performances élevées, le constructeur a choisi de mettre en place une double articulation au niveau de sa cheville et d'asservir la position de ces axes de tangage et de roulis.

**Fonction globale**

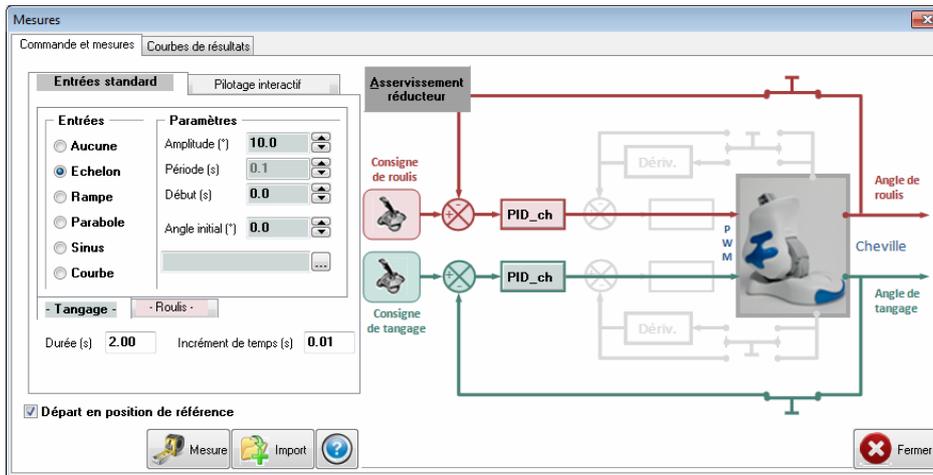
- ✎ Définir la fonction globale du système en réalisant le diagramme SYSML des cas d'utilisation

**Fonctionnement de la maquette**

Vérifier que la cheville est connectée à l'ordinateur puis lancer le logiciel de commande et d'affichage NAO-dev.exe.

Cliquer sur **MESURES**.

L'écran ci-dessous s'affiche.

**Étude expérimentale : réponse fréquentielle.**

Envoyer en une **entrée sinusoïdale d'amplitude 20°, de début = 0, période 10s et de durée 20s** sur l'axe de tangage commandé en **Boucle Fermée avec Kp (coefficient du correcteur proportionnel) = 200**

(Pour que l'axe de roulis reste inactif dans toute l'étude, mettre en place une commande en échelon d'amplitude nulle sur cet axe).

Lancer la MESURE ; l'axe rejoint sa position initiale puis le mouvement demandé s'exécute.

Réaliser l'IMPORT. Fermer la fenêtre de MESURE et ouvrir la fenêtre d'AFFICHAGE DE COURBES ; Cocher la mesure N° 1.

Avec AJOUTER, afficher la position en entrée (COMMANDE) et celle en sortie (ANGLE REDUCTEUR) de l'axe de tangage en fonction du temps.

- ✎ Observer les courbes obtenues et relever la valeur du déphasage temporel, ainsi que l'amplitude du signal de sortie. (Voir annexe)

- ☒ Recommencer la mesure pour une vingtaine de points en faisant varier la période de 10s à 0.1s.

### Remarque :

Il est fortement conseillé de relever les mesures en parallèle sur un tableau Excel ou Calc que vous sauvegarderez régulièrement.

