

MODÉLISATION DES ACTIONS MÉCANIQUES

VOL D'UN DRONE MINIATURE

1 Présentation

L'apparition des premiers drones, véhicules volants sans pilote humain à bord, date de la fin de la seconde guerre mondiale. Tout d'abord principalement utilisés comme cibles militaires pour l'entraînement au combat, ensuite employés pour des missions de reconnaissance dans les années 1960, leur utilisation pour des missions de surveillance s'est ensuite répandue lors de nombreux conflits. Depuis, de nombreux drones ont été développés.

Les applications sont multiples : localisation de victimes lors de catastrophes naturelles, supervision du trafic routier, prises de vues de bâtiments ou d'ouvrages d'art pour la maintenance, inspection de lignes électriques ou de voies ferrées... Le drone est alors principalement utilisé dans sa fonction d'œil déporté, grâce à son vol stationnaire dans des missions difficiles d'accès pour l'homme.

L'objet de cette étude est la modélisation, l'analyse et la commande du drone miniature *Munin* développé par la *Safran*, à rotor caréné à pas fixe et quatre gouvernes dans une application de surveillance de bâtiment (FIGURE 1). Le drone considéré est équipé d'un rotor principal à pas fixe assurant la sustentation. Des gouvernes sont disposées dans le flux d'air afin de réaliser la commande d'orientation.



FIGURE 1 – Drone *Munin* de *Safran*

Objectif

L'objectif du travail proposé est de justifier l'utilisation des gouvernes pour maintenir le drone en vol stationnaire et l'orienter.

