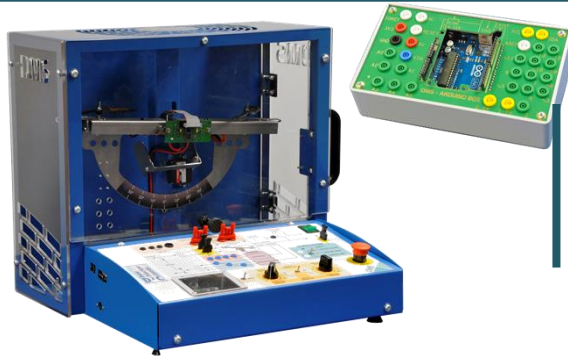


**MODELISER LE COMPORTEMENT DES SYSTEMES MECANQUES DANS LE BUT  
D'ETABLIR UNE LOI DE COMPORTEMENT OU DE DETERMINER DES ACTIONS  
MECANIQUES EN UTILISANT LE PFD**

CYCLE 4



**ETUDE DYNAMIQUE DU TANGAGE DU DRONE**

DRONE D2C

**1 OBJECTIFS**

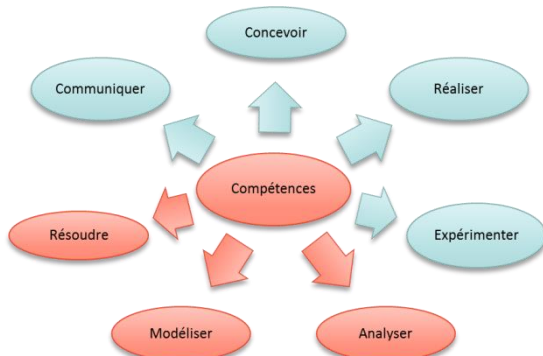
**1.1 Objectif technique**

**Objectif :**

Les systèmes de contrôle d'un drone doivent être réglés et ajustés en tenant compte de ses caractéristiques cinétiques (inertie).

Il s'agit d'obtenir par différentes méthodes, le moment d'inertie du balancier complet du drone didactique par rapport à son axe de rotation.

**1.2 Contexte pédagogique**



**Analyser :**

- ☐ A3 – Conduire l'analyse

**Modéliser :**

- ☐ Mod2 – Proposer un modèle
- ☐ Mod3 – Valider un modèle

**Résoudre :**

- ☐ Rés2 – Procéder à la mise en œuvre d'une démarche de résolution analytique
- ☐ Rés3 – Procéder à la mise en œuvre d'une démarche de résolution numérique

**1.3 Évaluation des écarts**



L'objectif est de vérifier si les performances du drone en terme d'accélération angulaire sont respectées et s'il est nécessaire de compenser le couple gyroscopique lors du pilotage.

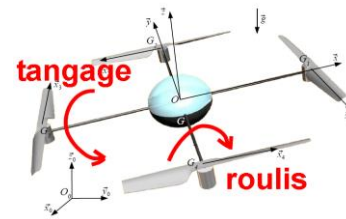
## 2 ÉTUDE DU MOUVEMENT DE TANGAGE DU DRONE DIDACTIQUE

### 2.1 Présentation

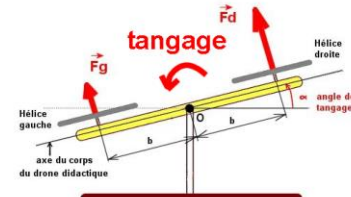
On montre que l'étude complète du comportement d'un drone quadrirotor dans l'espace à trois dimensions peut être séparée (moyennant des démarches de linéarisation à l'ordre 1) en quatre études indépendantes décomposées en différents « sous-systèmes » d'équations.

La première partie de ce TP porte sur le sous-système qui conduit au déplacement latéral du drone, dont on peut extraire l'équation « de tangage ».

La deuxième partie du TP porte sur l'analyse du phénomène de couple gyroscopique ; on se propose de vérifier par la simulation logicielle, que ce phénomène peut effectivement être négligé, conformément aux démarches qui utilisent la linéarisation à l'ordre 1 dans une étude complète.



