

DEVOIR MAISON DE SCIENCES DE L'INGENIEUR (DS1)

Evaluation des cycles :

- Cycle2 : Modéliser et simuler le comportement cinématique d'un SA
- Cycle1 : Modéliser et analyser fonctionnellement et structurellement des systèmes asservis (SA)

Support :

- **Plateforme Novadyn du Simulateur de Vol (3H)**



Consignes :

Il est fortement conseillé de **lire la totalité du sujet** avant de démarrer votre travail.

Ce sujet est accompagné d'un **document réponse à rendre avec la copie**.

L'utilisation du crayon papier est **interdite** sur la copie.

La rédaction des réponses sera **la plus concise possible** : on évitera de trop longs développements de calculs en laissant subsister les **articulations du raisonnement**.

Chaque réponse ne pourra se limiter à une suite d'expressions mathématiques sans justification.

On encadrera obligatoirement les résultats.

Le non-respect de ces consignes entraînera des points de pénalisation.

N.B. : le candidat attachera la plus grande importance à la clarté, à la précision et à la concision de la rédaction. Si un candidat est amené à repérer ce qui peut lui sembler être une erreur d'énoncé, il le signalera sur sa copie et devra poursuivre sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.

Toutes les parties sont indépendantes

Contexte et étude préliminaire

Objectif

Vérifier la pertinence économique de l'utilisation d'un simulateur de vol pour la formation des pilotes.

Selon les informations de la Fédération Française Aéronautique (FFA), il y a actuellement près de 47000 pilotes licenciés répartis dans 600 aéroclubs et environ 8000 pilotes nouvellement formés chaque année au plan national. Toutefois, la FFA cherche à augmenter le nombre de licenciés afin d'améliorer son développement et de continuer à promouvoir les activités aéronautiques.

Dans les aéroclubs français, chaque année, la formation des nouveaux pilotes est validée par deux certifications :

- le Brevet de Base (BB) qui permet de voler seul à bord d'un aéronef, au voisinage de l'aérodrome de départ ;
- la licence de pilote privé, PPL (Private Pilot Licence), titre européen qui autorise à voler dans des conditions météorologiques permettant le vol à vue. La licence PPL permet de voyager avec des passagers, sans limitation de distance et sous réserve que cela ne constitue pas une activité lucrative.



Figure 1 Simulateur de vol à plateforme dynamique

En complément d'une formation théorique spécifique, il faut avoir accompli 45 heures de vol, avec un minimum de 25 heures de vol en double commande (avec instructeur dans l'avion) et au moins 10 heures de vol en solo supervisé (avec instructeur au sol). Le reste est constitué d'heures de vol en solo (sans instructeur). Actuellement, sur les 45 heures de vol nécessaires pour la formation PPL, 5 heures de simulateur au maximum peuvent être officiellement validées comme des heures de vol en solo sur avion réel, sous réserve qu'elles soient effectuées en présence d'un instructeur et sur un simulateur de vol certifié comme celui de la figure 1.

La formation en vol traditionnelle se fait sur des avions fiables et économiques tels que le Robin DR400 (figure 4). Les tarifs pratiqués pour un vol sur DR400 sont environ de 135 €/h en vol solo et de 160 €/h avec instructeur à bord ou au sol, carburant inclus.

Les simulateurs de vol disponibles sur le marché sont constitués de deux ensembles complémentaires :

- la cellule du simulateur de base, dotée d'un ordinateur équipé d'un logiciel de simulation de vol, de trois écrans panoramiques ainsi que des commandes de vol, de type manche et palonniers, avec ou sans retour d'efforts ;
- la plateforme dynamique qui met en mouvement la cellule du simulateur. Commandée par le logiciel de simulation de vol, la plateforme dynamique permet de faire ressentir au pilote des sensations proches de celles du vol à bord d'un avion réel.

Les aéroclubs souhaitent se doter de tels simulateurs afin de diminuer le cout de la formation et aussi d'inciter davantage de personnes à se lancer dans l'aventure aéronautique. Il faut prévoir environ 35 €/h pour une utilisation en solo du simulateur de vol et 60 €/h pour une utilisation avec instructeur.