2 Paramétrage et modélisation

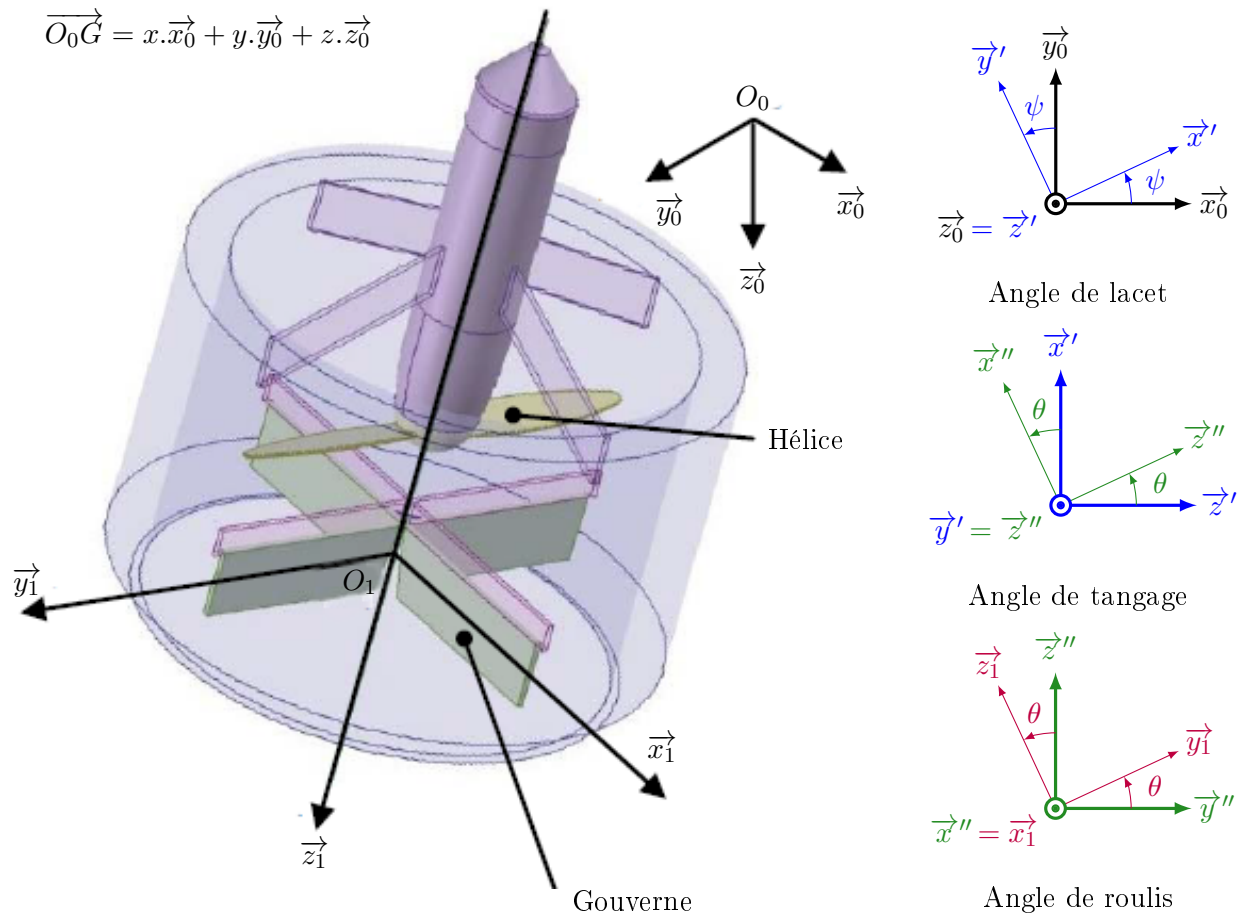


FIGURE 2 – Paramétrage du drone

On modélise dans un premier temps l'action de l'air sur l'hélice.

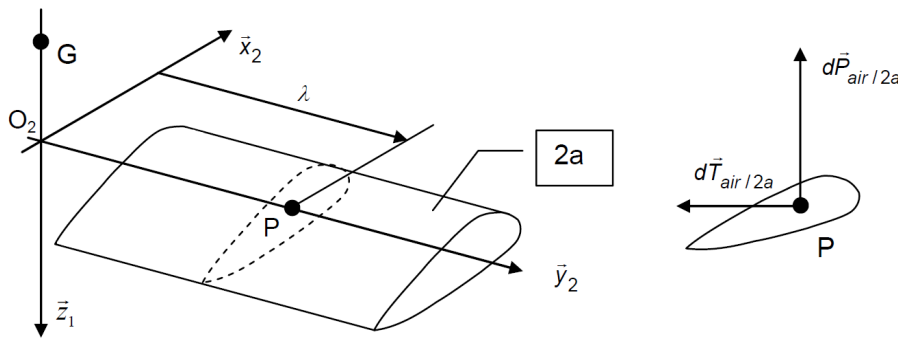
L'hélice **2** est composée de 2 pales **2a** et **2b** et possède un axe de symétrie (O_2, \vec{z}_1) . On définit pour une section de pale (au niveau du point P), deux vecteurs infinitésimaux $\vec{dP} = \vec{dP}_{\text{air} \rightarrow 2a}$ et $\vec{dT} = \vec{dT}_{\text{air} \rightarrow 2a}$ qui représentent respectivement la portance et la traînée, issues de la décomposition de la résultante de l'action mécanique de l'air sur la section.

Les conditions aérodynamiques permettent d'écrire la vitesse d'un point P de l'hélice **2** dans son mouvement par rapport à l'air : $\vec{V}_{P \in 2/\text{air}} = V.\vec{x}_2$ avec $V = -\lambda(r + \omega) > 0$ où $(r + \omega)$ est la vitesse angulaire de l'hélice par rapport à **0** (ω vitesse angulaire de **2/1** et r vitesse angulaire de **1/0**).

Ces actions infinitésimales sont définies par :

- $\vec{dP}(\lambda) = -K_z V^2 d\lambda.\vec{z}_1$ avec $K_z = 0,024 \text{ kg.m}^{-2}$ (coefficient de portance supposé constant) ;
- $\vec{dT}(\lambda) = -K_x V^2 d\lambda.\vec{x}_2$ avec $K_x = 0,006 \text{ kg.m}^{-2}$ (coefficient de traînée supposé constant).

On pose $\vec{O_2P} = \lambda.\vec{y}_2$ où $r_2 < \lambda < R_2$ avec $r_2 = 2 \text{ cm}$ et $R_2 = 12 \text{ cm}$.



3 Travail demandé

Question 1 Donner le torseur d'action mécanique locale de l'air sur une section de la pale **2a**. En déduire le torseur global d'action mécanique de l'air sur la pale **2a** au point O_2 .

