

DS N°4

Aucun document autorisé

Calculatrices autorisées

Le devoir comporte 1 problème et 1 exercice extraits de sujets de concours

Durée 3h

Problème : L'inverseur de poussée eTras (extrait Mines MP 2024)

1-Présentation

L'industrie aéronautique est en constante évolution. Un des axes de développement majeur de cette industrie est l'électrification des avions. L'objectif principal est de supprimer la présence des énergies hydrauliques et pneumatiques au sein de l'avion pour des raisons économiques et écologiques. En effet, les actionneurs électriques ayant un rapport poids/puissance plus intéressant que des actionneurs hydrauliques, cela permet de diminuer l'impact environnemental de l'avion en phase d'utilisation.

Le système étudié, appelé inverseur de poussée, est un dispositif utilisé dans le domaine de l'aéronautique commerciale ou privée permettant de contribuer au freinage d'un avion lors de sa phase d'atterrissage sur piste. Ce dispositif de freinage est intégré dans la nacelle de l'avion représentée sur la Figure 1.



Nacelle fermée
Inverseur de poussée non activé

Nacelle ouverte
Inverseur de poussée activé

Figure 1 : Nacelle complète du groupe SAFRAN et mise en évidence d'un inverseur de poussée activé sur une nacelle lors d'un atterrissage.

L'eTras® - Electrical Thrust Reverser Actuation System - est le premier système de commande électrique d'inverseur de poussée, permettant ainsi de s'affranchir, de la présence de circuit hydraulique dans cette zone critique du moteur.

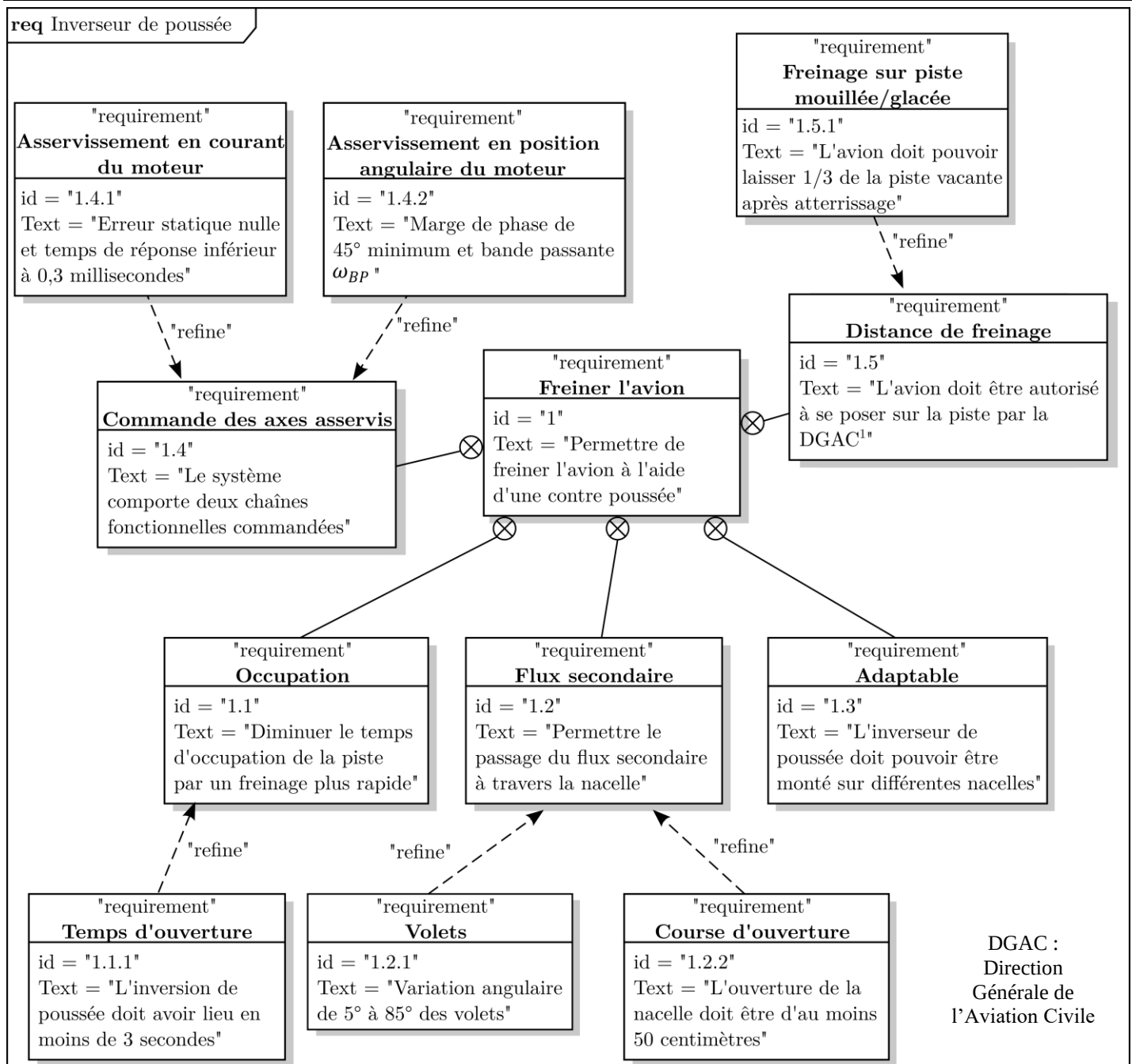


Figure 2 : Diagramme des exigences de l'inverseur de poussée l'eTras®.