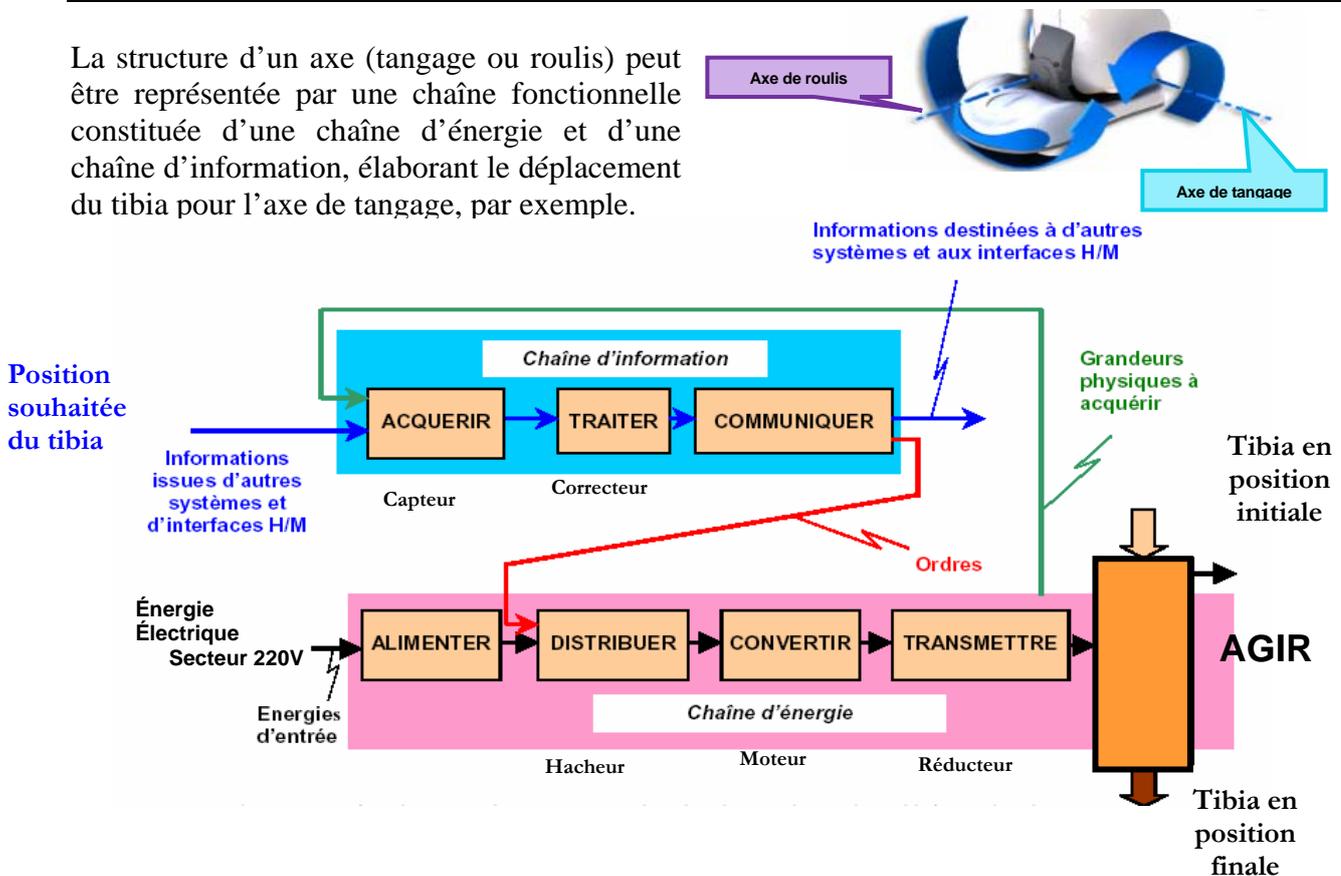
Lorsque la période diminue, on peut également diminuer la durée de mesure afin d'obtenir des courbes plus lisibles.

## Analyse.

- ☒ A l'aide des relevés précédents, tracer les diagrammes de Bode du système. (Voir annexe)
- ☒ Le système possède-t-il une résonance ?
- ☒ Pouvez-vous estimer l'ordre du système ? Précisez les critères de choix.
- ☒ En déduire la pulsation de cassure.
- ☒ Déterminez les caractéristiques de la fonction de transfert en boucle fermée.

## STRUCTURE FONCTIONNELLE ET COMPORTEMENTALE DE L'AXE DE TANGAGE

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



- ☒ Réaliser le schéma bloc de ce système en indiquant la correspondance entre les éléments de la chaîne fonctionnelle et les éléments de ce schéma bloc.
- ☒ Indiquer les différentes grandeurs physiques circulant dans le schéma bloc ainsi que leurs unités.
- ☒ En vous aidant de l'annexe, déterminer la valeur des blocs : moteur, réducteur, capteur.
- ☒ Tracez les diagrammes de Bode de la fonction de transfert ainsi obtenue et comparez les modèles théorique et expérimental. Conclure.

