

Simulateur de vol pour la formation de pilotes en aéroclub (extrait du sujet Centrale PSI 2017)

La formation en vol traditionnelle se fait sur des avions fiables et économiques tels que le Robin DR400 (figure 4). Le rôle du simulateur est ainsi de compléter la formation indépendamment des conditions météorologiques et en toute sécurité. Les aéroclubs dotés de simulateurs de vol peuvent alors avoir une activité de formation tout au long de l'année, quelles que soient les conditions météorologiques.

Le but du simulateur de vol étant d'assurer le ressenti du pilote au travers de la maîtrise des accélérations qu'il subit au cours d'un vol, l'objet de ce sujet est de comparer ces accélérations mesurées sur un ROBIN DR400 en vol et celles mesurées sur le simulateur de vol équipé de la plateforme dynamique. Il s'agira alors d'étudier la minimisation de l'écart entre ces accélérations mesurées entre un vol réel et un vol simulé, tout en respectant les exigences géométriques et économiques des aéroclubs qui sont partiellement exprimées sur la figure 3.

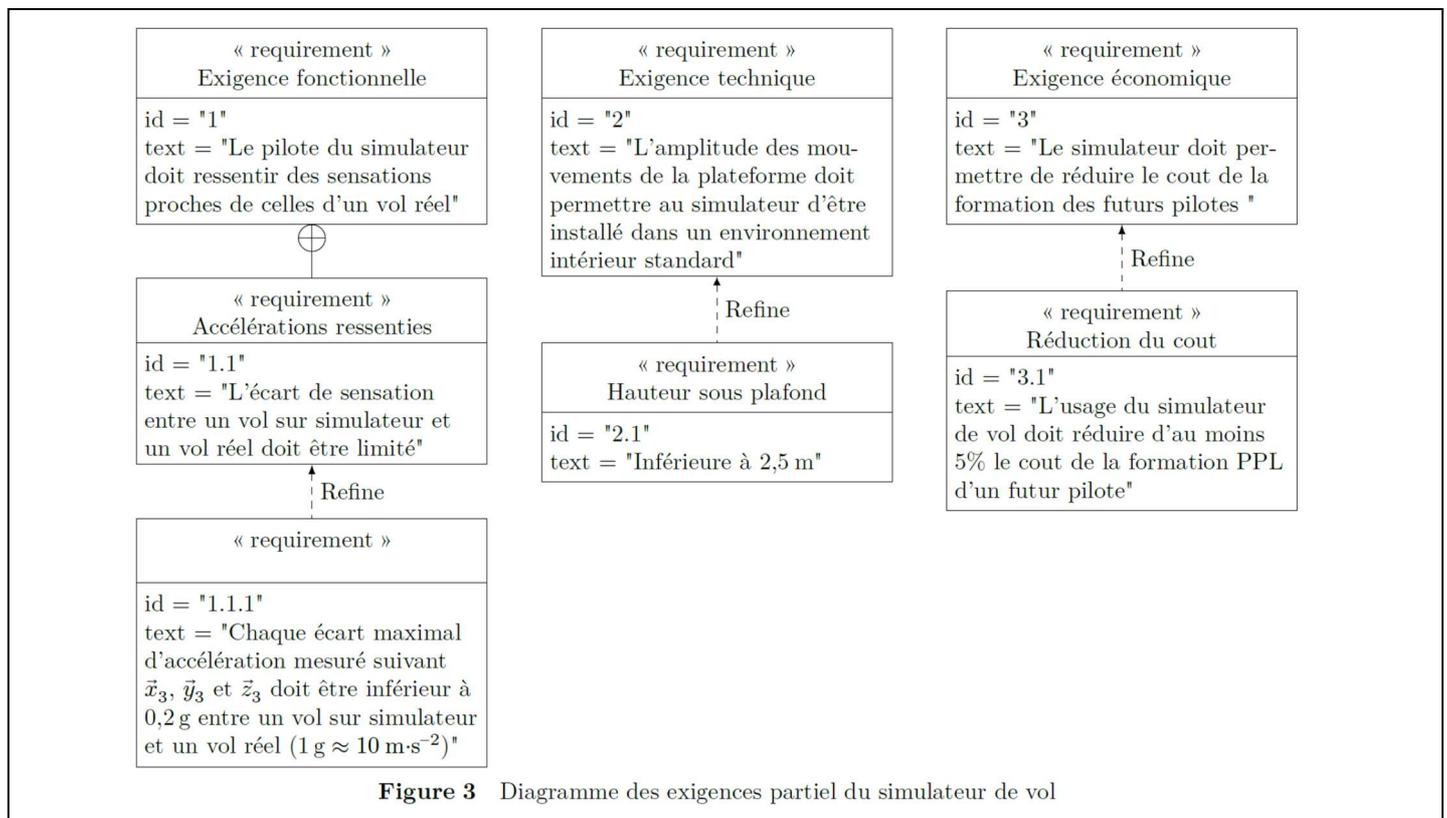


Figure 3 Diagramme des exigences partiel du simulateur de vol

Les accélérations mesurées en vol réel étant bien plus importantes lors d'un mouvement de tangage (rotation autour de \vec{z}_3 , figure 4) que lors d'un mouvement de roulis ou de lacet (rotations respectivement autour de \vec{x}_3 et \vec{y}_3), l'étude proposée se limitera uniquement à l'analyse du mouvement de tangage de l'avion ou du simulateur de vol.