Question 2 Par des considérations graphiques, montrer que le torseur d'action mécanique global de l'air sur l'hélice (pales **2a** et **2b**) est de la forme :

$$\{\mathcal{T}_{\text{air} \rightarrow 2}\} = \begin{Bmatrix} R_{\text{air} \rightarrow 2} \vec{z}_1 \\ C_{\text{air} \rightarrow 2} \vec{z}_1 \end{Bmatrix}_{O_2}$$

Le centre de gravité du corps **1** est noté G_1 tel que $\overrightarrow{O_1 G_1} = \ell_1 \cdot \vec{z}_1$, m_1 est la masse de **1** (voir FIGURE 2). Le centre de gravité de l'hélice **2** est noté G_2 tel que $\overrightarrow{O_1 G_2} = \ell_2 \cdot \vec{z}_1$, m_2 est la masse de **2**. On néglige la masse des gouvernes devant les masses des autres composants du drone. On note G le centre de gravité du drone supposé constitué du corps **1** et de l'hélice **2**. On pose $\overrightarrow{O_1 G} = \ell_G \cdot \vec{z}_1$.

Question 3 Justifier que le centre de gravité du drone complet doit n'avoir qu'une composante selon \vec{z}_1 . Déterminer ℓ_G en fonction des caractéristiques des solides **1** et **2**. En déduire le torseur d'action mécanique de l'air sur l'hélice **2** au point G (on suppose que $O_2 = G_2 = G$).

On note ω la vitesse angulaire de l'hélice **2** par rapport au corps **1**. Le mouvement du drone (corps **1**) par rapport au sol (0) est défini par le torseur cinématique suivant :

$$\{\mathcal{V}_{1/0}\} = \begin{Bmatrix} p_{1/0} \cdot \vec{x}_1 + q_{1/0} \cdot \vec{y}_1 + r_{1/0} \cdot \vec{z}_1 \\ u_{1/0} \cdot \vec{x}_0 + v_{1/0} \cdot \vec{y}_0 + w_{1/0} \cdot \vec{z}_0 \end{Bmatrix}_G$$

Le vol stationnaire est défini lorsque le torseur cinématique est nul. Le drone est alors fixe à une altitude donnée définie par la vitesse $\omega_{2/1}$.

Question 4 Justifier pourquoi il n'est pas possible d'avoir une position fixe s'il n'y a pas de gouverne(s).

Le drone est équipé de 4 gouvernes **1a**, **1b**, **1c**, **1d**. En utilisant le même type de calcul que précédemment, on peut montrer que sur chacune de ces gouvernes, le flux d'air génère une action mécanique modélisée par un glisseur passant par le centre de la gouverne et porté par la perpendiculaire à la surface : $\overrightarrow{R}_{\text{air} \rightarrow 1a} = -K_\delta (r + \omega)^2 \delta_a \cdot \vec{x}_{1a}$. Cette résultante se décompose en une portance verticale et une trainée. L'intensité dépend de la vitesse du flux d'air et donc de la vitesse angulaire de l'hélice