Modèle utilisé dans le sujet de  
« modélisation » X-Cachan PSI 2013



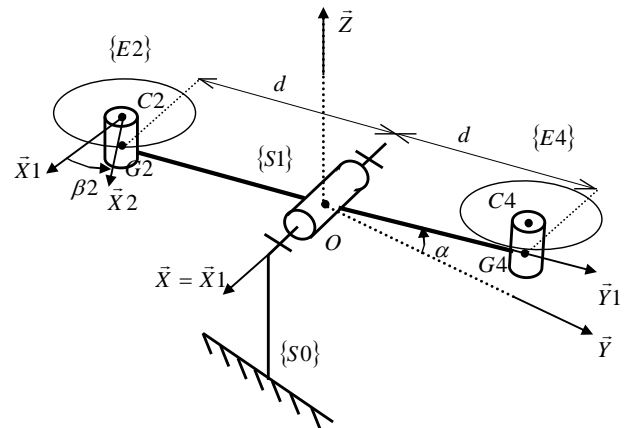
On fait l'hypothèse que le drone didactique a les mêmes caractéristiques inertielles autour de l'axe de tangage que le drone réel, et que la motorisation est identique. La maniabilité du drone nécessite que la vitesse de 30°/s soit atteinte en moins de 1 dixième de seconde. L'exigence du cahier des charges à vérifier est traduite dans l'exigence ci-contre.

«performanceRequirement»
<b>accélération angulaire minimale</b>
Id = "10.3.1.1"
Text = "l'accélération angulaire doit être au moins de 300°/s <sup>2</sup> ."

### 2.2 Mise en place de l'équation dynamique de tangage

Le schéma paramétré du dispositif est fourni ci-dessous.

On distinguera les différents ensemble  $\{E2\} = \{\text{hélice 2} + \text{rotor moteur 2}\}$ ,  $\{E4\} = \{\text{hélice 4} + \text{rotor moteur 4}\}$  dont les caractéristiques inertielles sont identiques à celles de  $\{E2\}$  et la structure  $\{S1\} = \{\text{bras} + \text{stator moteur 2} + \text{stator moteur 4}\}$  qui comprend le bras reliant les deux moteurs et les stators de chaque moteur ;  $\{S1\}$  est en liaison pivot d'axe  $(O, \vec{x})$  par rapport au support fixe  $\{S0\}$  ; les frottements de cette liaison sont supposés négligeables ; O est le centre de gravité de  $\{S1\}$ . On appelle « balancier » l'ensemble  $\{B\} = \{E2\} + \{E4\} + \{S1\}$  ; son centre de gravité est O. On note  $\mathcal{R}_0(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ . Le repère fixe galiléen de référence, lia au support fixe  $\{S0\}$ .



Les différentes bases et les paramètres angulaires sont récapitulés figure ci-contre .

$\beta_2$  est le paramètre angulaire qui caractérise la position angulaire de  $\{E2\}$ , de même que  $\beta_4$  pour  $\{E4\}$ .

La masse de l'ensemble  $\{E2\} = \{\text{hélice 2} + \text{rotor moteur 2}\}$  est notée :  $m$  ; le centre de masse de l'ensemble est  $G_2$  situé sur l'axe  $(C_2, \vec{z}_1)$ .

On utilisera pour la matrice d'inertie de l'ensemble  $\{E2\}$  suivante :  $I_{G_2}(E_2) = \begin{pmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{pmatrix}_{(G_2, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1)}$  au point  $G_2$ , exprimée

dans la base  $(\vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$ . On donne :  $\vec{OG}_2 = -d\vec{y}_1$  avec  $d = 0,14$  m. On utilisera la désignation  $IS_1$  pour le moment d'inertie  $IS_1$  de la structure  $\{S1\}$  par rapport à l'axe  $(O, \vec{x})$ .