I Capacité du simulateur de vol à restituer des accélérations

— Objectif —

Caractériser les accélérations mesurées en vol réel à bord d'un DR400 et conclure quant à la capacité du simulateur de vol à les restituer.

I.A – Mesure et vérification des accélérations en vol à bord d'un DR400

Une centrale inertielle a été embarquée à bord d'un avion DR400. Les mesures obtenues dans le cas d'un mouvement de tangage seul (rotation autour de \vec{z}_3 , figure 4) sont données sur la figure 5. Le protocole expérimental choisi permet de solliciter l'appareil dans des conditions de vol sévères par rapport à un vol classique.

L'ensemble {avion DR400 + pilote} est modélisé par un solide indéformable (3') de centre d'inertie $G_{3'}$, en mouvement dans le plan fixe $(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0)$ défini figure 4. La base $R_{3'}(\vec{x}_{3'}, \vec{y}_{3'}, \vec{z}_{3'})$ est liée au solide (3'). L'accélération $\vec{\Gamma}_a$ mesurée par la centrale inertielle installée au voisinage de $G_{3'}$, s'exprime par :

$$\vec{\Gamma}_a = -\vec{\Gamma}_{G_{3'}, 3'/0} - g\vec{y}_0 \quad \text{où } g \text{ désigne l'accélération de la pesanteur, } g \approx 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

Dans les conditions de l'expérience, il est possible de faire l'hypothèse que la vitesse de l'avion est dirigée suivant $\vec{x}_{3'}$, avec $\vec{V}_{G_{3'}, 3'/0} = v_a \vec{x}_{3'}$.

Q 2. Exprimer littéralement les coordonnées de $\vec{\Gamma}_a$ dans la base $R_{3'}(\vec{x}_{3'}, \vec{y}_{3'}, \vec{z}_{3'})$ en fonction de $g, v_a, \dot{v}_a = \frac{dv_a}{dt}$, $\dot{\theta}_{30} = \frac{d\theta_{30}}{dt}$ et θ_{30} .

La vitesse indiquée par le pilote lors de l'essai en vol était d'environ $v_a \approx 200 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

Q 3. À partir des points de mesures situés à l'intérieur des pointillés qui définissent les zones 1 et 2 de la figure 5, déterminer une valeur numérique de $\dot{\theta}_{30}$ en $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$, une valeur approchée de $\cos \theta_{30}$ et déterminer la valeur de v_a en $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ à l'aide des valeurs trouvées. Conclure quant à la validité des mesures effectuées en vol.

I.B - Analyse de la capacité du simulateur de vol à restituer des accélérations

Faire ressentir au pilote assis sur le simulateur de vol des accélérations identiques à celles mesurées en vol réel pose la question des mouvements à imposer à l'ensemble {cellule du simulateur + pilote} modélisé comme un solide indéformable noté (3), de centre d'inertie G_3 (figure 6). La base $R_3(\vec{x}_3, \vec{y}_3, \vec{z}_3)$ est liée au solide (3) qui est appelé cellule du simulateur (3) dans la suite du sujet.

Malgré la complexité du système de transformation du mouvement qui permet de mouvoir la cellule du simulateur, il est fait l'hypothèse, *uniquement dans cette partie*, que dans le plan fixe $(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0)$, les degrés de liberté de la cellule du simulateur (3) sont limités à :

- une rotation d'axe (G_3, \vec{z}_0) avec $\vec{\Omega}_{3/0} = \vec{\Omega}_{3'/0} = \dot{\theta}_{30}\vec{z}_0$;
- une translation suivant \vec{y}_0 avec $\vec{V}_{G_3, 3/0} = v_c\vec{y}_0$.