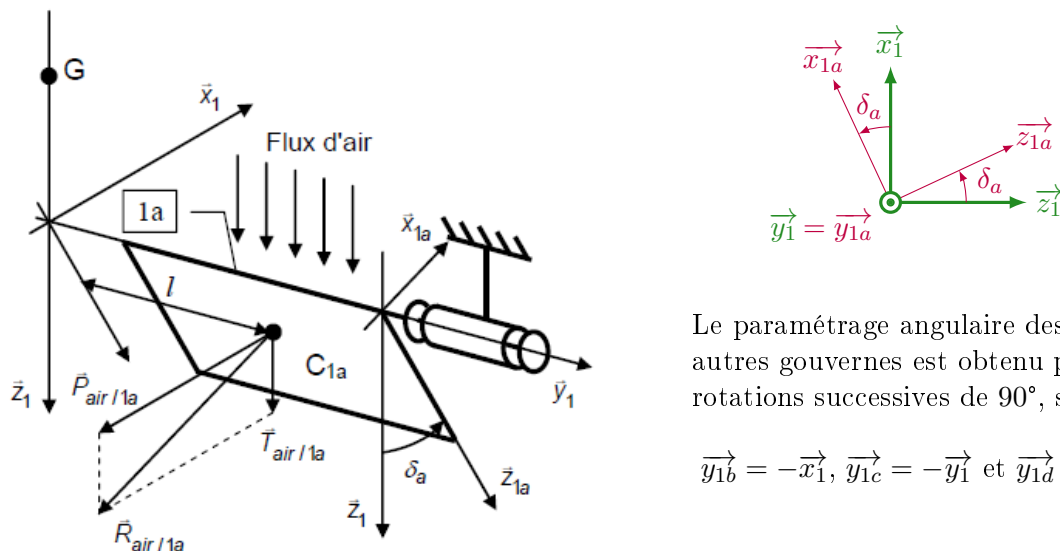


FIGURE 3 – Action de l'air sur une gouverne

$(r + \omega)$ ainsi que de l'angle d'inclinaison δ_a de la gouverne par rapport à la direction \vec{z}_1 . K_δ est un coefficient dynamique constant. L'expression est similaire pour chaque gouverne (cf. FIGURE 3).

On considère différentes situations d'inclinaison des gouvernes et on cherche les configurations permettant d'obtenir un vol stationnaire.

Question 5 Préciser sur une des figures de la page suivante le sens de rotation de l'hélice qui implique les portances et traînées indiquées. Vérifier que le sens du flux d'air généré est celui de la FIGURE 3.

Question 6 Représenter sur chaque figure (cas 1 à 4) les portances et traînées sur chaque gouverne compte-tenu des inclinaisons données et du sens du flux d'air. Indiquer alors pour chaque cas si un vol stationnaire (position d'équilibre) est possible ou non.

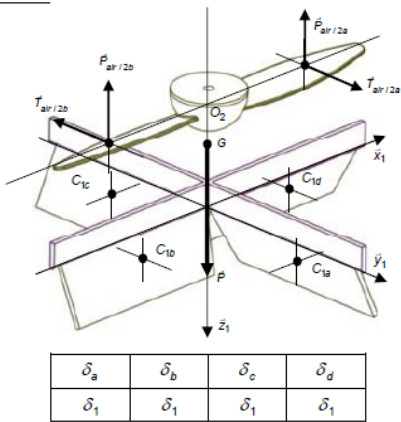
Question 7 Pour les cas n°5 et 6, proposer deux configurations possibles des gouvernes qui permettraient également d'obtenir un vol stationnaire.

Question 8 Certains drones adoptent une configuration à deux hélices contrarotatives de même axe. Quels peuvent être les avantages et les inconvénients d'un tel choix technologique ?

On examine alors 4 scénarios différents de modification des paramètres de pilotage du drone : variation de vitesse de rotation de l'hélice $\tilde{\omega}$ et variation d'angles d'inclinaison des gouvernes $\tilde{\delta}_a, \tilde{\delta}_b, \tilde{\delta}_c, \tilde{\delta}_d$ autour de la position d'équilibre (pour toute grandeur $x(t)$, on note \bar{x} sa valeur prise au point d'équilibre et $\tilde{x}(t)$ la petite variation autour de ce point tel que $x(t) = \bar{x} + \tilde{x}(t)$). Ces scénarios sont indiqués dans le tableau de la FIGURE 1.

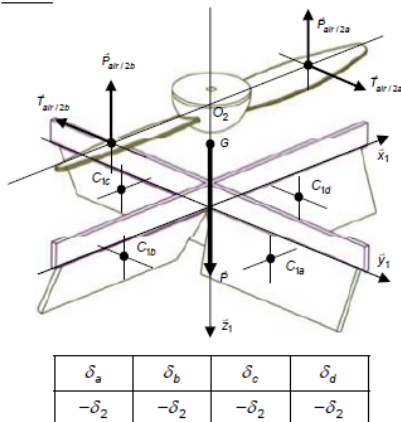
Question 9 Sans faire aucun calcul, compléter le tableau de la FIGURE 1 en indiquant par une croix dans la case correspondante les coordonnées de $\{\mathcal{V}_{1/0}\}$ qui varient instantanément après modification de la vitesse angulaire $\tilde{\omega}$ ou des angles d'inclinaison des gouvernes $\tilde{\delta}_a, \tilde{\delta}_b, \tilde{\delta}_c, \tilde{\delta}_d$. Conclure quant à l'intérêt de construire un drone possédant quatre gouvernes.