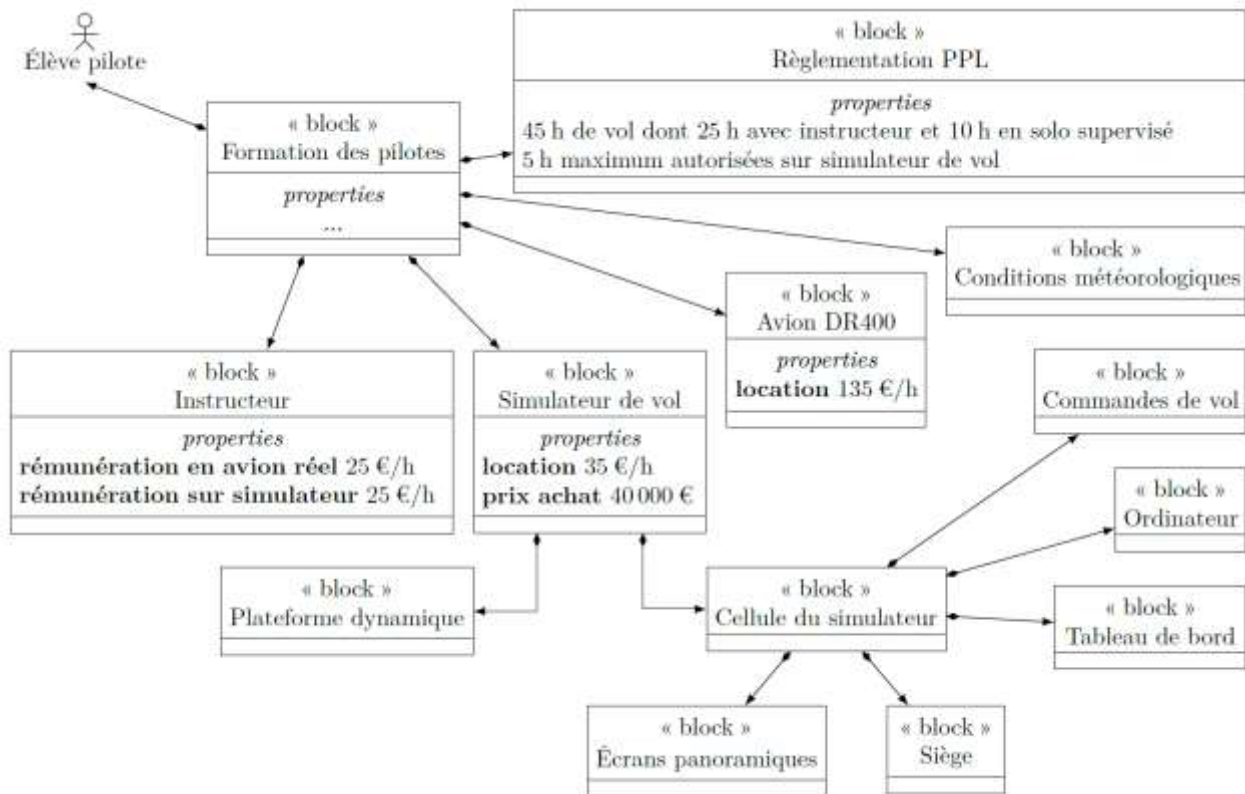


Figure 2 Contexte économique de la formation des pilotes

Certaines phases de la formation telles que l'entraînement au vol sans visibilité ou la compréhension et l'utilisation des instruments de radionavigation sont plus efficaces sur un simulateur que dans un avion réel. En effet, il est plus aisé pour un instructeur de former le pilote sur un simulateur lors de ces phases car il n'y a pas la gêne du bruit de l'avion réel et il y a la possibilité de mettre la simulation en pause afin de donner des explications tant sur l'analyse de la situation de vol que sur le comportement à adopter.

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.

Question 1. À l'aide des figures 2 et 3 :

- **calculer** le cout minimal de la formation en vol traditionnelle d'un élève pilote pour la licence PPL (c'est-à-dire uniquement à l'aide de vols en avion réel de type DR400) ;
- **calculer** le cout minimal de la formation multi-modale d'un élève pilote pour la licence PPL (c'est-à-dire à l'aide de vols en avion réel de type DR400 et sur simulateur de vol) ;
- en **déduire** l'économie substantielle faite par l'élève pilote, exprimée en pourcentage du cout d'une formation uniquement sur avion réel ;
- **conclure** quant à la pertinence de l'usage du simulateur de vol dans la formation PPL du point de vue de l'économie financière attendue par les futurs nouveaux pilotes et exprimée dans les exigences de la figure 3.

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.

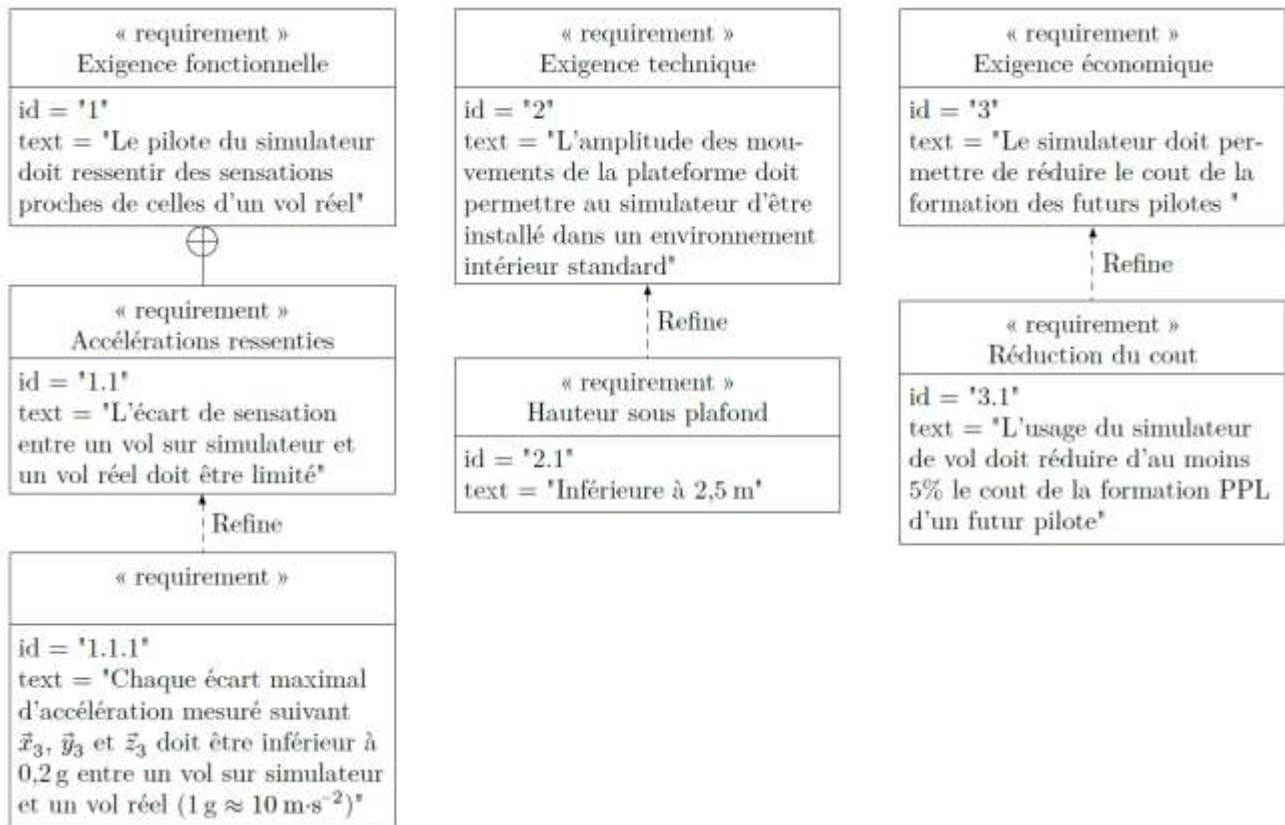


Figure 3 Diagramme des exigences partiel du simulateur de vol

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.