2-Mise en situation du système étudié avec comparaison aux autres systèmes de freinage

Objectif : Évaluer la pertinence de l'inverseur de poussée dans la phase de freinage d'un avion de ligne sur piste mouillée ou glacée.

L'inverseur de poussée est utilisé sur des turboréacteurs mais n'agit que sur le flux d'air secondaire (froid). Cet inverseur de conception simple et modulable est adaptable à tout type de turboréacteur.

L'inversion de poussée est obtenue grâce à la déviation du flux d'air secondaire.

En position fermée (partie haute de la Figure 3), les parties fixe et mobile de la nacelle sont jointes et les volets sont intégrés dans la partie mobile. Le flux d'air secondaire s'écoule normalement.

En position ouverte, le déplacement de la partie mobile de la nacelle entraîne le déplacement des volets. Ces derniers viennent dévier le flux d'air secondaire et l'oblige à sortir par l'orifice ainsi créé par la translation de la partie mobile de la nacelle. La partie mobile munie d'un béquet déflecteur dirige le flux vers l'avant créant ainsi un effet de "reverse". L'inversion ne se faisant que sur le flux secondaire, la contre-poussée devra être importante pour annuler l'effet du flux primaire qui n'est pas inversé.

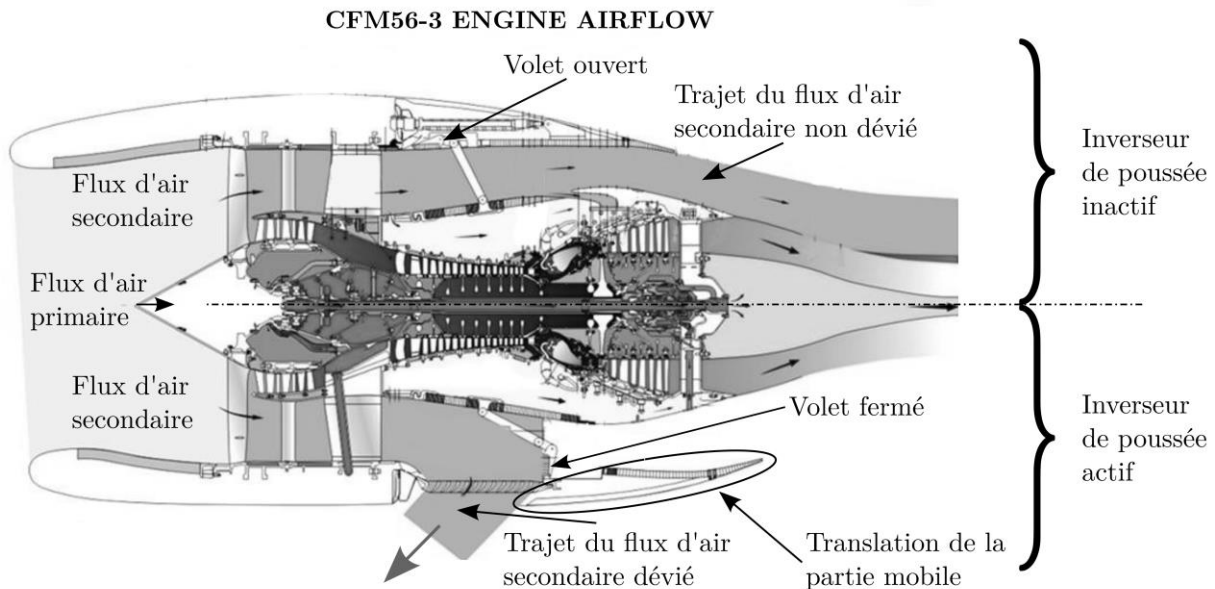


Figure 3 : Fonctionnement d'un inverseur de poussée, inverseur inactif (volets ouverts) sur la partie supérieure et actif (volets fermés) sur la partie inférieure.

L'étude suivante permet de mettre en évidence l'intérêt d'utiliser un ensemble de moyens de freinage pour un avion de ligne. L'avion de type Airbus A380 dispose du système eTras® de Safran. Cet A380 doit atterrir sur la piste glacée de l'aéroport de Paris-Charles de Gaulle dont la longueur est de 2700m. Lors de l'atterrissage, l'Airbus A380 pèse au maximum 400 tonnes et sa vitesse lors de la mise en contact avec la piste est supposée être de 260 km.h^{-1} .

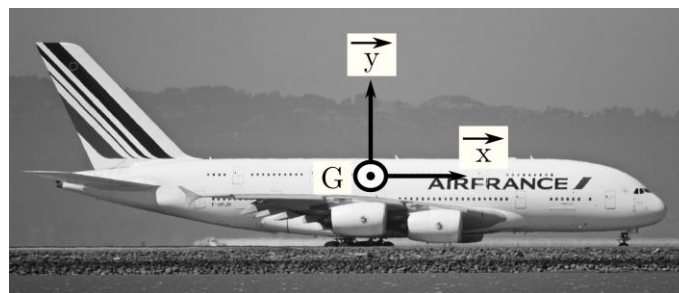


Figure 4 : Schéma d'étude - A380 en phase de freinage.