Cas 1



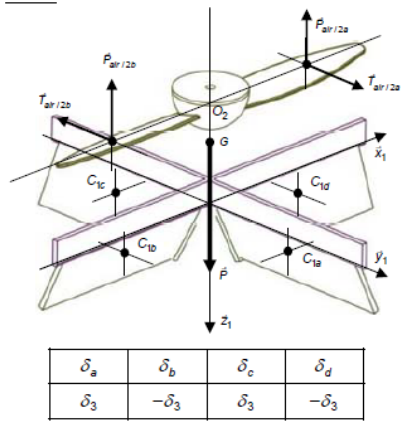
Configuration pouvant correspondre à une position d'équilibre :

Cas 2



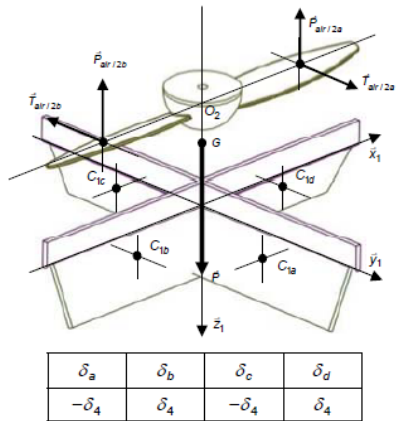
Configuration pouvant correspondre à une position d'équilibre :

Cas 3



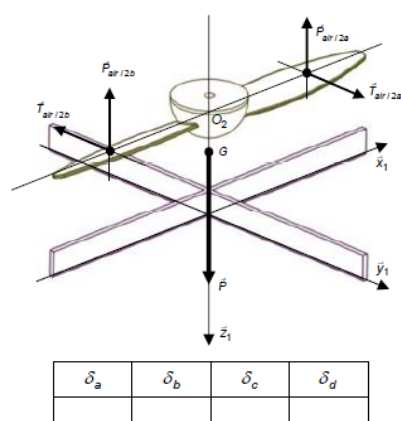
Configuration pouvant correspondre à une position d'équilibre :

Cas 4



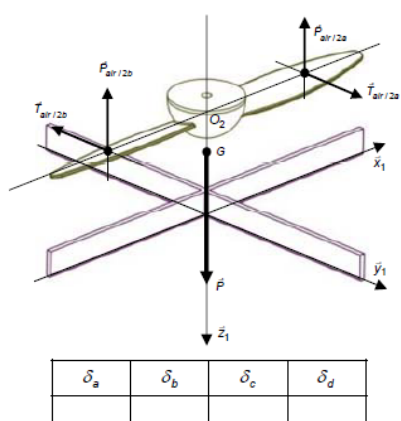
Configuration pouvant correspondre à une position d'équilibre :

Cas 5



Configuration pouvant correspondre à une position d'équilibre : OUI

Cas 6



Configuration pouvant correspondre à une position d'équilibre : OUI

FIGURE 4 – Tableau des configurations

	$p_{1/0}$	$q_{1/0}$	$r_{1/0}$	$u_{1/0}$	$v_{1/0}$	$w_{1/0}$
$\tilde{\omega} \nearrow, \tilde{\delta}_a = \tilde{\delta}_b = \tilde{\delta}_c = \tilde{\delta}_d = 0$						
$\tilde{\omega} = 0, \tilde{\delta}_i \nearrow, i = \{a, b, c, d\}$						
$\tilde{\omega} = 0, \tilde{\delta}_a \nearrow, \tilde{\delta}_c = \tilde{\delta}_a$ et $\tilde{\delta}_b = \tilde{\delta}_d = 0$						
$\tilde{\omega} = 0, \tilde{\delta}_a \nearrow, \tilde{\delta}_c = -\tilde{\delta}_a$ et $\tilde{\delta}_b = \tilde{\delta}_d = 0$						

TABLE 1 – Tableau à compléter