L'étude proposée se décompose en trois parties :

- une première partie consiste à analyser des mesures d'accélération en vol sur un ROBIN DR400 lors d'un mouvement de tangage et à conclure sur la possibilité de recréer ces accélérations sur le simulateur ;
- une seconde partie consiste à justifier les choix d'architecture du simulateur ainsi que les limites de l'étude ;
- une troisième partie consiste à améliorer les performances en terme d'accélérations mesurées sur la plateforme en agissant sur la commande de sa motorisation.

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 $R_{3'}(O, \vec{x}_{3'}, \vec{y}_{3'}, \vec{z}_{3'})$ est liée au solide ($3'$). L'accélération $\vec{\Gamma}_a$ mesurée par la centrale inertielle installée au voisinage de G_3 , s'exprime par :

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

$$\vec{\Gamma}_a = -\vec{\Gamma}_{G3',3'/0} - g\vec{y}_0 = \begin{pmatrix} -v_a - g \sin \theta_{30} \\ -v_a \dot{\theta}_{30} - g \cos \theta_{30} \\ 0 \end{pmatrix}_{R_{3'}}$$

Vous comprendrez dans le cycle 02 comment obtenir ce vecteur accélération.

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 $\vec{V}_{G_3' \in 3' / 0} = v_a \vec{x}_{3'}$.

Question 2. De nombreux systèmes, tels que votre Smartphone, possèdent une centrale inertielle mais quand est-il de son principe de fonctionnement ? **Décrire** comment fonctionne une centrale inertielle ?

La vitesse indiquée par le pilote lors de l'essai en vol était d'environ $v_a \approx 187 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

Question 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 en calculant l'écart relatif entre la simulation et le réel.

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

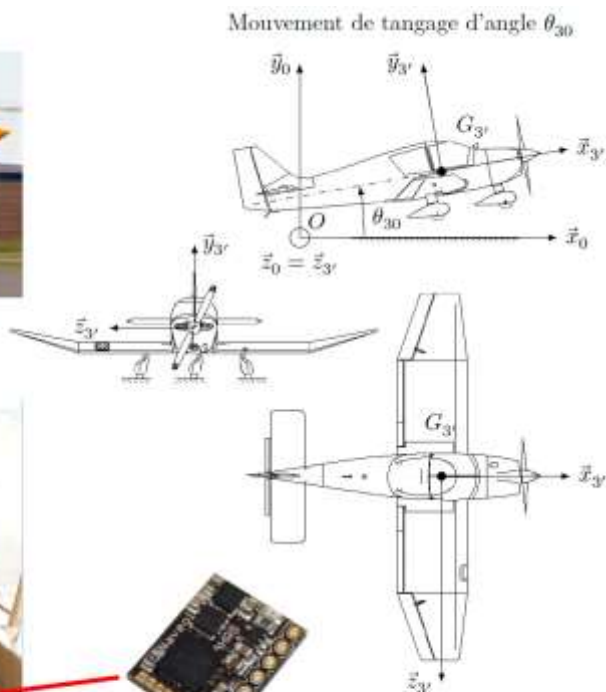
Faire ressentir au pilote assis sur le simulateur de vol des accélérations identiques à celles mesurées en vol réel pose la question des mouvements à imposer à l'ensemble {cellule du simulateur + pilote} modélisé comme un solide indéformable noté (3), de centre d'inertie G_3 (figure 6). La base $R_3(\vec{x}_{3'}, \vec{y}_{3'}, \vec{z}_{3'})$ 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, \vec{z}_0) avec $\vec{\Omega}_{3/0} = \vec{\Omega}_{3'/0} = \dot{\theta}_{30} \cdot \vec{z}_0$;
- Une translation suivant \vec{y}_0 avec $\vec{V}_{G_3 \in 3/0} = v_c \cdot \vec{y}_0$