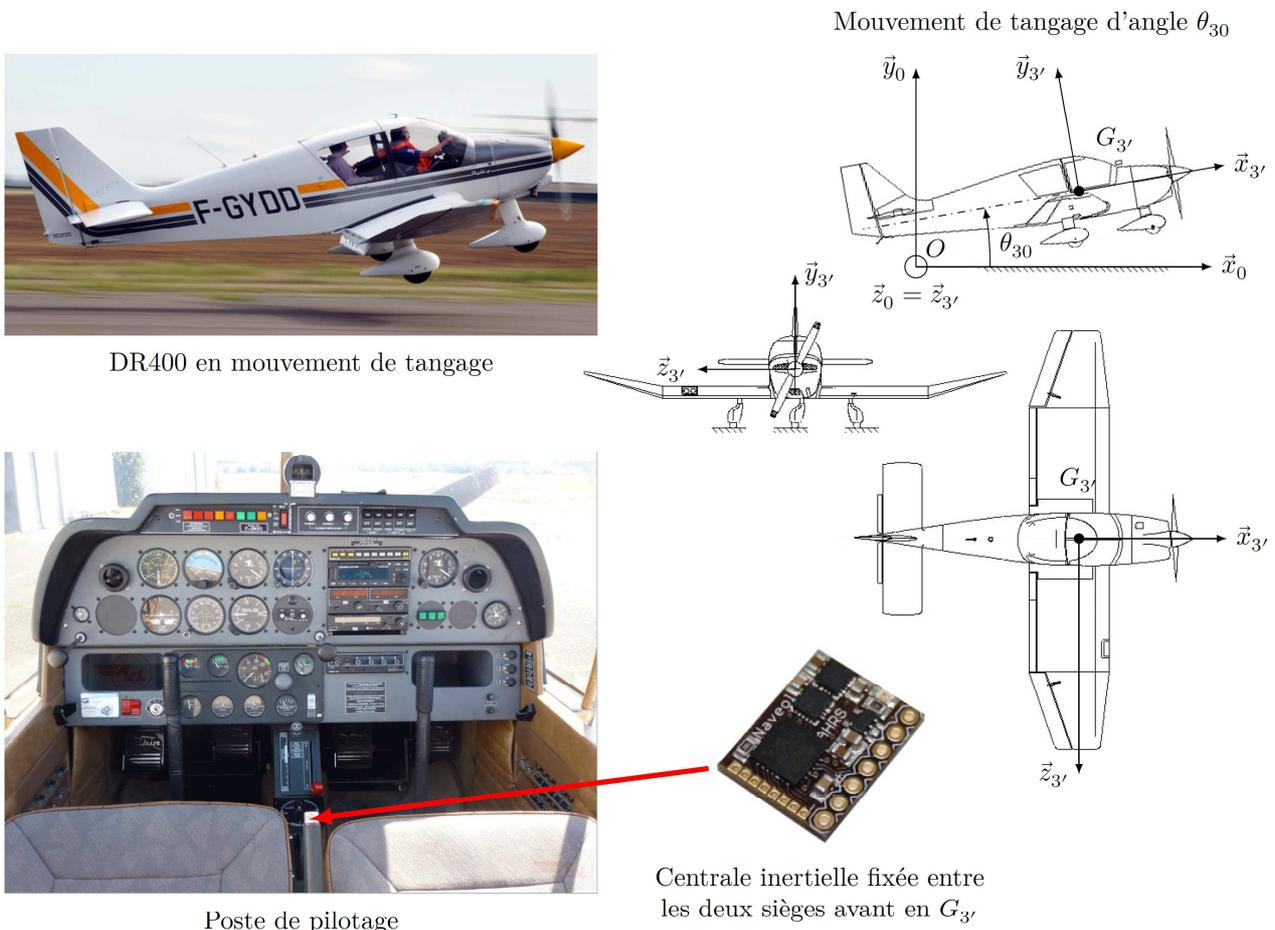


Figure 4 Paramétrage du mouvement de tangage d'un DR400 et position de la centrale inertielle embarquée lors des mesures en vol à bord d'un DR400

Comme dans le cas de l'avion DR400, l'accélération mesurée par la centrale inertielle ($\vec{\Gamma}_c$) installée au voisinage de G_3 sur la cellule du simulateur (3) est telle que :

$$\vec{\Gamma}_c = -\vec{\Gamma}_{G_3,3/0} - g\vec{y}_0 \quad \text{où } g \text{ représente l'accélération de la pesanteur, } g \approx 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

Q 4. Exprimer littéralement les coordonnées de $\vec{\Gamma}_c$ dans la base $R_3(\vec{x}_3, \vec{y}_3, \vec{z}_3)$ en fonction de g , $\dot{v}_c = \frac{dv_c}{dt}$, $\dot{\theta}_{30} = \frac{d\theta_{30}}{dt}$ et θ_{30} .