Pour simplifier cette première étude, les hypothèses suivantes seront considérées :

- la trajectoire est rectiligne de direction $\vec{x}$;
- il y a symétrie par rapport au plan vertical noté $(G, \vec{x}, \vec{y})$, plan de symétrie de l'avion ;
- l'action de la piste P sur chacune des 22 roues (20 arrières, 2 avant) R_i est modélisable, au point de contact I_i , par le vecteur : $\vec{R}_{(P \rightarrow R_i)} = T_i \vec{x} + N_i \vec{y}$ où N_i est la composante normale et T_i la composante tangentielle. Ces actions sont **supposées constantes** pendant toute la phase de freinage ;
- l'étude se fera en supposant que les roues sont bloquées par rapport à la carlingue de l'avion. De plus, les roues glissent sur la piste d'atterrissage ;
- on modélise l'action de l'air sur l'avion par une force aérodynamique appliquée en G : $\vec{F}_a = -\frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot C_x \cdot v^2 \vec{x}$ où v est la norme de la vitesse du centre de gravité de l'avion et ρ la masse volumique de l'air, S et C_x des coefficients de liés à la forme de l'avion.

On note :

- $\vec{a}_{(G, avion/P)} = a \vec{x}$, le vecteur accélération du centre de gravité G de l'avion par rapport au repère terrestre supposé galiléen ;
- f : le facteur de frottement des pneus sur la piste glacée. Ce facteur f est supposé constant et identique pour chaque roue ;
- g : accélération de la pesanteur $g = 10 \text{ m.s}^{-2}$.

Données	Valeurs
Longueur de la piste d'atterrissage : L	2700 m
Facteur de frottement sur pistes glacées : f	0,1
Masse d'un A380 : M	400 tonnes
Vitesse atterrissage d'un A380 : V_a	260 km.h ⁻¹

L'utilisation du théorème de la résultante dynamique appliqué à l'avion en phase de freinage permet d'obtenir l'expression de l'accélération (négative ici) suivante :

$$a(t) = -f \cdot g - \frac{1}{2M} \cdot \rho \cdot S \cdot C_x \cdot v(t)^2$$

L'utilisation du théorème de l'énergie cinétique sous forme intégrée entre l'instant initial et l'instant final (arrêt de l'avion) noté T donne la relation suivante :

$$\underbrace{-f \cdot M g \int_0^T v(t) \cdot dt}_{Wf} - \underbrace{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot C_x \cdot \int_0^T v(t)^3 \cdot dt}_{Wa} = E_c(T) - E_c(0) = 0 - \frac{1}{2} \cdot M \cdot V_a^2$$

La variation d'énergie cinétique totale est égale à la somme de deux termes, le travail des actions de frottement au contact roues/piste noté Wf et le travail des actions aérodynamiques noté Wa .

Q1. Calculer numériquement en Joule (U.S.I.), l'énergie cinétique totale à dissiper au cours de l'atterrissage :

$$\Delta E_c = E_c(T) - E_c(0)$$

On souhaite maintenant déterminer numériquement l'évolution de la vitesse de l'avion en fonction du temps pour pouvoir quantifier par la suite l'apport de chacun des travaux (action de frottement et action aérodynamique) dans la phase de freinage. On supposera que l'expression de la décélération est de la forme suivante :

$$\begin{cases} a(t) = A_0 + A_1 \cdot v(t)^2 \\ v(t=0) = v_0 \end{cases} \quad \text{Où } A_0 \text{ et } A_1 \text{ sont des constantes.}$$

Q2. Donner les expressions des deux constantes A_0 et A_1 . Sachant que C_x est un coefficient sans dimension, en déduire l'unité de S .

Pour déterminer l'évolution de la vitesse au cours du temps, on souhaite utiliser le schéma d'Euler explicite. Sur le cahier réponse, on donne un extrait de ce programme. On notera que la fonction F est la fonction d'intégration de ce schéma. Cette fonction prend comme argument d'entrée un scalaire noté vi. La fonction eulerExplicite prend comme arguments d'entrée la condition initiale sous la forme d'un scalaire noté Cini et FI, une fonction d'intégration.

Q3. Compléter les lignes 13, 14, 15, 18 du programme donné sur le cahier réponse en utilisant une méthode d'Euler explicite pour calculer la vitesse (v), la position (x) et l'énergie (Wa).

La Figure 5 représente le résultat de la simulation numérique précédente où l'on trace l'évolution de la vitesse en fonction du temps à gauche et l'évolution des travaux dues aux actions de frottement (Wf) et aérodynamique (Wa) et leur somme ($Wtotal$) en fonction de la position, x , de l'avion sur la piste à droite. L'origine pour $x = 0$ est prise lorsque l'avion touche le sol.

Q4. Justifier l'allure de la courbe $Wf(x)$.