DR400 en mouvement de tangage



Poste de pilotage

Centrale inertielle fixée entre les deux sièges avant en G_3

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

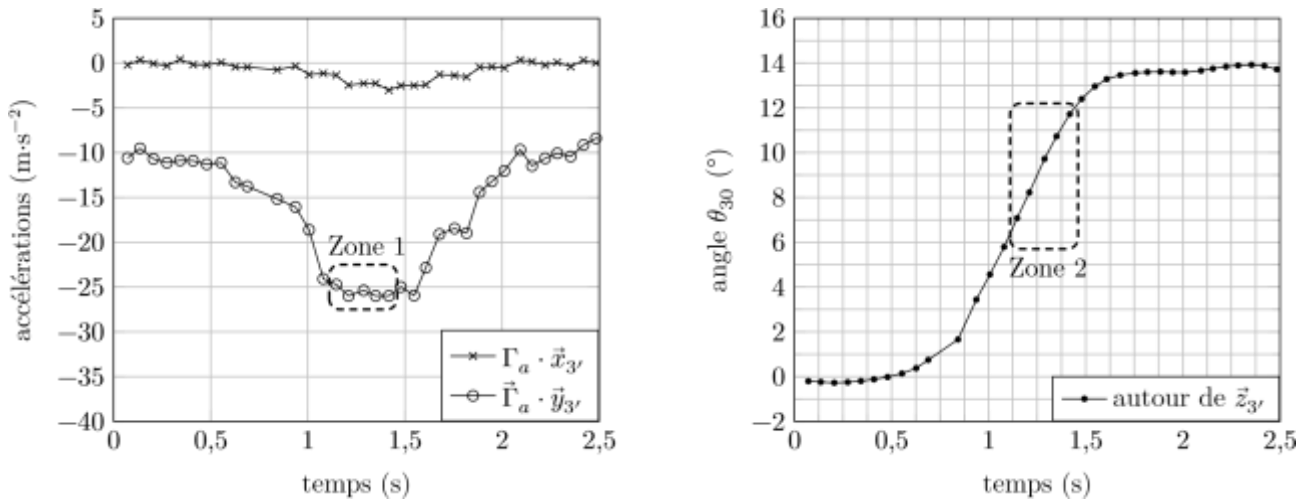


Figure 5 Graphes des accélérations et angle de tangage mesurés à bord d'un DR400

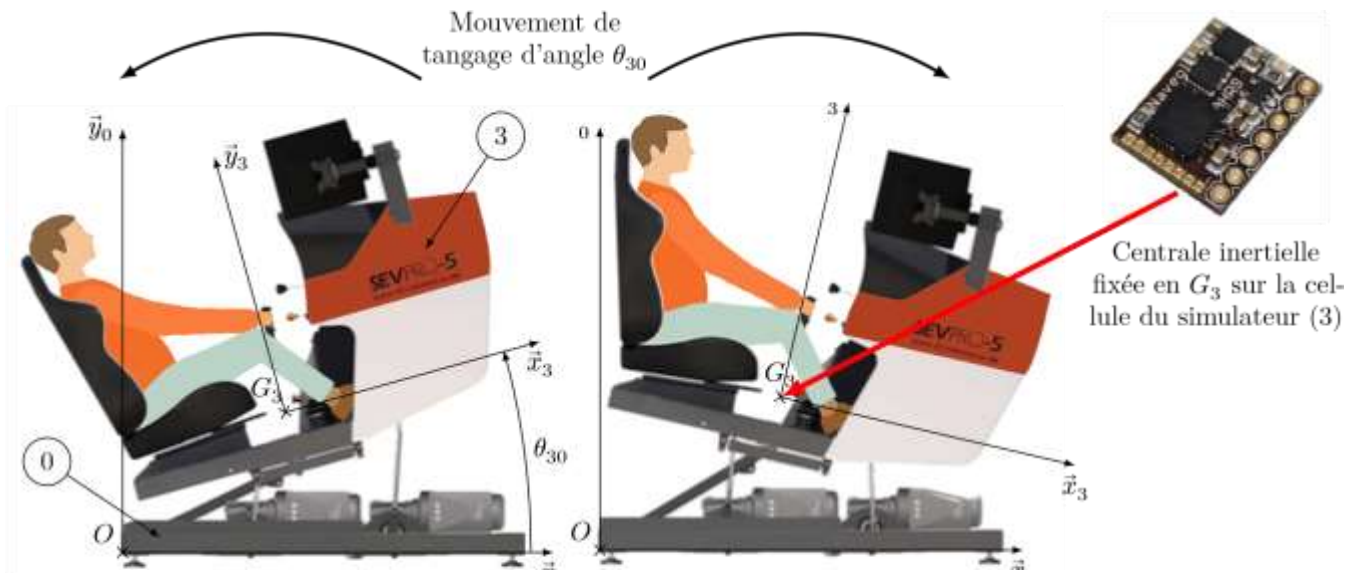
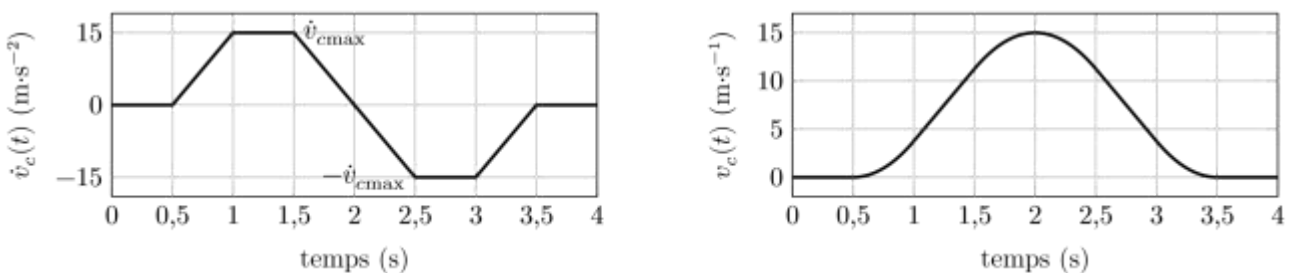


Figure 6 Mouvement de tangage de la cellule du simulateur (3) par rapport au châssis (0) de la plateforme dynamique et paramétrage associé



II Architecture et conception de la plateforme dynamique

Objectif

Déterminer les paramètres angulaires à imposer afin d'obtenir un mouvement de tangage seul du simulateur de vol, puis justifier l'utilisation de vérins à gaz et de réducteurs irréversibles au sein de la plateforme dynamique.

La plateforme dynamique (figure A du document réponse) permet de mouvoir la cellule du simulateur (3). Elle est composée de trois servomoteurs identiques qui sont constitués d'une machine électrique, d'un codeur incrémental et d'un variateur de vitesse intégré (figure B). Afin d'améliorer la compacité du système ainsi que son entretien, le constructeur a choisi d'utiliser des machines synchrones pour les chaînes de motorisation. Les machines synchrones utilisées sont à aimants permanents et à stators bobinés. Chaque machine électrique 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) par un guidage sphérique.

La cellule du simulateur (3) est reliée à un bras oscillant (6) par l'intermédiaire d'un joint de Cardan. 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. Sur le modèle plan de la figure C, 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), ainsi qu'un ressort de compression (non représenté) entre ces deux mêmes solides, qui exerce un effort sur (8) et sur (9).

Les liaisons et paramètres géométriques sont les suivants (figures A et C du document réponse) :

- la liaison pivot d'axe $(E, \vec{z}_0 = \vec{z}_6)$ entre le bras oscillant (6) et le bâti (0) est paramétrée par l'angle $\theta_{60} = (\vec{x}_0, \vec{x}_6) = (\vec{y}_0, \vec{y}_6)$;
- le joint de Cardan entre la cellule du simulateur (3) et le bras oscillant (6) est modélisable par une liaison sphérique à doigt de centre C, interdisant la rotation autour de (C, \vec{y}_3) . Les mouvements de (3) par rapport à (6) sont paramétrés par les angles θ_{x36} et θ_{z36} comme indiqué sur la figure 8.