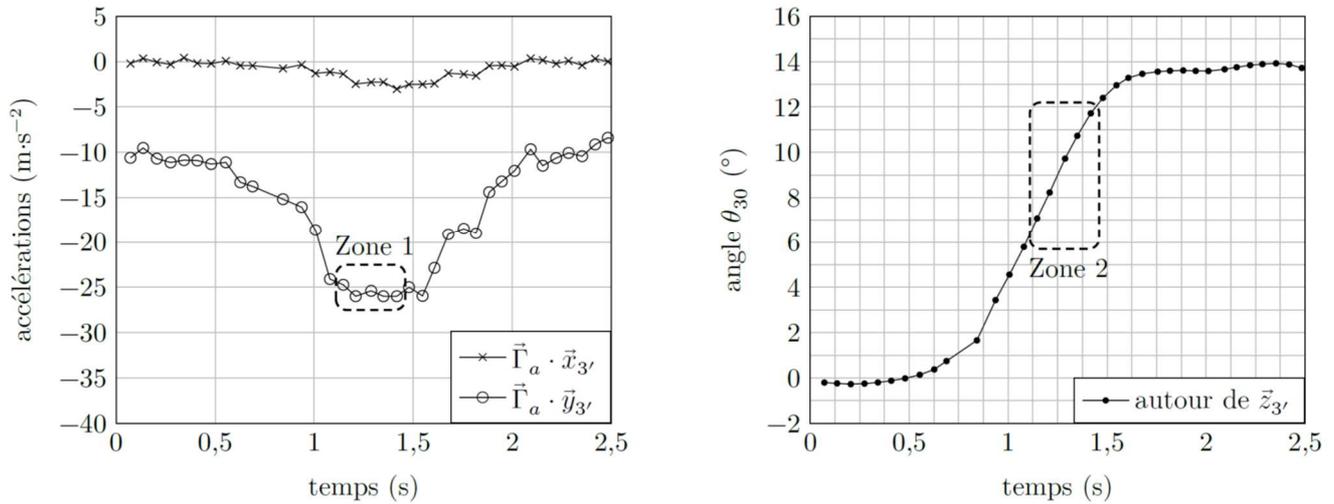


Figure 5 Graphes des accélérations et angle de tangage mesurés à bord d'un DR400

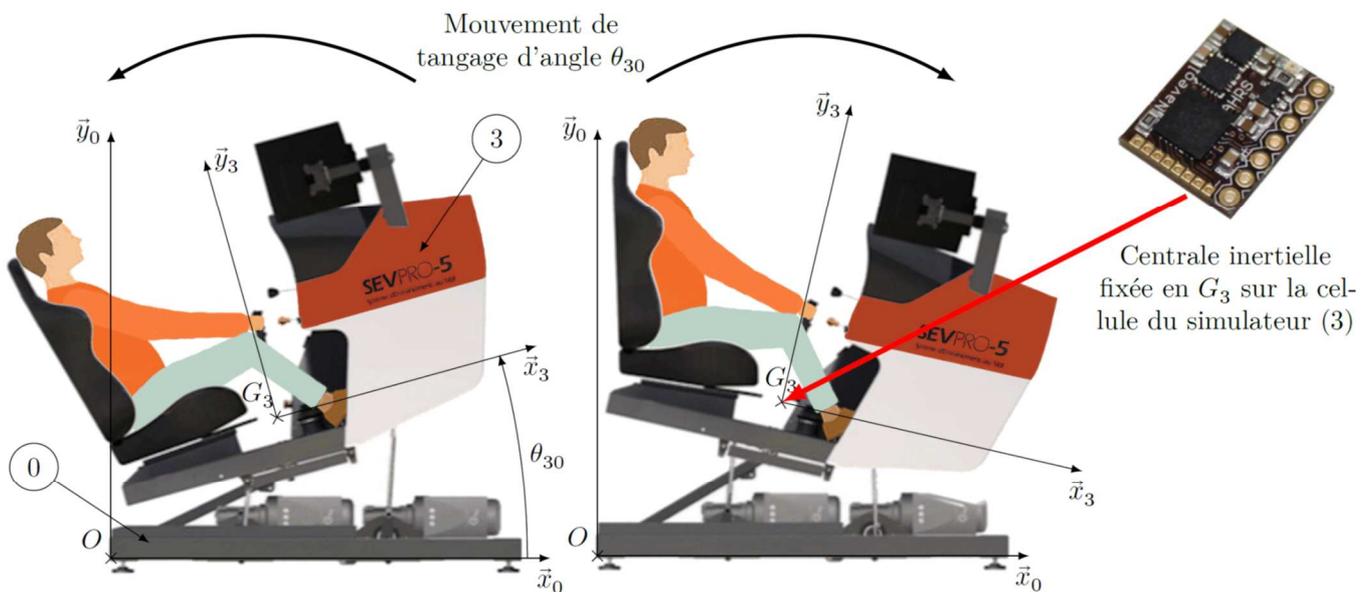


Figure 6 Mouvement de tangage de la cellule du simulateur (3) par rapport au châssis (0) de la plateforme dynamique et paramétrage associé