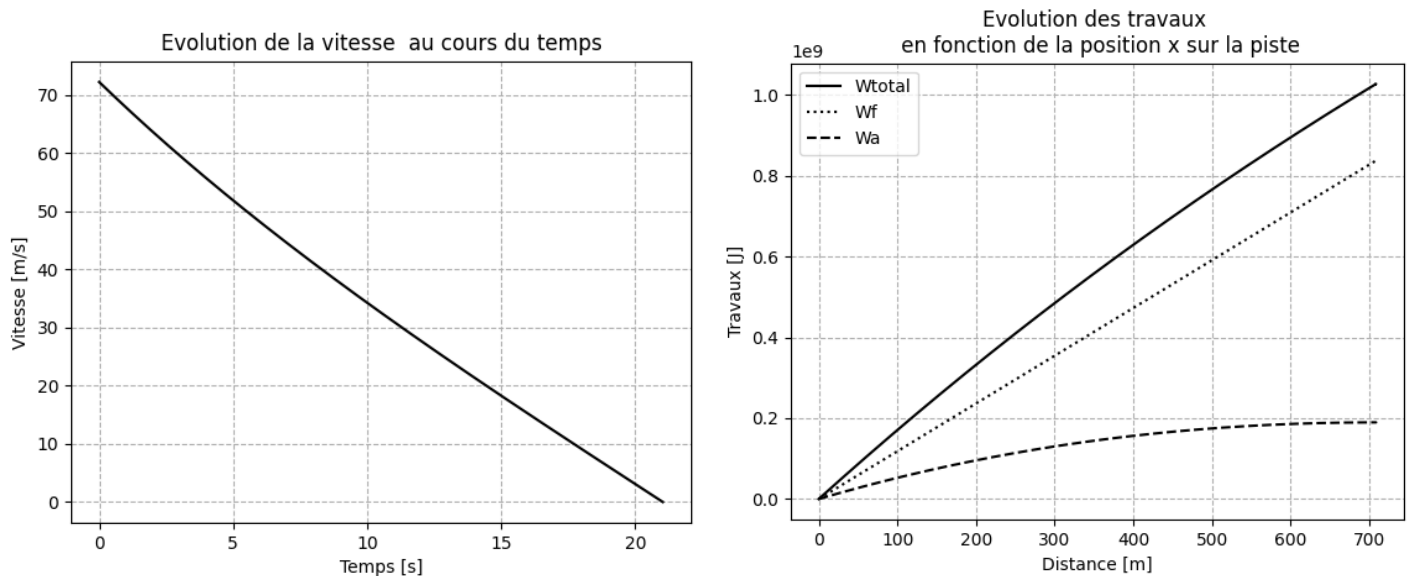
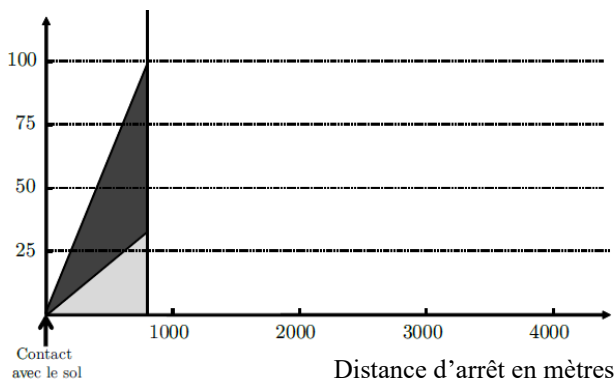


Figure 5 : Courbes obtenues par résolution numérique.

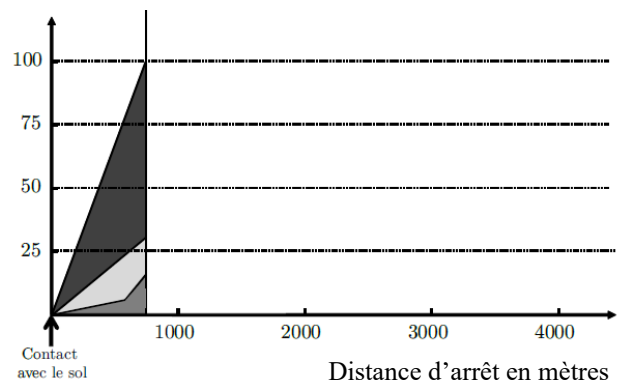
La Figure 6 permet de quantifier l'effet de chacun des dispositifs de freinage utilisés sur un avion lors de son atterrissage : les freins, la trainée aérodynamique et l'effet des inverseurs de poussée. Ces figures sont issues d'études menées par le constructeur sur piste sèche (a) et (b) et sur piste glacée (c) et (d). On ne prend pas en compte dans cette étude l'effet des aérofreins (volets positionnés sur les ailes de l'avion).

Pourcentage de l'énergie initiale dissipée



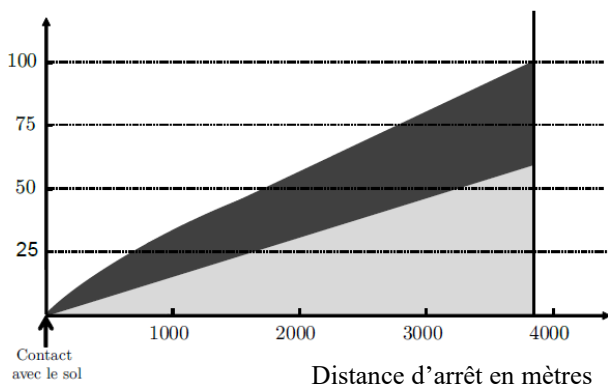
(a) Sans inverseur de poussée

Pourcentage de l'énergie initiale dissipée



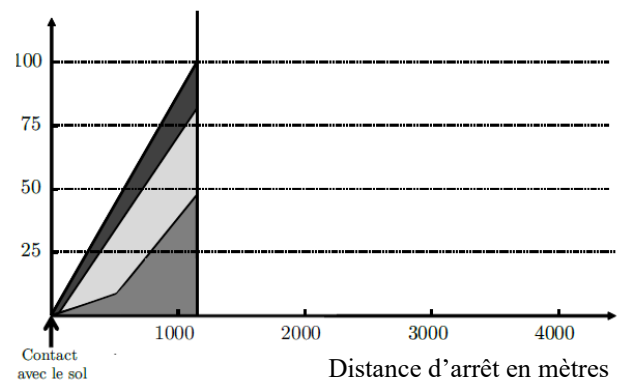
(b) Avec inverseurs de poussée

Pourcentage de l'énergie initiale dissipée



(c) Sans inverseur de poussée

Pourcentage de l'énergie initiale dissipée



(d) Avec inverseurs de poussée



Figure 6 : Effet des inverseurs de poussée sur piste sèche (a) et (b) et glacée (c) et (d).