Figure 8 Rotations de (3) par rapport à (6)

Question 4. A partir de la description faite ci-dessus, veuillez proposer une chaîne fonctionnelle complète qui tient compte pour la chaîne de puissance du fait qu'il y a 3 moteurs et pour la chaîne d'information, qu'une seule consigne.

Question 5. Compte tenu de la masse importante de l'ensemble {cellule du simulateur + pilote}, justifier d'un point de vue énergétique l'intérêt d'avoir choisi des réducteurs irréversibles lorsque le système n'est pas en mouvement.

III 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

Objectif

Modéliser le comportement de chaque bloc du schéma fonctionnel de la figure 9 en vue de simuler et vérifier les performances du simulateur de vol lors d'un mouvement de tangage.

III.A – Modélisation du comportement de la chaîne cinématique

Objetif

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

Il est possible de limiter l'étude au modèle cinématique plan $(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0)$ de la chaîne cinématique qui est donné sur la figure C. Le paramétrage associé est donné sur la figure D. La liaison sphérique à doigt entre (3) et (6) est modélisée dans le plan d'étude par une liaison pivot d'axe (C, \vec{z}_0) .

Question 6. À l'aide des fermetures géométriques des chaînes OABCEO et HIDCEH, **montrer** qu'il est possible d'obtenir les deux équations suivantes :

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

Système d'équations dans lequel vous pourrez **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).

Question 7. En supposant que $r \ll l$, **proposer** une équation approchée donnant l'expression de θ_{30} en fonction de θ_{10} et des paramètres géométriques de la figure C.

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

Question 8. Avec un critère de corrélation de 5% (l'écart maximal admissible entre le modèle numérique et le modèle approché ne doit pas excéder 5%), l'hypothèse relative aux dispositifs bielle-manivelle **est-elle pertinente** ? **Justifier** la réponse.

Question 9. **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).

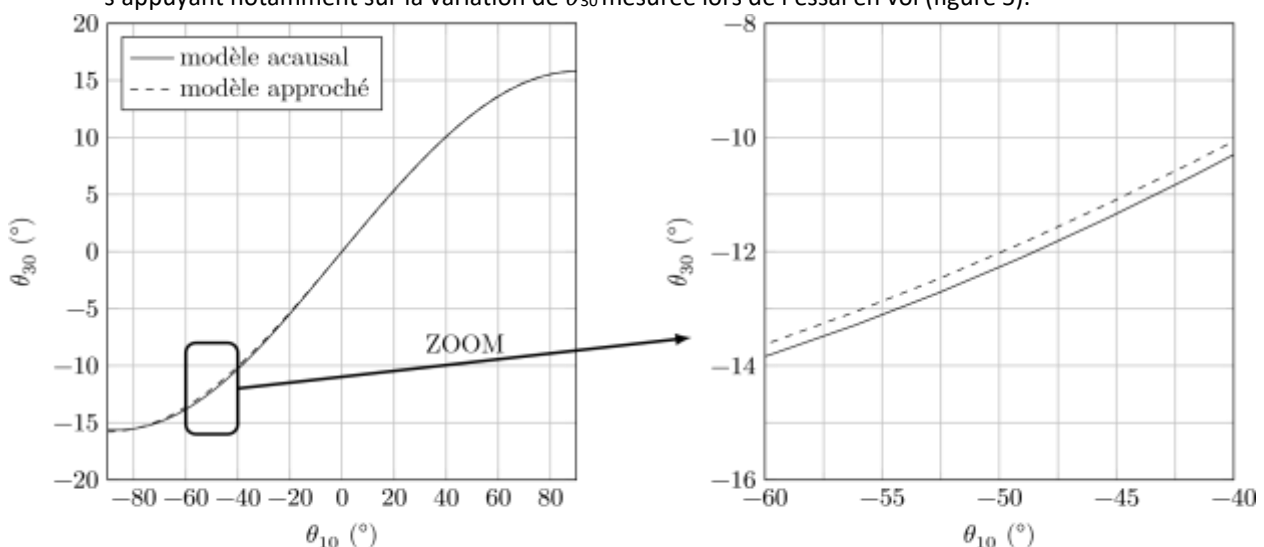


Figure 10 Comparaison entre les résultats cinématiques issus du modèle acausal et du modèle approché

III.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).

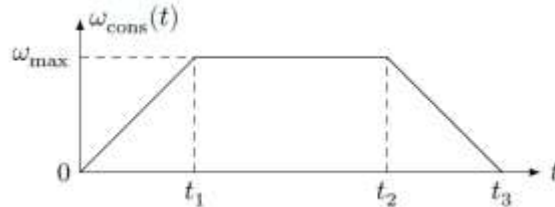


Figure 11 Loi en trapèze de vitesse

Question 10. En supposant que la vitesse angulaire du moteur $\omega_{m/o}(t)$ (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 $\theta_m = \theta_{m/o}$ (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 $\omega_{m/o}(t)$ à une consigne de vitesse $\omega_{cons}(t)$ en forme de trapèze définie par les paramètres ω_{max} , t_1 , t_2 et t_3 .

Généralement, ω_{max} , t_1 , et $t_3 - t_2$ sont des paramètres fixes réglés une fois pour toutes au sein du variateur de vitesse qui gère le fonctionnement de la machine synchrone et qui inclut notamment le générateur de consigne de vitesse trapézoïdale, le correcteur et l'onduleur (transforme un signal continu constant en signal sinusoïdal à fréquence variable) (figure 15). Ainsi donner une valeur à t_2 revient à fournir une consigne de position angulaire au servo-moteur.