## ANNEXE 1 : MODELE DE COMPORTEMENT D'UN MOTEUR A COURANT CONTINU

### MODELE GENERAL DU SECOND ORDRE D'UN MOTEUR A COURANT CONTINU

A partir des équations classiques de comportement du moteur à courant continu :

$$u_m(t) = e(t) + R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad (1)$$

$$e(t) = k_e \cdot \omega_m(t) \quad (2)$$

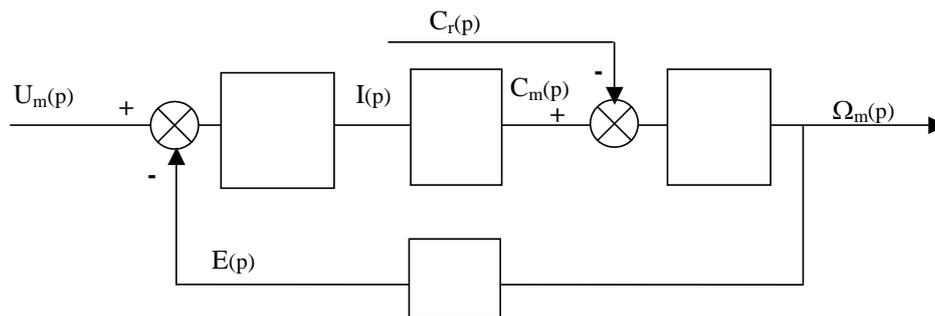
$$c_m(t) = k_t \cdot i(t) \quad (3)$$

$$c_m(t) - c_r(t) - f \cdot \omega_m(t) = J_t \cdot \frac{d\omega_m(t)}{dt} \quad (4)$$

dans lesquelles :

- |   |   |
|---|---|
| $u_m(t)$ : tension aux bornes de l'induit               | $R$ : résistance de l'induit                                  |
| $e(t)$ : force contre électromotrice                    | $L$ : inductance de l'induit                                  |
| $i(t)$ : intensité dans le circuit induit               | $k_e$ : constante de fem (inverse de la constante de vitesse) |
| $\omega_m(t)$ : fréquence de rotation de l'arbre moteur | $k_t$ : constante de couple                                   |
| $c_m(t)$ : couple moteur sur l'arbre moteur             | $f$ : coefficient de frottement visqueux : 0                  |
| $c_r(t)$ : « couple résistant » sur l'arbre moteur      | $J_t$ : Inertie moteur+ réducteur+ génératrice                |

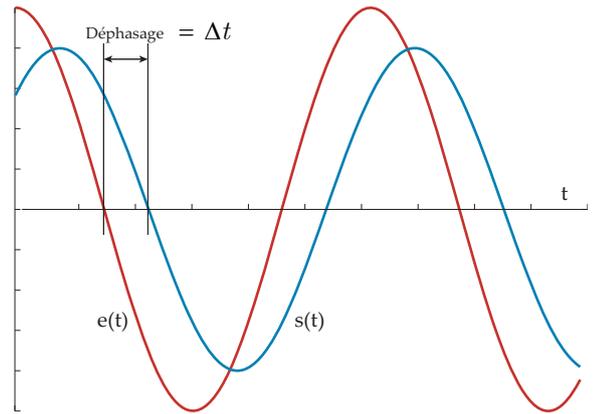
On peut passer dans le domaine de LAPLACE si les conditions initiales sont toutes nulles  
Ce qui conduit à la représentation sous forme du schéma bloc suivant :



## Annexe 2 : Diagrammes de Bode :

Considérons un système linéaire soumis à une entrée sinusoïdale :  $e(t) = e_0 \sin \omega t$

On montre qu'après extinction du régime transitoire, la réponse  $s(t)$  est sinusoïdale de même pulsation, mais avec une amplitude  $s_\omega$  et une phase  $\varphi_\omega$  fonctions de la pulsation :  $s(t) = s_\omega \sin(\omega t + \varphi_\omega)$



Pour chaque valeur de  $\omega$ , on va définir les deux quantités suivantes :