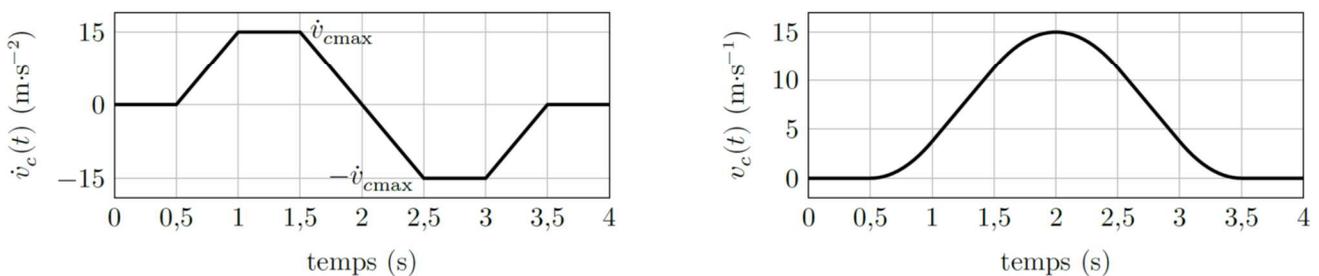


Figure 7 Consigne d'accélération \dot{v}_c envisagée (à gauche) et vitesse v_c correspondante (à droite)

Afin de soumettre l'ensemble {cellule du simulateur + pilote} à des accélérations proches de celles mesurées en vol pour l'ensemble {avion + pilote} (figure 5), la consigne d'accélération \dot{v}_c envisagée pour la cellule du simulateur est tracée sur la figure 7.

Q 5. En considérant que l'angle θ_{30} reste proche de 0 rad, montrer que la valeur $\dot{v}_{c\max} \approx 15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, valeur maximale du trapèze d'accélération $\dot{v}_c(t)$ de la figure 7, permet d'obtenir une accélération $\vec{\Gamma}_c \cdot \vec{y}_3$ proche de $\vec{\Gamma}_a \cdot \vec{y}_3'$ mesurée lors de l'essai en vol (figure 5, Zone 1). En utilisant des calculs simples d'aire, estimer l'amplitude du mouvement de translation de la cellule du simulateur suivant \vec{y}_0 , notée Δy , pour la consigne d'accélération de la figure 7. Conclure sur la capacité du simulateur de vol à restituer l'accélération mesurée dans la Zone 1 de la figure 5, compte tenu des exigences données sur la figure 3.

Compte tenu des réponses aux deux questions précédentes, le constructeur a décidé que les accélérations subies par le pilote sur le simulateur de vol ne seront finalement gérées qu'au travers de la gestion précise de l'angle θ_{30} .

II Commande d'un mouvement de tangage du simulateur de vol

En se limitant à un mouvement de tangage du simulateur de vol, la commande associée peut se représenter sous la forme du schéma de la figure 9.

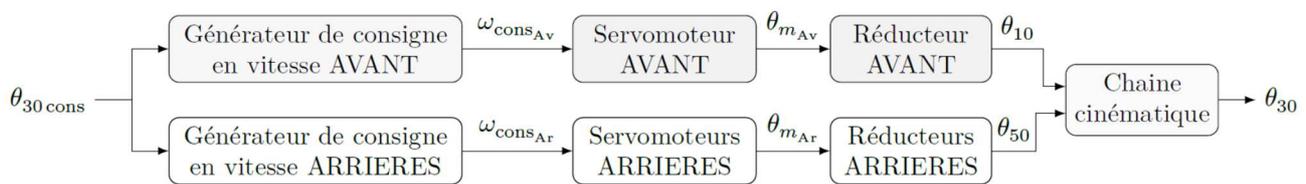


Figure 9 Schéma fonctionnel de la commande d'un mouvement de tangage

II.A – Modélisation du comportement de la chaîne cinématique

Objectif

Déterminer la loi entrée/sortie de la chaîne cinématique de la plateforme dynamique.

La plateforme dynamique permet de mouvoir la cellule du simulateur (3).

Elle est composée de trois servomoteurs identiques qui entraîne un réducteur de type roue et vis sans fin irréversible, qui transmet l'énergie à un dispositif bielle-manivelle.

Chacune des trois bielles est reliée à la cellule du simulateur (3). La liaison entre la cellule du simulateur (3) et un bras oscillant (6) est modélisée dans le plan d'étude par une liaison pivot d'axe (C, \vec{z}_0) . Le bras oscillant (6) est relié au bâti (0) à l'aide d'une liaison modélisable par une liaison pivot d'axe (E, \vec{z}_0) . Deux vérins à gaz {corps (8) + tige (9)} relient le bras oscillant (6) au bâti afin de compenser les effets de la gravité et faciliter l'action des motorisations.