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

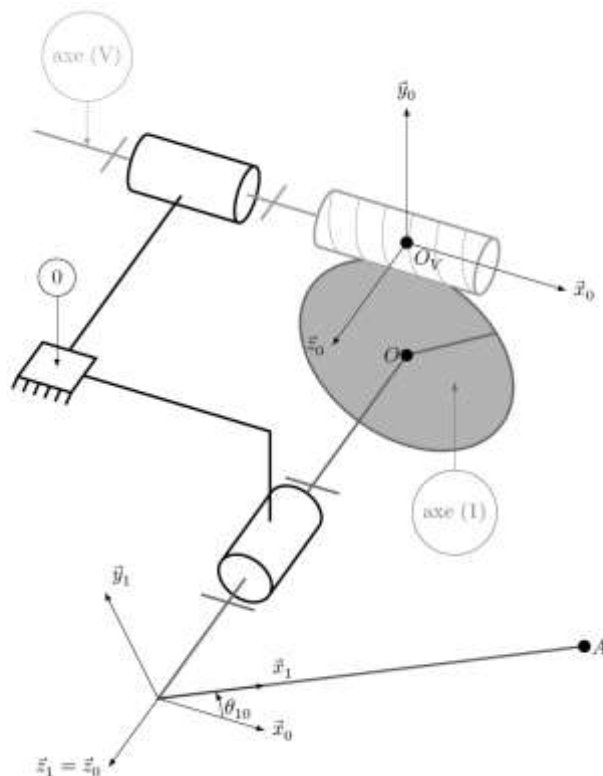


Figure 13 Modélisation cinématique de la chaîne de transmission AVANT

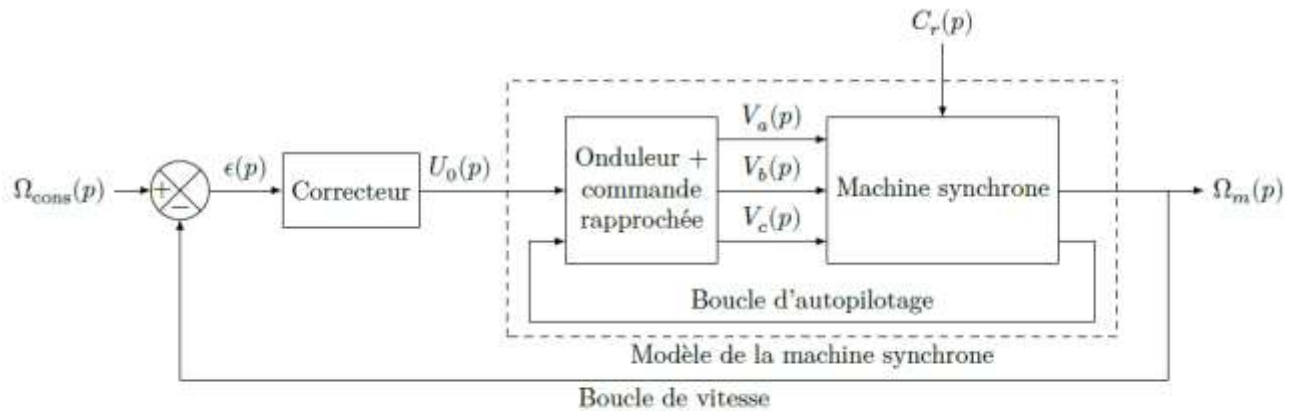


Figure 15 Modèle de l'asservissement en vitesse de la machine synchrone autopilotée

IV Synthèse

Objectif

Vérifier que les performances imposées par l'extrait du cahier des charges donné sur le tableau de la figure 16 sont vérifiées par le modèle d'asservissement de vitesse de la machine synchrone autopilotée et modifier le réglage d'un correcteur le cas échéant.

Critère	Valeur
Temps de réponse à 5% pour une entrée en Rampe	≤ 500 ms
Écart statique pour une entrée en Rampe	nul

Figure 16 : Tableau extrait du cahier des charges

Le correcteur dimensionné précédemment a été implanté dans le modèle de la figure 15 ainsi qu'un modèle réaliste du couple de frottement C_0 à partir des résultats obtenus expérimentalement. Une simulation numérique de l'une des chaînes d'asservissement a permis d'obtenir l'évolution de la vitesse d'un des moteurs du simulateur de vol dans le cas d'une consigne de tangage analogue à celle mesurée sur la figure 5 et pour les paramètres du variateur de vitesse réglés par le constructeur. Les résultats de la simulation sont donnés sur la figure 17.

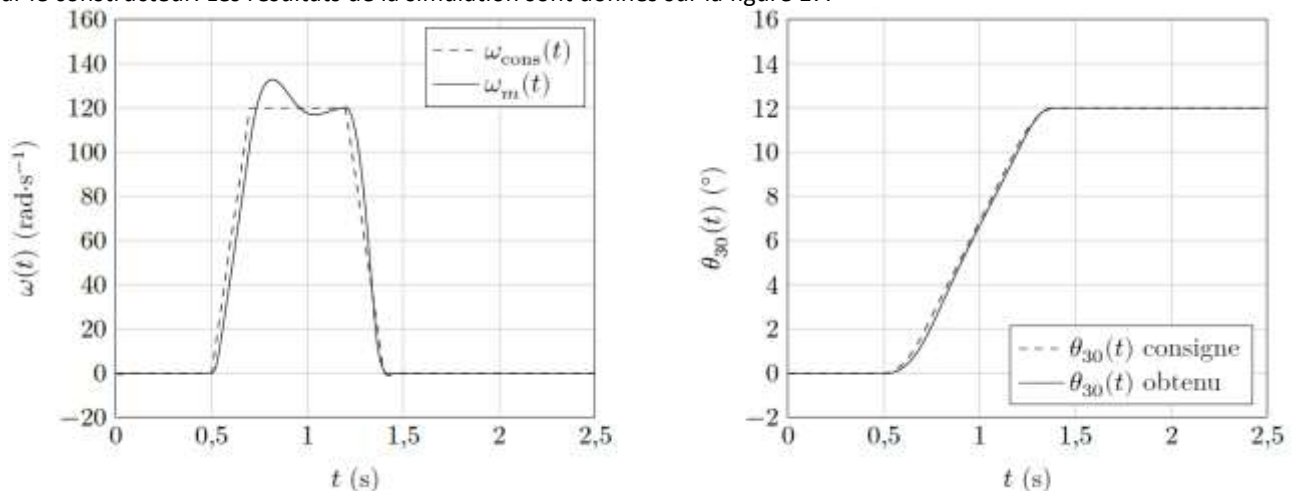


Figure 17 Consigne en trapèze de vitesse et réponse du modèle de l'asservissement de vitesse optimisé des servomoteurs du simulateur de vol