- Q5.** Comparer la première Figure (6.a) (sans inverseur de poussée sur piste sèche) avec la courbe des travaux de la Figure (5) (allure, valeur finale). Donner approximativement les distances d'arrêt sur piste sèche et glacée et commenter les valeurs obtenues par rapport au cahier des charges.
- Q6.** Quantifier l'effet de la présence des inverseurs de poussée sur l'arrêt d'un avion et justifier l'intérêt d'avoir ce dispositif pour une compagnie aérienne.

3-Analyse de la chaîne structurelle de l'eTras®

Afin de réduire au maximum la masse embarquée dans la nacelle, un seul actionneur de 25kW, un moteur à courant continu, est utilisé pour mouvoir la partie mobile de la nacelle. Ce moteur permet d'entraîner simultanément 4 systèmes vis-écrous transformant le mouvement de rotation du moteur en translation. Cette transmission de puissance depuis le moteur vers les systèmes vis-écrous est réalisée par l'intermédiaire de composants flexibles appelés des flex-shafts. Ces éléments flexibles permettent de transmettre la puissance mécanique tout en respectant les contraintes de masse et de géométrie de la nacelle. L'Annexe 1 (en fin de sujet) permet de visualiser l'architecture du système eTras®.

Le moteur est contrôlé par un composant nommé TRCU (Thrust Reverser Control Unit) contenant une électronique de puissance. Ce TRCU permet de transformer la tension électrique alternative de valeur efficace 115V à fréquence variable (entre 360 Hz et 800 Hz) issue de la génératrice entraînée par le turbo-réacteur en une tension électrique continue de 24V.

Afin de modifier le chemin du flux secondaire, la rotation de chaque volet est synchronisée au déplacement de la nacelle par une chaîne cinématique. Un codeur incrémental est utilisé pour mesurer à tout instant la position angulaire du rotor du moteur. Pour vérifier le bon synchronisme des 4 systèmes vis-écrous, un capteur de type RVDT (Rotary Variable Differential Transformer) est monté sur les 4 vis. L'ensemble de ces informations est traité par le calculateur de l'inverseur de poussée.

- Q7.** A partir de la description de la chaîne structurelle de l'eTras®, compléter la chaîne de puissance et d'information du document réponse.

La description suivante permet de proposer une première modélisation du système. Afin de contrôler le moteur de l'inverseur de poussée, la consigne de position angulaire du moteur, notée θ_c , est adaptée en une consigne numérique, notée N_c . Cette consigne est comparée à l'information issue du codeur incrémental positionné sur le moteur, notée N_m . L'écart ε entre ces deux signaux est corrigé par l'intermédiaire d'un correcteur associé au TRCU dont la sortie est une tension de commande, notée U_m , pour le moteur. La position angulaire en sortie du moteur, notée θ_m , est alors transmise via le système de transmission de puissance (le flex-shaft). En sortie du flex-shaft, la position angulaire θ_f est transmise aux dispositifs vis-écrous permettant de transformer le mouvement de rotation du flex-shaft en un mouvement de translation de l'écrou notée λv sur lequel est fixée la partie mobile de la nacelle. Enfin, un ensemble cinématique, comportant les volets, permet de synchroniser la rotation θ_b de ces derniers avec la translation de la partie mobile de la nacelle. Lors de la phase de reverse, des actions mécaniques perturbatrices importantes agissent sur le moteur à travers la chaîne cinématique.

- Q8.** A partir de la description de la modélisation de la chaîne d'asservissement, compléter le schéma bloc fonctionnel du document réponse.

La transmission de puissance entre l'unique moteur et les 4 systèmes vis-écrous se faisant par des éléments flexibles, ces derniers sont sources d'oscillations parasites transmises aux volets. Afin d'établir un modèle de l'ensemble de l'inverseur de poussée, il est donc nécessaire de décomposer l'étude en deux grandes parties : avant et après les éléments flexibles.

4-Modélisation du comportement du système en aval des flex-shafts

4-1-Modélisation cinématique de l'ouverture de la nacelle

Objectif : Caractériser la relation entre l'ouverture de la partie mobile de la nacelle et la rotation des volets puis déduire un modèle de comportement linéaire de cet ensemble par régression linéaire.

La Figure 7 représente la structure de la chaîne cinématique basée sur le schéma de principe de la Figure 3 lorsque la nacelle est en position fermée, aucune commande de contre-poussée n'est activée. Le flux d'air secondaire suit une trajectoire rectiligne suivant la direction $\vec{x}_0$. La Figure 8 représente la position fermée d'un des volets, ce qui permet de dévier le flux d'air secondaire afin de générer la contre-poussée. La pièce 1 est entraînée par l'intermédiaire d'un flexshaft qui lui impose un couple causant son mouvement de rotation. Ces éléments flexibles seront étudiés plus tard dans le sujet.