On limite l'étude au modèle cinématique plan $(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0)$ donné figure C en ANNEXE. Les deux vérins à gaz sont modélisés par une seule liaison glissière de direction \vec{y}_{89} entre la tige (9) et le corps (8).

Le paramétrage associé est donné sur la figure D.

Q 10. À l'aide des fermetures géométriques des chaînes OABCEO et HIDCEH, montrer qu'il est possible d'obtenir les deux équations suivantes :

$$\begin{cases} \lambda_1(\cos \theta_{50} - \cos \theta_{10}) - \lambda_2(\sin \theta_{40} - \sin \theta_{20}) + \lambda_3(-1 + \cos \theta_{30}) = 0 \\ \lambda_1(\sin \theta_{50} - \sin \theta_{10}) + \lambda_2(\cos \theta_{40} - \cos \theta_{20}) + \lambda_3 \sin \theta_{30} = 0 \end{cases}$$

Exprimer les paramètres λ_1 , λ_2 et λ_3 en fonction des longueurs r , l et $d = d_{31} + d_{32} = d_{02} - d_{01}$.

Hypothèse relative aux dispositifs bielle-manivelle

Si $r \ll l$, alors $\theta_{20} \approx \theta_{40}$.

De plus, dans le cas d'un mouvement de tangage seul, la commande d'origine des moteurs est telle que $\theta_{10} = -\theta_{50}$ (angles définis sur la figure C) pour pouvoir maximiser les valeurs de l'angle de tangage dans les positions extrêmes des bielles (2) et (4).

Q 11. En supposant que $r \ll l$, proposer une équation approchée donnant l'expression de θ_{30} en fonction de θ_{10} et de paramètres géométriques de la figure C.

Un modèle acausal représentant la cinématique de la plateforme dynamique de la figure C a été réalisé. La figure 10 superpose les résultats de simulation du modèle acausal avec ceux correspondant à l'équation géométrique simplifiée trouvée précédemment.

Q 12. Avec un critère de corrélation de 5% (l'écart maximal admissible entre le modèle acausal et le modèle approché ne doit pas excéder 5%), l'hypothèse relative aux dispositifs bielle-manivelle est-elle pertinente ? Justifier la réponse.

Q 13. Proposer une nouvelle simplification du modèle de la cinématique de la plateforme dynamique en tangage par une linéarisation autour d'un point de fonctionnement. Justifier la réponse en s'appuyant notamment sur la variation de θ_{30} mesurée lors de l'essai en vol (figure 5).

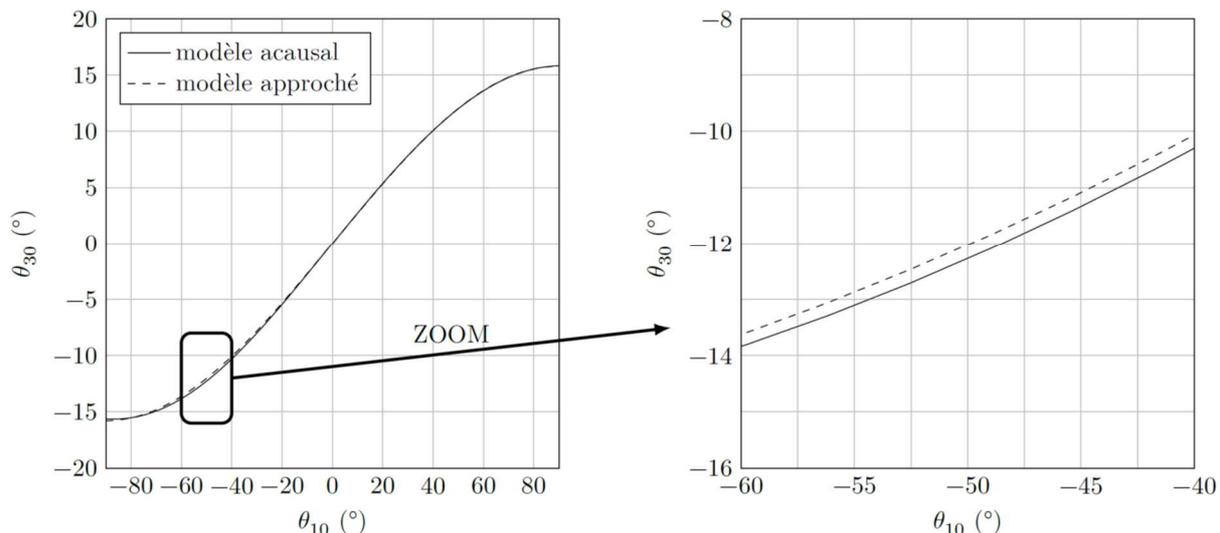


Figure 10 Comparaison entre les résultats cinématiques issus du modèle acausal et du modèle approché

II.B – Modélisation du comportement d'un générateur de consigne en vitesse

Objectif

Vérifier la pertinence de la commande en trapèze de vitesse des servomoteurs.