Question 11. En s'appuyant sur la figure 17, **conclure** quant à la qualité (précision, stabilité, rapidité) du réglage de l'asservissement de vitesse des moteurs, sachant que la consigne correspond à celle définie à la question 15 pour des conditions sévères de vol d'un DR400.

Afin d'éviter le décrochage magnétique des moteurs synchrones, c'est-à-dire une rupture brutale de la transmission du couple lorsqu'une trop forte accélération est demandée au niveau de l'arbre moteur, le constructeur a été obligé d'augmenter les valeurs des paramètres t_1 et $t_3 - t_2$ (figure 11) par rapport à celles prises dans la simulation de la figure 17.

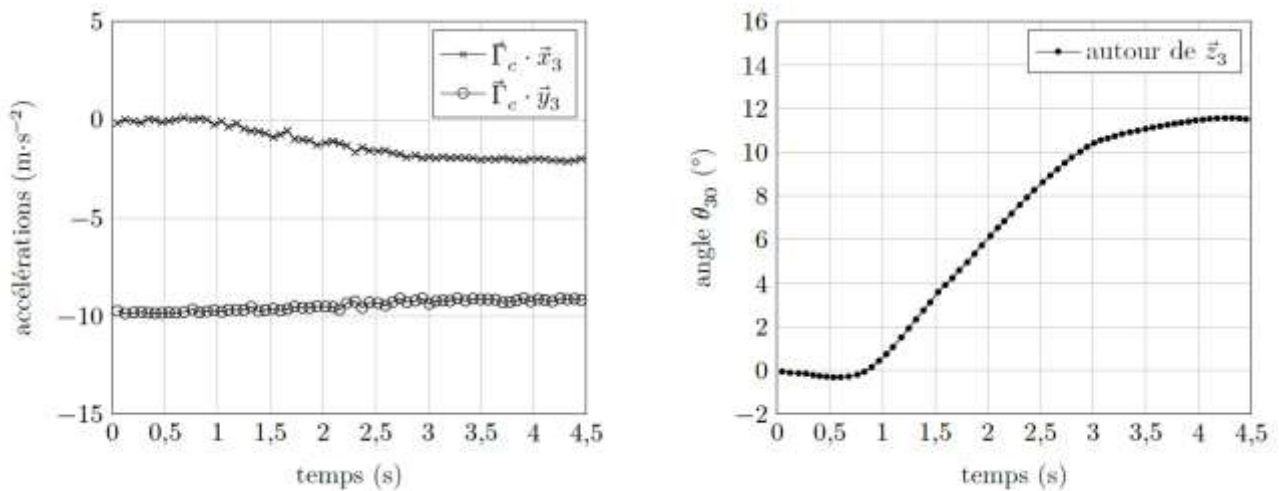
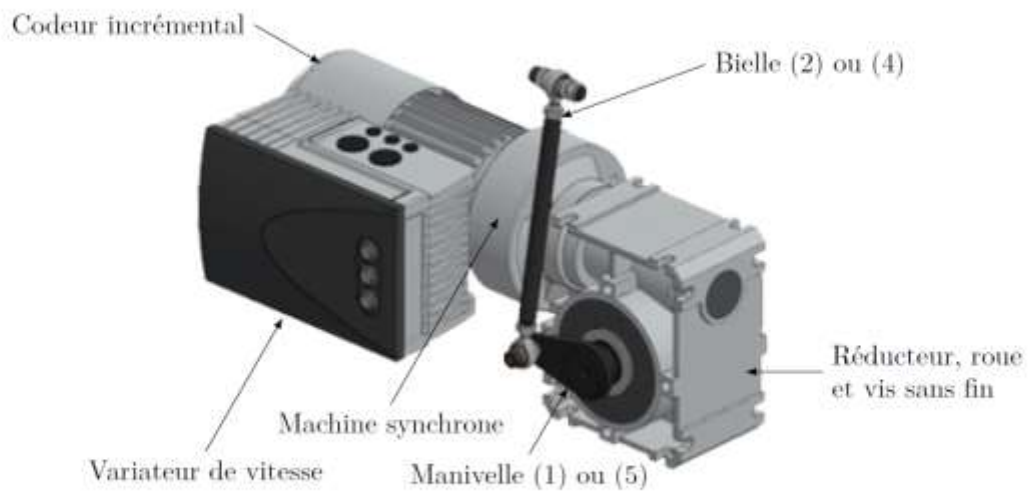
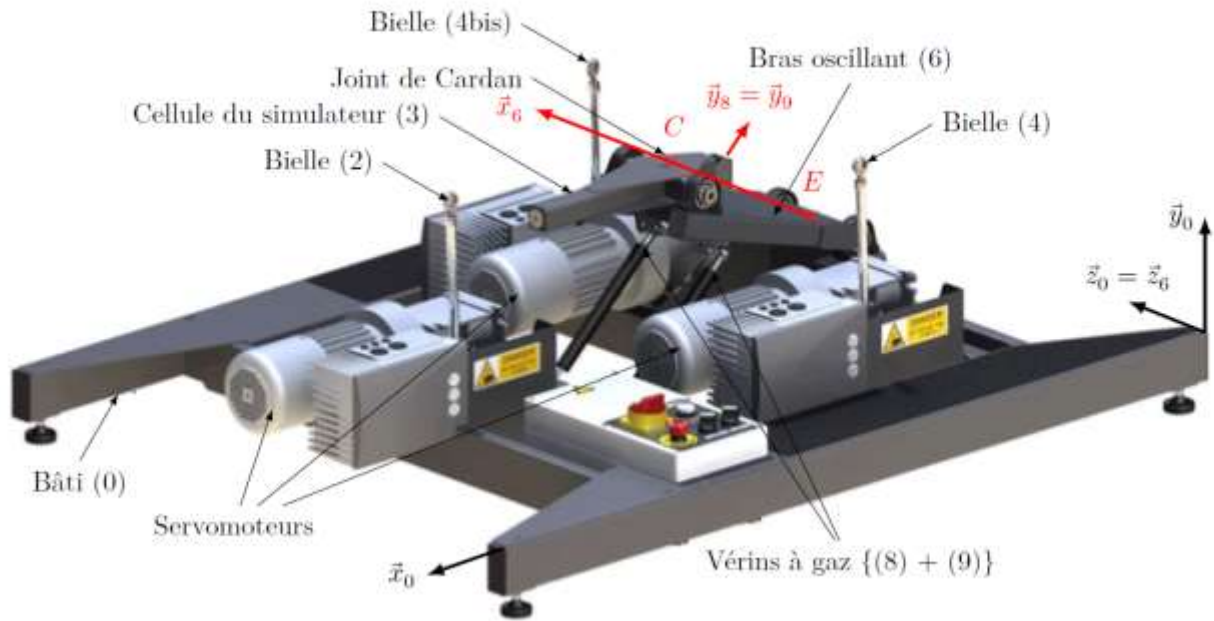


