**Modéliser le comportement des systèmes mécaniques dans le but d'établir une loi de comportement ou de déterminer des actions mécaniques en utilisant le PFD**

**Cycle 4**

**Etude dynamique du tangage du drone**

***Drone D2C***

**PSI**



# Objectifs

## 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. |

## 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 |

## Évaluation des écarts

|  |  |
| --- | --- |
|  | **L’objectif de ce TP est de déterminer les caractéristiques inertielles du drone afin de renseigner un modèle.** |

# Étude du mouvement de tangage du drone didactique

# Présentation

|  |  |
| --- | --- |
| On montre que l’étude complète du comportement d’un drone quadrirotor dans l’espace à trois dimensions peut être séparée (moyennent 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 ». | *Modèle utilisé dans le sujet de « modélisation » X-Cachan PSI 2013* |
| 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. |  |

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.

## Mise en place de l’équation dynamique de tangage

Le schéma paramétré du dispositif est fourni ci-dessous.

On distinguera les différents ensemble **{E2} = {hélice 2 + rotor moteur 2}**, **{E4} = {hélice 4 + rotor moteur 4}** dont les caractéristiques inertielles sont identiques à celles de **{E2}** et la structure **{S1} = {bras + stator moteur 2 + stator moteur 4}** qui comprend le bras reliant les deux moteurs et les stators de chaque moteur ; **{S1}** est en liaison pivot d’axe 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 . Le repère fixe galiléen de référence, lia au support fixe {S0}.

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

β2 est le paramètre angulaire qui caractérise la position angulaire de {E2}, de même que β4 pour {E4}.

La masse de l’ensemble {E2} = { hélice 2 + rotor moteur 2 } est notée : ; le centre de masse de l’ensemble est G2 situé sur l’axe .

On utilisera pour la matrice d’inertie de l’ensemble {E2} suivante : au point G2, exprimée dans la base . On donne : avec d = 0,14 m. On utilisera la désignation IS1 pour le moment d’inertie IS1 de la structure {S1} par rapport à l’axe .

|  |  |
| --- | --- |
| **Modélisation** | 1. Calcul du moment dynamique  * Montrer que . * On commencera par indiquer la méthode retenue. |

|  |  |
| --- | --- |
| **Modélisation** | 1. 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 et . * Montrer en précisant le choix d’isolement et l’équation utilisée que l’expression analytique de l’accélération angulaire en fonction de et des éléments inertiels des distances est . |

## Etude expérimentale du comportement statique de la motorisation

Utiliser le premier paragraphe de la « fiche mesures-dynamiques-tangage.pdf » pour obtenir expérimentalement la courbe d’évolution de l’effort généré par le moteur en fonction de la valeur de « commande tangage » variant de -5 à +5 autour du point de fonctionnement de 25% de la « consigne gaz ».

|  |  |
| --- | --- |
| **Expérimentation** | En déduire la variation d’effort et autour du point de fonctionnement générée par les moteurs droit et gauche pour un échelon de commande de **0** à **-5** , en boucle ouverte. |

## 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  : .

**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** | 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. |

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

Utiliser le deuxième paragraphe de la « fiche mesures-dynamiques-tangage.pdf » pour obtenir expérimentalement la courbe d’évolution de la vitesse angulaire et de la position angulaire du balancier du drone didactique en fonction du temps.

🡪 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.

# Deuxième partie :étude du phénomène de couple gyroscopique

## Simulation logicielle pour la mise en évidence du phénomène

🡪 Travail 1 : 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 :

1. utilisation des hélices à inertie augmentée ;
2. utilisation des hélices normales.

🡪 Travail 2 : 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.

## Quantification du phénomène

🡪 Identifier dans l’expression du moment dynamique  utilisée au travail 1, 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.

# Détermination expérimentale du moment d’inertie du drone

## Assimilation de l’expérimentation

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Analyse et Expérimentation** | 1. Analyser le déroulement d’une expérience.  |  |  | | --- | --- | | L’expérimentation a pour objectif d’utiliser le D2C comme un pendule afin de déterminer son moment d’inertie. Pour cela, on utilise le dispositif à « tige élastique de blocage» du balancier du drone D2C (photo ci-contre).  Ce dispositif, une fois inséré dans le balancier, possède une certaine souplesse qui va permettre de réaliser une mise en oscillation, après qu’on ait manuellement écarté légèrement le balancier de sa position d’équilibre, puis qu’on l’ait relâché.  La mesure de la période des oscillations permettra de déterminer le moment d’inertie cherché.  **La vidéo Essai\_Spectaculaire.MOV illustre le déroulement de l’essai.** |  | |

## Exploitation des résultats d’expérimentation par résolution de l’équation différentielle issue du PFD

On désigne par l’axe de rotation du balancier et par, la direction allant de vers le moteur droit.