Afin d'éviter des sollicitations mécaniques brutales et dangereuses de la plateforme dynamique, le constructeur a choisi de piloter les moteurs à l'aide de consignes de vitesse de rotation $\omega_{cons}(t)$ de forme trapézoïdale (figure 11).

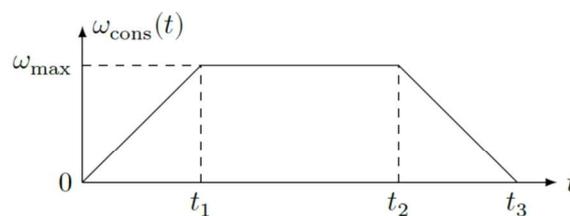


Figure 11 Loi en trapèze de vitesse

Q 14. En supposant que la vitesse angulaire du moteur $\omega_{m/0}(t)$ (en $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$) suive parfaitement l'évolution de la consigne $\omega_{cons}(t)$, déterminer l'expression de la valeur de la position angulaire de l'arbre moteur $\theta_m = \theta_{m/0}$ (en rad) en fonction de ω_{max} , t_1 , t_2 et t_3 à partir de la figure 11.

Pour maîtriser la position angulaire de l'arbre moteur $\theta_m(t)$, une solution est donc d'asservir sa vitesse angulaire $\omega_{m/0}(t)$ à une consigne de vitesse $\omega_{cons}(t)$ en forme de trapèze défini par les paramètres ω_{max} , t_1 , t_2 et t_3 .

Il est rappelé que la figure 5 correspond à des mesures effectuées dans des conditions de vol sévères pour un avion DR400.

Q 15. À partir des figures 5 (zone 2) et 10, ainsi que du rapport de transmission du réducteur utilisé ($n = \frac{\omega_{1/0}}{\omega_{m/0}} = 1/100$), montrer qu'une valeur pertinente de ω_{max} pour chaque moteur lors d'un mouvement de tangage du simulateur de vol est d'environ $120 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ (à $\pm 10 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ près) pour des angles $\theta_{30} \in [-10^\circ, +10^\circ]$.

Une centrale inertielle a été installée sur le simulateur de vol doté de la plateforme dynamique (figure 6). Les conditions de vol et les amplitudes de commande ont été identiques à celles de l'essai réalisé à bord du DR400 et les réglages effectués des correcteurs PI ont été saisis au sein des variateurs de vitesse. Les mesures obtenues dans le cas d'un mouvement de tangage seul du simulateur de vol sont données sur la figure 18.

Q 27. Estimer les écarts d'accélération mesurées suivant \vec{x}_3 et \vec{y}_3 entre le vol effectué sur DR400 (figure 5) et celui sur le simulateur de vol (figure 18) pour une même commande du mouvement de tangage. Conclure quant au respect des exigences spécifiées sur la figure 3. Comparer les échelles de temps entre les figures 5 et 18. Conclure quant à la satisfaction des pilotes qui utiliseront le simulateur de vol étudié, réglé par le constructeur.

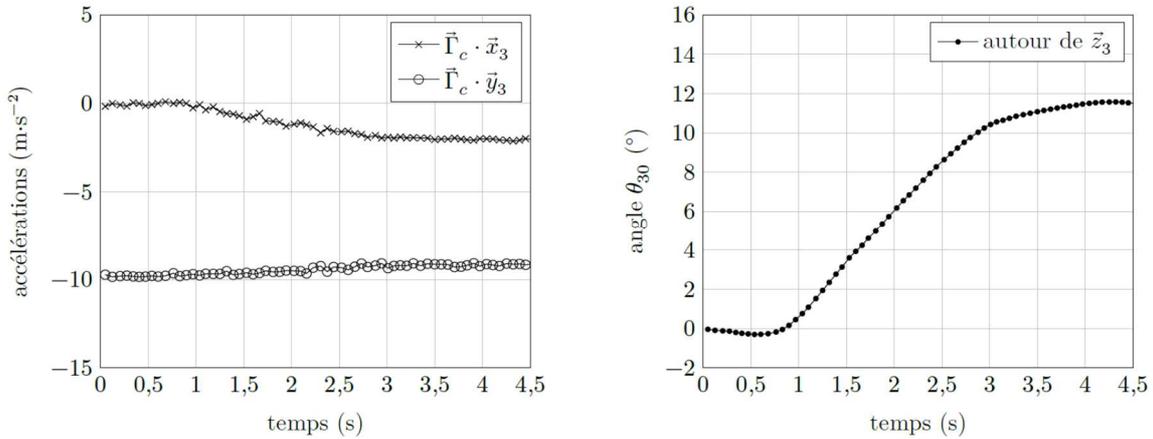


Figure 18 Graphes des accélérations et angle de tangage mesurés à bord du simulateur de vol