$$\text{Le gain } G_\omega = \frac{s_\omega}{e_0}$$

$$\text{La phase } \varphi_\omega = \Delta t \cdot \omega$$

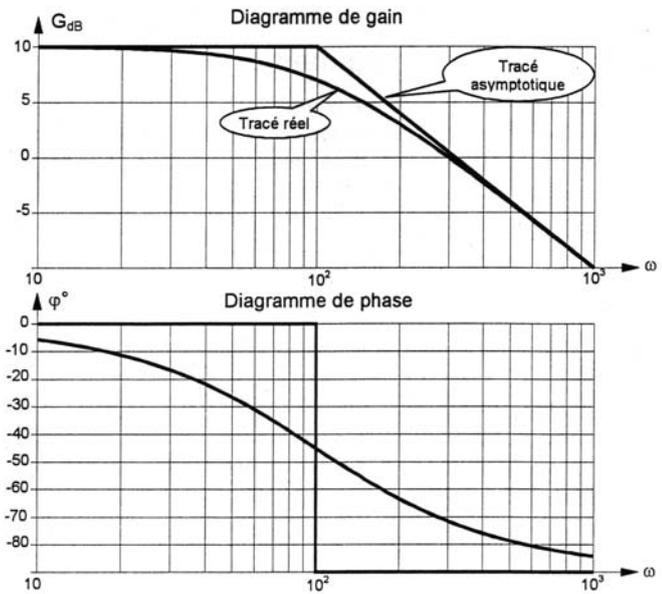
On caractérise ainsi l'évolution du gain et de la phase en fonction de la pulsation.

Soit  $H(p)$  la fonction de transfert d'un système linéaire. On peut démontrer qu'en remplaçant la variable  $p$  de Laplace par  $j\omega$ , cette fonction de transfert s'écrit :

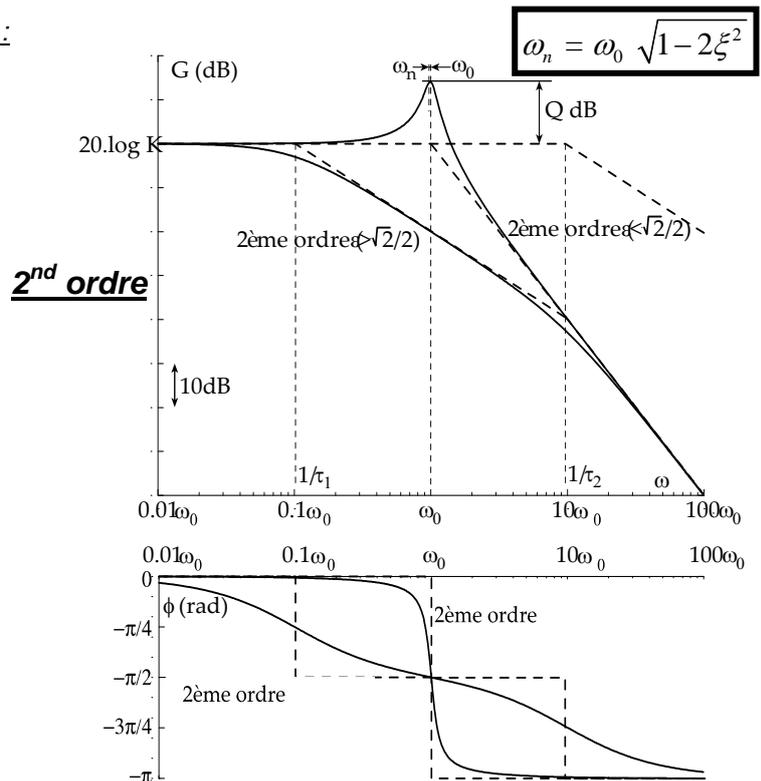
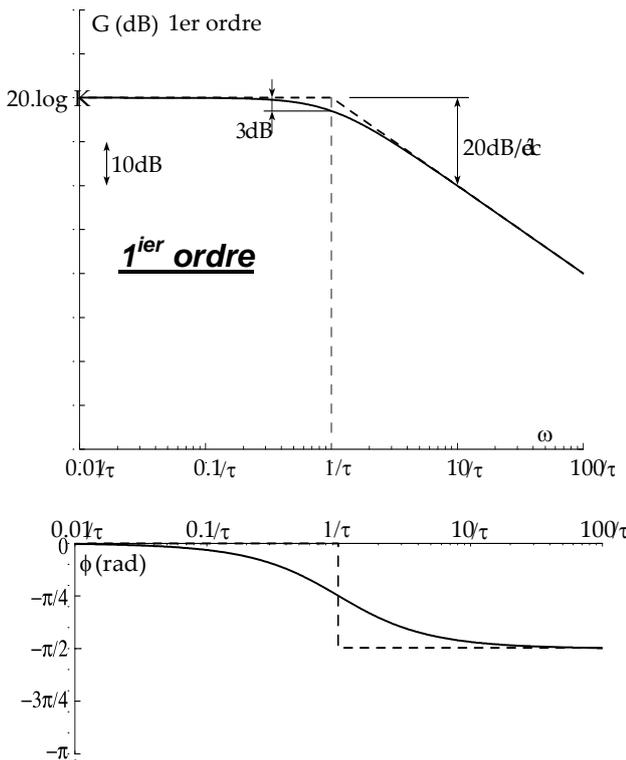
$$H(j\omega) = \frac{s_\omega}{e_0} e^{j\varphi_\omega} ;$$