|  |  |
| --- | --- |
| **Analyse et Modélisation** | 1. Réaliser un modèle cinématique d’après l’expérimentation.  * **Réaliser** un schéma de l’expérimentation en y plaçant le paramétrage angulaire (angle ) autour de la position d’équilibre, le déplacement de l’extrémité de la tige-ressort et le rayon (mesuré par rapport à l’axe de rotation du balancier sur lequel s’exerce l’effort ). * Exprimer une relation géométrique simple liant , et . |

|  |  |
| --- | --- |
| **Analyse et Modélisation** | 1. Établir l’équation de mouvement.   Soit le moment d’inertie du balancier complet par rapport à l’axe de rotation. Soit l’effort que développe la tige-ressort sur le balancier lorsque celui-ci est écarté de sa position d’équilibre. Soit la raideur de la tige-ressort, telle que . On suppose que par conception, le centre de gravité du balancier est placé sur l’axe de rotation   * **Justifier** cette dernière hypothèse. * **Déterminer** à partir d’une démarche d’isolement du balancier et d’utilisation du principe fondamental de la dynamique, l’équation différentielle du mouvement du balancier lorsque celui-ci est en oscillation dans les conditions d’expérimentation (on pourra prendre en compte le coefficient de frottement visqueux : ). * **En déduire** l’expression de la période des oscillations en fonction du moment d’inertie , de la raideur et des caractéristiques dimensionnelles (on pourra considérer petit pour linéariser l’équation autour du point de fonctionnement   et négliger le coefficient de frottement visqueux : ). |

|  |  |
| --- | --- |
| **Expérimentation et résolution** | 1. Déterminer l’inertie à partir du relevé expérimental.  * Le fichier de mesure est disponible dans le répertoire « Essai ». On peut le visualiser avec le fichier Lire\_essai.py ou avec un tableur.   Si est la longueur de la tige élastique, son diamètre et son module d’élasticité, les lois de la résistance des matériaux (étude de flexion de la tige) nous donnent le déplacement à l’extrémité de la tige :  On mesure : , , . On donne : .   * **Déterminer** la raideur en N/m de la tige, puis à partir des résultats obtenus sur la période des oscillations (expérimentaux et analytiques) **déduire** la valeur du moment d’inertie du balancier. |

## Exploitation des résultats d’expérimentation par utilisation d’un logiciel de modélisation « acausale »

|  |  |
| --- | --- |
| **Simulation et résolution** | 1. Exploiter les résultats d’une modélisation Matlab-Simulink.   Le fichier de simulation « Modele\_Eleve » propose une modélisation de type « acausal ». Dans ce fichier, pour éviter un travail trop fastidieux, le paramètre de la raideur angulaire (KR2) a été préparé (double-clic sur le bloc « ressort … »).   * Justifier le choix du modèle proposé par rapport à l’expérimentation réalisée. * Par simulation successive, rechercher l’inertie permettant d’obtenir la même pseudo-période que pour la courbe expérimentale. * Vérifier que le décrément logarithmique est comparable sur la modélisation et l’expérimentation. Quel paramètre faut-il modifier pour ajuster le décrément ? |

# Exploitation d’un modèle CAO

## Détermination et justification des composantes des matrices d’inertie

|  |  |
| --- | --- |
| **Modélisation et résolution** | 1. Exploiter les caractéristiques d’inertie données par SolidWorks en Annexe.  * En utilisant le contrepoids et en exploitant le théorème de Huygens entre le point O et le centre de masse H, vérifier la bonne correspondance des résultats Lzz et Izz fournis par le logiciel (exploiter les informations entourées). |

|  |  |
| --- | --- |
| **Modélisation et résolution** | 1. Exploiter les caractéristiques d’inertie données par SolidWorks en Annexe.  * Déterminer le moment d’inertie de l’ensemble balancier équipé (1 balancier seul + 1 contrepoids + 2 motorisations + 4 boulons), par rapport à son axe de rotation . |

## Exploitation de l’assemblage complet avec le logiciel SolidWorks

|  |  |
| --- | --- |
| **Modélisation et résolution** | 1. Exploiter les caractéristiques d’inertie données par SolidWorks.  * Lancer le logiciel « Solidworks », ouvrir le fichier « **balancier-complet.sldasm** ». * Vérifier la présence du « système de cordonnées 1 » sur l’axe Oz (tout en bas de l’arbre de construction). * Faire afficher les caractéristiques cinétiques du balancier équipé : onglet « Évaluer – propriétés de masses » ; sélectionner « système de cordonnées 1 » comme système de coordonnées de sortie. * À partir des résultats donnés par le logiciel, fournir la valeur en kg.m2, du moment d’inertie par rapport à l’axe Oz, du « balancier équipé ». |

# Synthèse

|  |  |
| --- | --- |
| **Synthèse**  **Communiquer** | 1. Comparaison des écarts  * Commenter les écarts pouvant exister entre les résultats de la simulation et de l’expérimentation. |

# Annexe – Caractéristiques cinétiques des composants déterminées par SolidWorks

## Paramétrage

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **Moteur + hélice**  Masse = 65 grammes (supposée ponctuelle)  Position : A et B   |  |  |  | | --- | --- | --- | |  | X (mm) | Y (mm) | | A | -140 | 0 | | B | +140 | 0 |   **Boulon + 2 rondelles**  Masse = 40 grammes (supposée ponctuelle)  Positions : C, D, E, F   |  |  |  | | --- | --- | --- | |  | X (mm) | Y (mm) | | C | -140 | -30 | | D | +140 | -30 | | E | -105 | 55 | | F | +105 | 55 | |

## Données cinétiques

|  |  |
| --- | --- |
| **Contrepoids**  Centre de masse : H    données SolidWorks : | **Balancier seul**  Centre de masse : G    données SolidWorks : |

On observera que le « système de coordonnées 1 » ou « système de coordonnées de sortie » est choisi au point , avec l’axe coïncident avec l’axe de rotation du balancier du drone didactique.