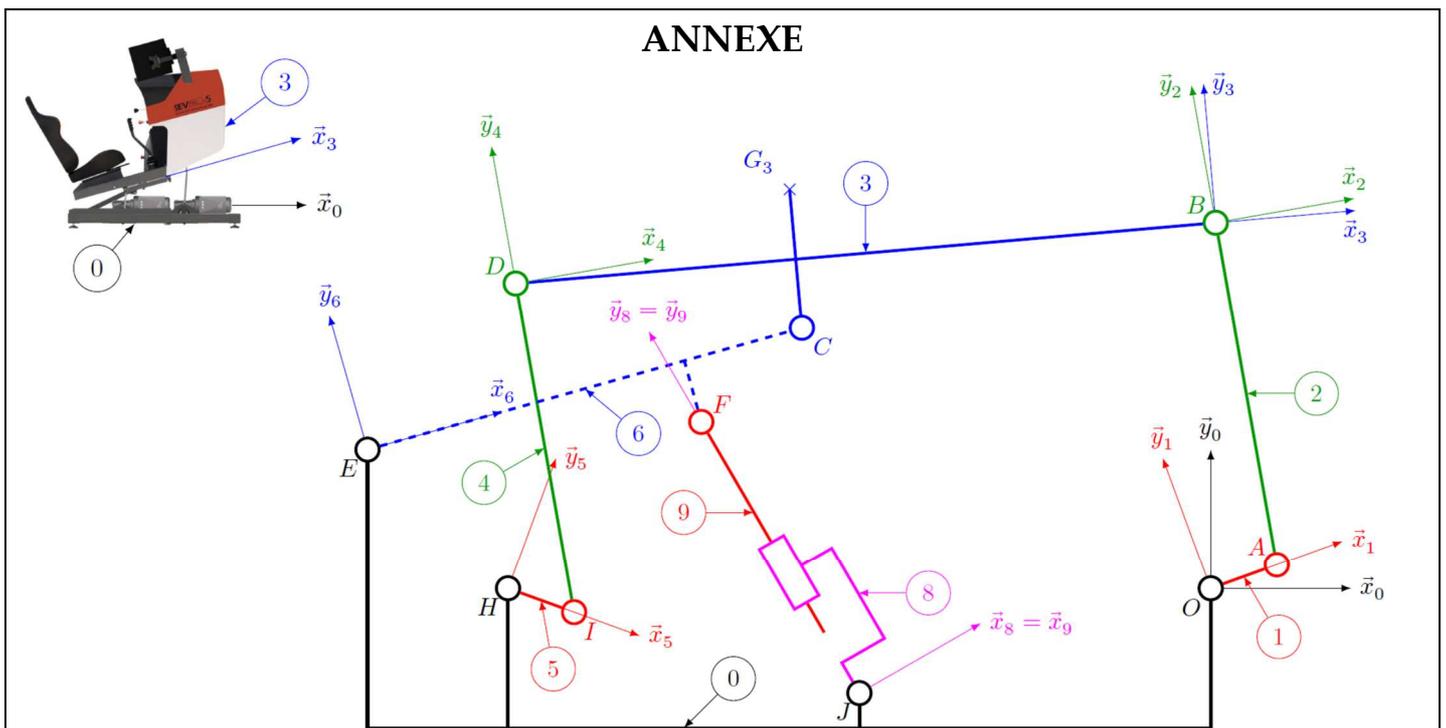


Figure C Schéma cinématique de la plateforme dynamique en modélisation plane dans le plan $(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0)$

Définition des angles de rotation de j/i	Dimensions
	$AB = ID = l$
	$EF = d_{61}\vec{x}_6 - h_6\vec{y}_6$; $EC = L\vec{x}_6$
	$HI = OA = r$
	$JF = \lambda\vec{y}_{89}$
	$DC = d_{31}\vec{x}_3 - h_3\vec{y}_3$; $CB = d_{32}\vec{x}_3 + h_3\vec{y}_3$
	$EH = d_{01}\vec{x}_0 - h_{01}\vec{y}_0$; $EO = d_{02}\vec{x}_0 - h_{01}\vec{y}_0$
	$EJ = d_{03}\vec{x}_0 - h_{02}\vec{y}_0$
	$DB = HO = d = d_{32} + d_{31} = d_{02} - d_{01}$

Figure D Repérage et paramétrage du mouvement de tangage