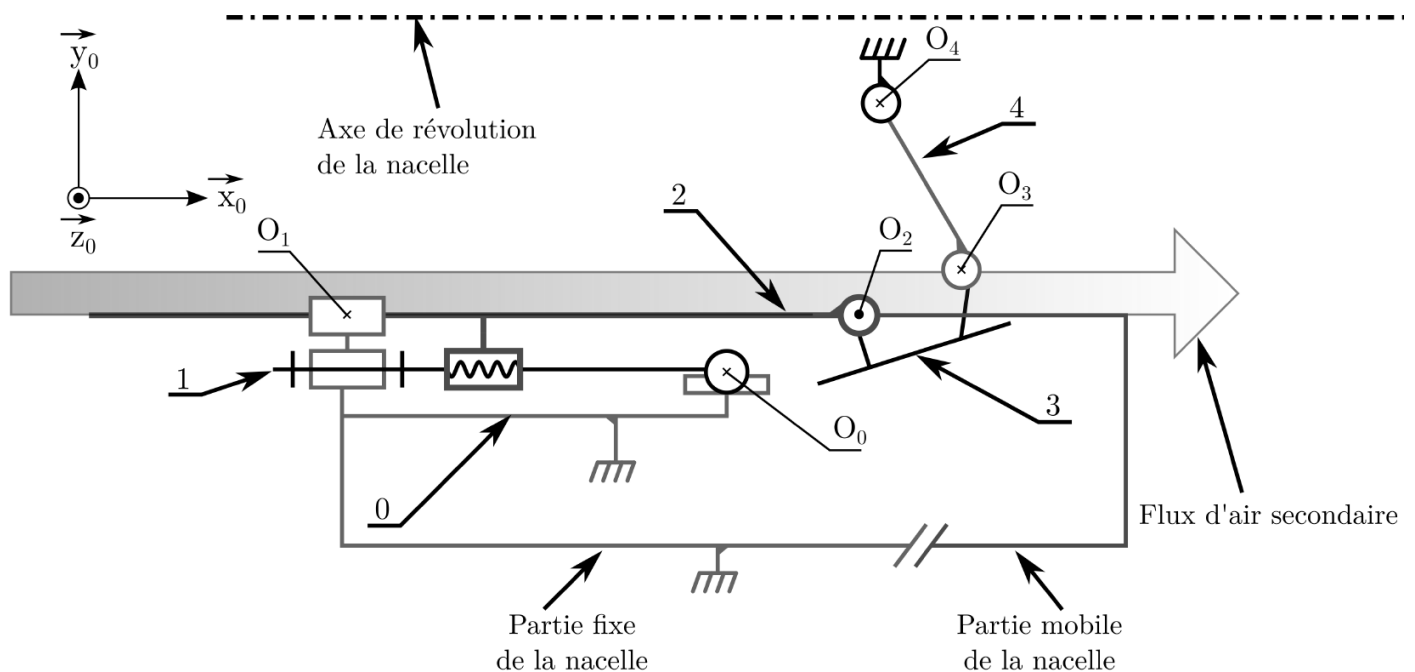


Figure 7 : Modèle simplifié de l'inverseur de poussée, volets ouverts.

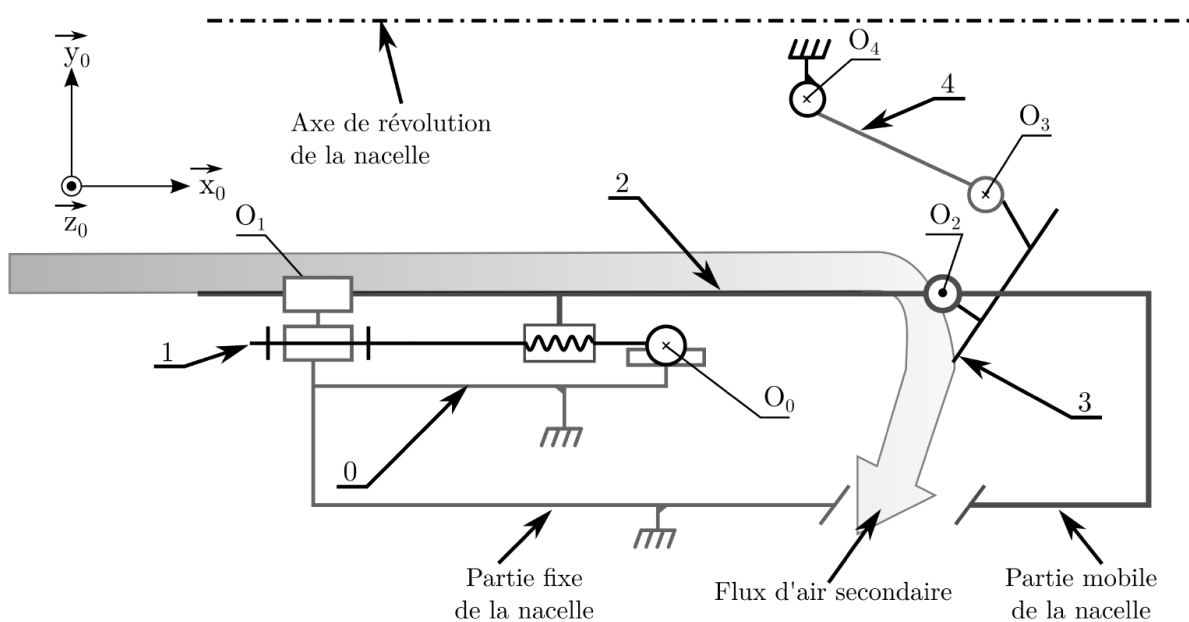


Figure 8 : Modèle simplifié de l'inverseur de poussée, volets fermés.