Figure 18 Graphes des accélérations et angle de tangage mesurés à bord du simulateur de vol

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.

Question 12. Estimer les écarts d'accélérations mesurées suivant x_3 et 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.

Question 13. **Conclure** quant à la satisfaction des pilotes qui utiliseront le simulateur de vol étudié, réglé par le constructeur.



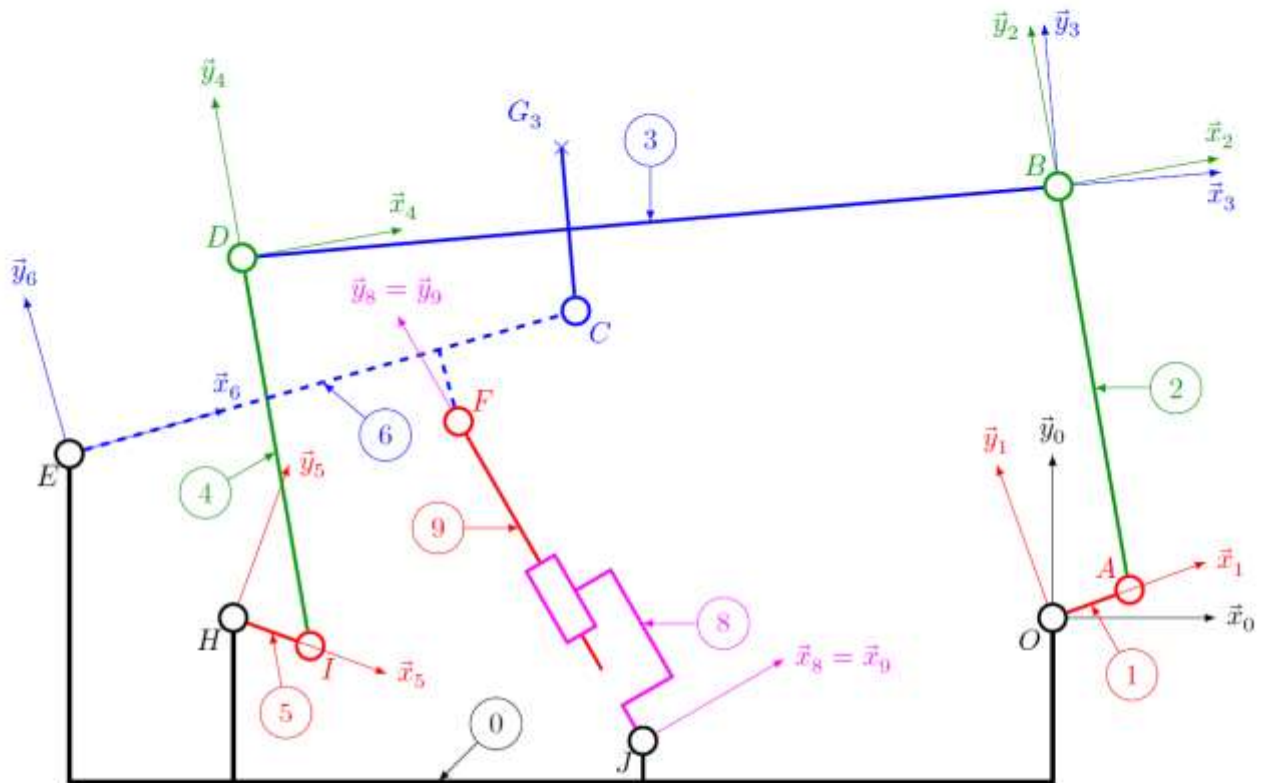
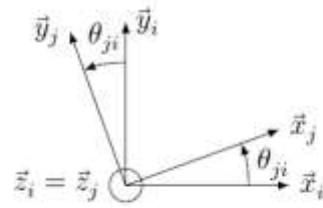
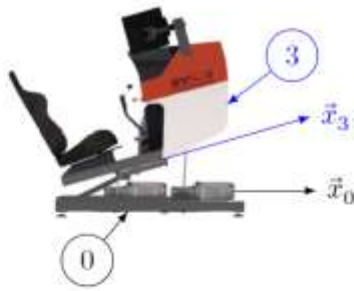


Figure C Schéma cinématique de la plateforme dynamique en modélisation plane dans le plan $(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0)$

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

Figure D Repérage et paramétrage du mouvement de tangage