Modélisation

**Activité 1.** Calcul du moment dynamique  $\overrightarrow{\delta(O, B/\mathcal{R}_0)}$

- ❑ Indiquer la méthode retenue pour réaliser le calcul
- ❑ Montrer que  $\overrightarrow{\delta(O, B/\mathcal{R}_0)} = (2(I_{xx} + md^2) + IS1)\ddot{\alpha}\overrightarrow{x_1} - I_{zz}(\dot{\beta}_2 + \dot{\beta}_4)\dot{\alpha}\overrightarrow{y_1} + I_{zz}(\dot{\beta}_2 + \dot{\beta}_4)\overrightarrow{z_1}$   
(on pourra aussi trouver...  $\overrightarrow{\delta(O, B/\mathcal{R}_0)} = (2(I_{xx} + md^2) + IS1)\ddot{\alpha}\overrightarrow{x_1} - (I_{zz} + md^2)(\dot{\beta}_2 + \dot{\beta}_4)\dot{\alpha}\overrightarrow{y_1} + (I_{zz} + md^2)(\dot{\beta}_2 + \dot{\beta}_4)\overrightarrow{z_1}$ )

Modélisation

**Activité 2.** Application du PFD

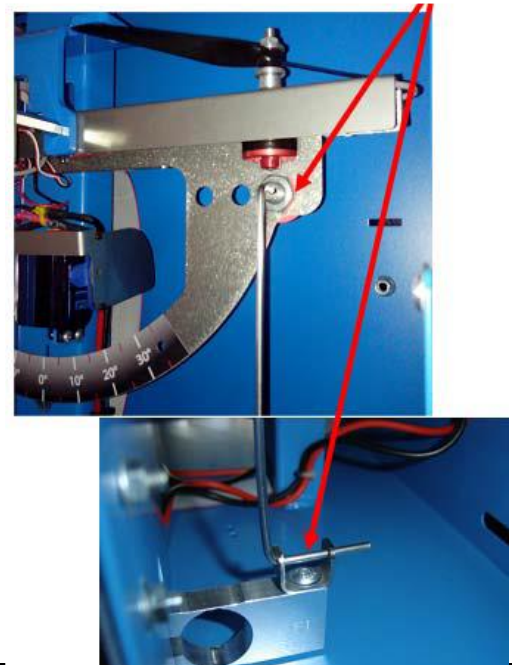
- ❑ On exprime les résultantes des actions exercées par l'air sur les hélices H2 et H4 au points respectifs C2 et C4 du fait de leur rotation par  $\overrightarrow{F_2} = F_2\overrightarrow{z_1}$  et  $\overrightarrow{F_4} = F_4\overrightarrow{z_1}$ .
- ❑ Montrer en précisant le choix d'isolement et l'équation utilisée que l'expression analytique de l'accélération angulaire en fonction de  $F_2$  et  $F_4$  des éléments inertiels des distances est  $\ddot{\alpha} = \frac{d(F_4 - F_2)}{2(I_{xx} + md^2) + IS1}$ .

## 2.3 Etude expérimentale du comportement statique de la motorisation

On cherche à savoir, en statique, l'effort généré par une hélice lorsqu'elle est à 25% de la consigne de « gaz ». Pour cela, commande qu'un seul des deux moteurs, on se place en boucle ouverte et on bloque le mouvement du balancier.

On fait alors varier la consigne de tangage de -5 à +5 et on mesure l'effort

On obtient le fichier **Mesure1.xlsx**.



Expérimentation

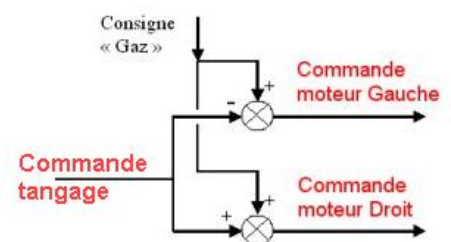
**Activité 3.**

En déduire la variation d'effort  $\Delta F_4$  et  $\Delta F_2$  autour du point de fonctionnement  $F_{4,25\%} = F_{2,25\%}$  générée par les moteurs droit et gauche pour un échelon de commande de 0 à -5, en boucle ouverte.

## 2.4 Calcul de la valeur théorique de l'accélération angulaire

**Donnée 1 :** le principe de commande des moteurs du drone en boucle ouverte est donné par la figure ci-contre. Pour une valeur donnée de « commande tangage », le moteur droit reçoit une commande qui est la « consigne gaz » à laquelle on **ajoute** la « commande tangage » ; le moteur gauche reçoit une commande qui est la « consigne gaz » à laquelle on **soustrait** la « commande tangage ».