$H(j\omega)$  est un nombre complexe : de module  $|H(j\omega)| = G_\omega$  et d'argument  $\arg(H(j\omega)) = \varphi_\omega$

**Diagramme de Bode** : au nombre de deux, ces diagrammes représentent les variations de gain  $|H(j\omega)|$  en décibel et de phase  $\arg(H(j\omega))$  en degré en fonction de la pulsation en radian par seconde tracée sur une échelle logarithmique. On se contente dans la majorité des cas d'un tracé asymptotique.



Allures des tracés pour un premier et un second ordre :



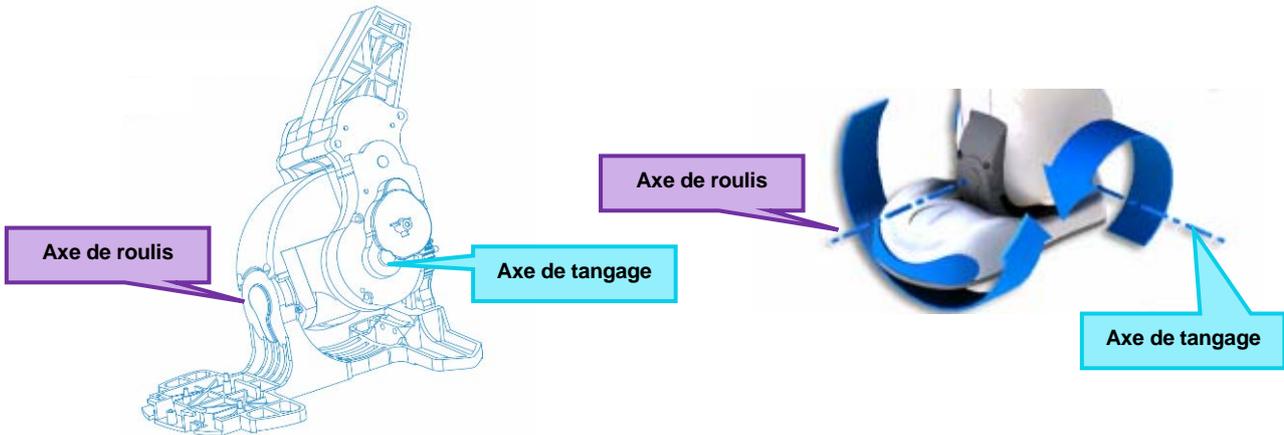
$$\omega_n = \omega_0 \sqrt{1 - 2\xi^2}$$

## ANNEXES

### Sous-Ensemble Cheville

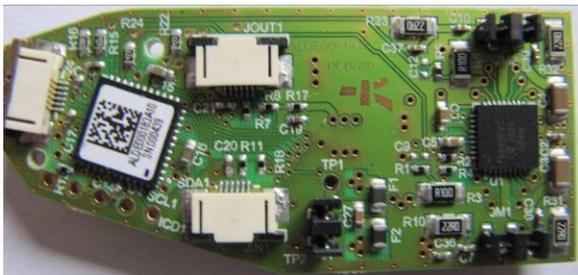
Ce sous-ensemble comporte 2 axes de liberté nommés :

- axe de tangage : **AnklePitch**
- axe de roulis : **AnkleRoll**



La photo ci-contre montre « l'intérieure » de la cheville.

Une seule carte de commande pilote les 2 axes.

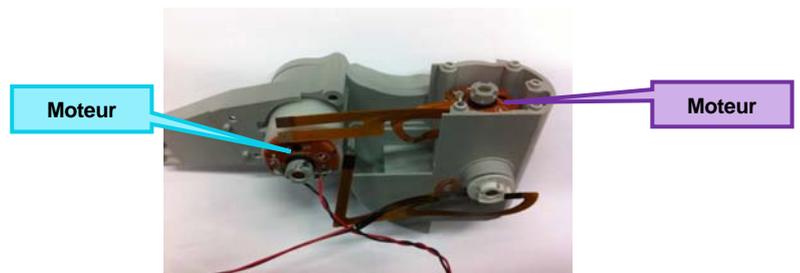


Ci-dessus les 2 faces de la carte de commande.