Pièce 0	Bâti, partie fixe de la nacelle
Pièce 1	Vis à billes, entraînée par le flex-shaft
Pièce 2	Écrou, partie mobile de la nacelle
Pièce 3	Volet
Pièce 4	Bielle

Tableau 1 : Nomenclature

On considère dans cette partie de l'étude que l'ensemble de la nacelle admet une symétrie de révolution autour de l'axe $(O_1, \vec{x}_0)$. On étudie le mouvement d'un seul volet en supposant que le comportement cinématique de l'ensemble des volets est analogue.

Le paramétrage suivant est adopté pour l'étude cinématique :

- La vis (1) du vérin à vis est en liaison pivot d'axe $(O_0, \vec{x}_0)$ par rapport au bâti (0). On définit l'angle $\theta_f(t) = (\vec{y}_0, \vec{y}_1) = (\vec{z}_0, \vec{z}_1)$;
- La vis (1) est en liaison sphère-cylindre de centre O_0 et d'axe $(O_0, \vec{x}_0)$ par rapport au bâti (0) ;
- La vis (1) est en liaison hélicoïdale d'axe $(O_0, \vec{x}_0)$ par rapport à l'écrou (2) fixé à la partie mobile de la nacelle. On note p le pas de la vis ;
- La partie mobile (2) est en liaison glissière de direction $\vec{x}_0$ par rapport au bâti ; donc $(\vec{x}_0, \vec{x}_2) = (\vec{y}_0, \vec{y}_2) = (\vec{z}_0, \vec{z}_2) = 0$
- Le volet (3) est en liaison pivot glissant d'axe $(O_2, \vec{z}_2)$ par rapport à la partie mobile (2). On définit l'angle $\theta_b(t) = (\vec{x}_2, \vec{x}_3) = (\vec{y}_2, \vec{y}_3)$;
- Le volet (3) est en liaison pivot d'axe $(O_3, \vec{z}_2)$ par rapport à la bielle (4). On définit l'angle $\theta_{43}(t) = (\vec{x}_3, \vec{x}_4) = (\vec{y}_3, \vec{y}_4)$;
- La bielle (4) est en liaison pivot d'axe $(O_4, \vec{z}_0)$ par rapport au bâti (0). On définit l'angle $\theta_{40}(t) = (\vec{x}_0, \vec{x}_4) = (\vec{y}_0, \vec{y}_4)$
- Soit $\vec{O_1O_2} = \lambda(t) \vec{x}_0$, $\vec{O_2O_3} = L_3 \vec{x}_3$, $\vec{O_3O_4} = L_4 \vec{y}_4$ et $\vec{O_4O_1} = -L \vec{x}_0 - H \vec{y}_0$

nombre de volets	22
valeur minimale de θ_b	5°
valeur maximale de θ_b	85°
longueur de la bielle 3 : L_3	320 mm
longueur de la bielle 4 : L_4	400 mm
L	422 mm
H	400 mm
pas à droite de la vis à billes : pas	8 mm.tr^{-1}
fréquence nominale de rotation du moteur : N_m	2000 tr.min^{-1}

Tableau 2 : Grandeurs caractéristiques de la cinématique de l'inverseur de poussée.

Q9. Réaliser les figures de changement de bases associées au paramétrage précédent

Q10. Déterminer l'expression de la variable de translation $\lambda(t)$ de la partie mobile de la nacelle (2) en fonction de l'angle de rotation $\theta_b(t)$ ainsi que des grandeurs géométriques constantes du système.

La Figure 9 représente l'évolution de la variable λ en fonction θ_b à partir de l'expression déterminée à la question 10.

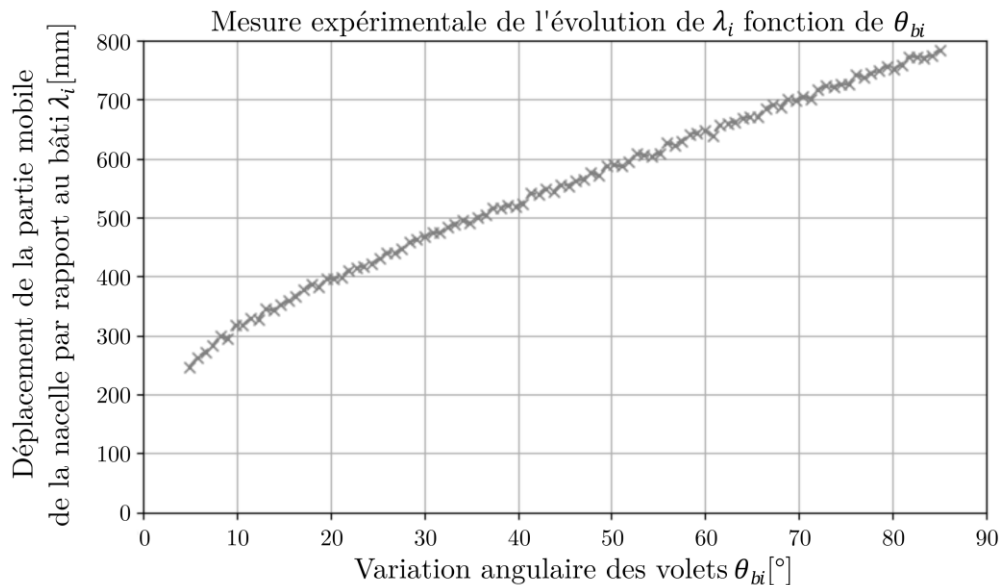


Figure 9 : Évolution de λ en fonction de θ_b .