**Donnée 2 :** le TP de cinétique sur la mesure du moment d'inertie du balancier permet d'obtenir la valeur du dénominateur de  $\ddot{\alpha}$  :  $2(I_{xx} + md^2) + IS1 = 10^{-2} \text{kg.m}^2$ .



**Donnée 3 :** on fait l'hypothèse simplificatrice que les moteurs sont capables de fournir instantanément la valeur de poussée correspondant à la commande (malgré une constante de temps voisine de 0,2 seconde, observée dans le TP sur la recherche de la fonction de transfert de la motorisation).

**Expérimentation**

**Activité 4.**  
Réaliser l'application numérique pour obtenir la valeur théorique de l'accélération angulaire, sous l'effet d'une commande tangage en échelon de 0 à -5, en boucle ouverte.

## 2.5 Mesure de l'accélération angulaire du balancier sous l'effet d'une commande de tangage

On réalise une mesure de l'angle ainsi que la valeur du gyromètre lorsque le balancier passer d'une position à l'autre. Le fichier Mesure\_02.xlsx contient les résultats de l'essai.

**Expérimentation**

**Activité 5.**

- ☐ Commenter les résultats en indiquant quels sont les écarts entre les tracés obtenus et les tracés attendus. Proposer une origine à ces écarts.
- ☐ Exploiter la portion du graphe qui correspond aux résultats attendus pour déduire la valeur de l'accélération angulaire mesurée.
- ☐ Comparer à la valeur théorique et proposer une explication aux éventuels écarts constatés.
- ☐ Comparer le résultat d'expérimentation avec l'exigence du cahier des charges. Conclure.

## 3 ETUDE DU PHENOMENE DE COUPLE GYROSCOPIQUE

### 3.1 Simulation logicielle pour la mise en évidence du phénomène

**Simulation**

**Activité 6.**  
Utiliser le document « Fiche\_simulation-Meca3D-couple-gyroscopique.pdf » pour visualiser en simulation l'effet du couple gyroscopique sur le drone didactique, dans les deux cas suivants :

- ☐ utilisation des hélices à inertie augmentée ;
- ☐ utilisation des hélices normales.

**Simulation**

**Activité 7.**  
Tracer un schéma cinématique en perspective du balancier du drone didactique et du moteur droit, avec les deux liaisons pivot châssis/balancier et balancier/rotor ; y placer les trois vecteurs caractéristiques du phénomène dans le cas du mouvement de tangage :

- le vecteur rotation de l'hélice par rapport au balancier du drone didactique ;
- le vecteur rotation imposée du balancier par rapport au repère terrestre ;
- le vecteur couple gyroscopique qui résulte des observations réalisées en simulation sur la maquette numérique du drone didactique.

### 3.2 Quantification du phénomène

**Simulation**

**Activité 8.**

- ☐ Identifier dans l'expression du moment dynamique  $\overrightarrow{\delta(O, B/\mathcal{R}_0)}$  utilisée précédemment, la contribution au phénomène de couple gyroscopique.
- ☐ Calculer numériquement la valeur de cette contribution pour la position, où le balancier passe à l'horizontale, dans des conditions voisines de l'expérimentation réalisée en première partie du TP :
  - vitesse des moteurs 2500 tr/min ;
  - vitesse de rotation du balancier 23 tr/min ;
  - Inertie Izz : cas hélice normale : (moteur + hélice).
- ☐ Comparer cette contribution à la valeur des moments générés par les forces de poussée des moteurs autour de l'axe de tangage lors de l'expérimentation de la première partie.
- ☐ Conclure en analysant la difficulté de pilotage du drone réel, induite par le couple gyroscopique.

Moments d'inertie: ( grammes \* millimètres carrés )  
Pris au système de coordonnées de sortie.

Ixx = 85127.41	Ixy = -108.37	Ixz = 0.00
Iyx = -108.37	Iyy = 86103.00	Iyz = -0.00
Izx = 0.00	Izy = -0.00	Izz = 4224.57