### Fonction Convertir

La photo ci-dessous montre la position des 2 moteurs :

Ces moteurs sont des machines à courant continu (MCC).

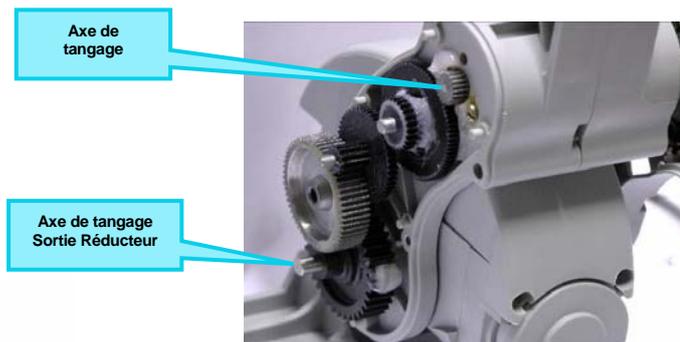


| Specification               |                                   | unit                               | value         | tolerance |
|-----------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|---------------|-----------|
| <b>Measured values</b>      |                                   |                                    |               |           |
| 1                           | Measuring voltage                 | V                                  | 18            | -         |
| 2                           | No-load speed                     | rpm                                | 8300          | ±10%      |
| 3                           | No-load current                   | mA                                 | 75            | max       |
| 4                           | Starting voltage                  | V                                  | --            | max       |
| 5                           | Terminal resistance               | Ohm                                | 5.4           | ±10%      |
| <b>Recommended values</b>   |                                   |                                    |               |           |
| 10                          | Continuous current (at 22°C)      | A                                  | 0.92          | max       |
| 11                          | Continuous torque                 | mNm                                | 16.1          | max       |
| 12                          | Angular acceleration              | 10 <sup>3</sup> rad/s <sup>2</sup> | 181           | max       |
| 13                          | Ambient working temperature range | °C                                 | -30°C to 65°C | typical   |
| 14                          | Rated coil temperature            | °C                                 | 155           | max       |
| <b>Intrinsic parameters</b> |                                   |                                    |               |           |
| 20                          | Back-EMF constant                 | V/1000 rpm                         | 2.03          | ±8%       |
| 21                          | Torque constant                   | mNm/A                              | 19.4          | ±8%       |
| 22                          | Motor regulation R/k <sub>2</sub> | 10 <sup>3</sup> /Nms               | 13.71         | typical   |
| 23                          | Rotor inductance (@1kHz)          | mH                                 | 0.6           | typical   |
| 24                          | Mechanical time constant          | ms                                 | 4.5           | -         |
| 25                          | Thermal resistance rotor-body     | °C/W                               | 6             | typical   |
| 26                          | Thermal resistance body-ambient   | °C/W                               | 22            | typical   |
| 27                          | Thermal time constant – rotor     | s                                  | 9             | typical   |
| 28                          | Thermal time constant –stator     | s                                  | 550           | typical   |
| 29                          | Rotor Inertia                     | Kgm <sup>2</sup> 10 <sup>-7</sup>  | 4.8           | typical   |
| 30                          | Stall torque                      | mNm                                | 68            | ±8%       |

## Fonction Transmettre

La photo ci-dessous montre le train d'engrenage pour l'axe de tangage :

Les rapports de réduction sont donnés ci-dessous roulis (Roll) et tangage (pitch) :



SPEED REDUCTION RATIO  
**ANKLEPITCH**

Reduction ratio 130.85

SPEED REDUCTION RATIO  
**ANKLEROLL**

Reduction ratio 201.3

## Fonction Acquérir (Position)

Les mesures de positions sont effectuées par 4 capteurs magnétiques MRE AS5045. Pour chaque axe (Pitch et Roll), il y a un capteur sur l'axe du moteur et un capteur sur l'axe en sortie du réducteur.

 **AS5045**  
12 Bit Programmable Magnetic Rotary Encoder

Ce circuit est un codeur rotatif magnétique sans contact. Il combine un DSP et des capteurs à effet Hall intégrés.

Pour mesurer un angle, un aimant circulaire centré au dessus du composant est nécessaire.

La position absolue de l'aimant mesurée avec une résolution de 0,0879° (12 bits,  $360^\circ/2^{12}$ ).

L'information peut être transmise sous forme analogique (signal PWM dont le rapport cyclique est proportionnel à l'angle) ou sous forme numérique (flot série de bits).