Q11. À partir de la Figure 9, déterminer la course C de la partie mobile de la nacelle correspondant à l'évolution angulaire des volets puis comparer la valeur trouvée à la valeur du cahier des charges.

Afin de compléter le schéma bloc de l'asservissement en position de l'inverseur de poussée, il est nécessaire d'établir une relation linéaire et continue entre les paramètres de la chaîne cinématique $V_{20}(t) = \frac{d\lambda(t)}{dt}$ et $\omega_b(t) = \frac{d\theta_b(t)}{dt}$. Pour déterminer la relation linéaire entre ces paramètres, nous allons utiliser une régression linéaire univariée. Les premières lignes du fichier "mesure.txt" utilisé pour réaliser la régression linéaire sont présentées sur la Figure 10.

5.002536072595212 ; 249.96246516347793
 5.811026750994438 ; 261.30591985754825
 6.619517429393664 ; 271.8698209107626
 7.42800810779289 ; 281.796658126533
 8.236498786192115 ; 291.19113802195494

Figure 10 : Exemple des premières lignes du fichier de mesures.

Le résultat du modèle de régression linéaire est donné ci-dessous (Figures 11(a) et 11(b)).

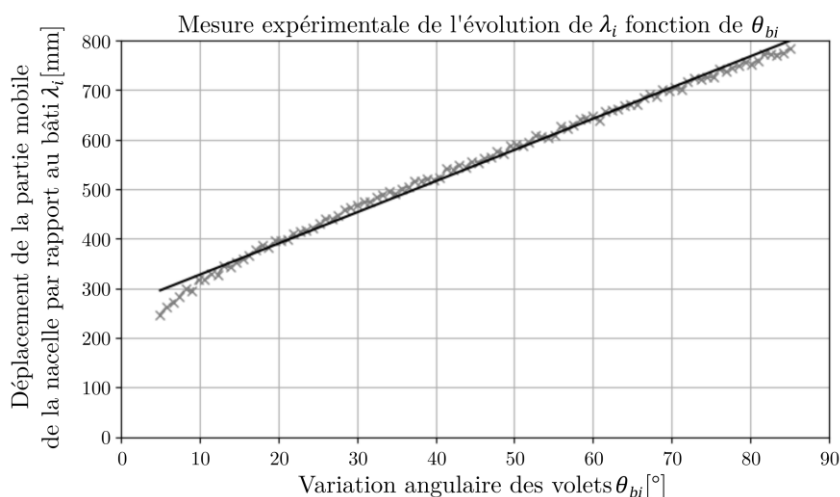


Figure 11(a) : Résultat de la régression linéaire.

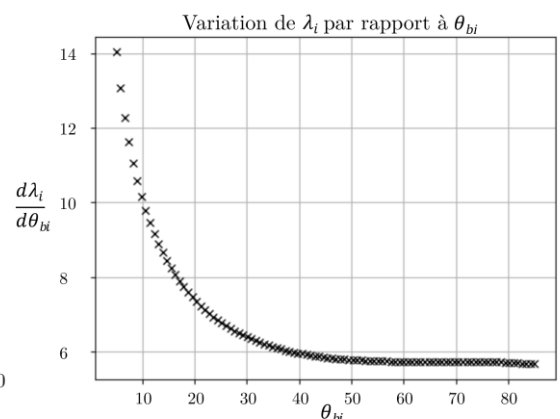


Figure 11(b) : Évolution de $\frac{d\lambda_i}{d\theta_{bi}}$

Q12. Justifier l'intérêt d'utiliser une régression linéaire univariée plutôt qu'une linéarisation autour d'un point de fonctionnement pour simplifier le modèle. Critiquer ce choix sur la plage de variation de $\theta_b \in [5^\circ, 30^\circ]$. En se basant sur l'exemple présenté dans l'annexe 2 (en fin de sujet) "Bibliothèque Scikit-Learn Python", compléter le code Python du cahier réponse afin d'obtenir les paramètres d'optimisation du modèle de régression linéaire permettant de tracer la droite.

Q13. Déterminer la fonction de transfert $K_{cc} = \frac{\omega_b}{V_{20}}$ associée à la chaîne cinématique à partir du résultat de l'algorithme d'apprentissage supervisé présenté sur la Figure 11.

Q14. À partir des données fournies et des réponses aux questions précédentes, déterminer l'expression du temps d'ouverture de la nacelle. Donner l'application numérique et conclure vis-à-vis du cahier des charges. On considèrera pour cette question que le moteur tourne à vitesse constante $N = N_m$.

4-2-Modélisation cinématique en vue d'évaluer le couple sur le flex-shaft dû à l'action de la contre-poussée

Objectif : Valider les performances mécaniques du moteur utilisé pour l'ouverture de la nacelle en phase de contre-poussée.

Afin d'évaluer les performances du moteur électrique employé pour la phase de contre-poussée, on supposera que les volets sont en position fermée (Figure 3) et qu'ils sont soumis à la pression du flux d'air secondaire lorsque l'avion est en phase de freinage. On se place en phase de freinage et les volets sont en position fermée.

Hypothèses et données :

- On note p le pas de la vis (pas à droite en m/tour) ;
- On supposera que toutes les liaisons sont parfaites ;
- On note $V_{20} = \frac{d\lambda}{dt}$ telle que $\vec{V}(O_2, 2/R_0) = V_{20} \vec{x}_0$;
- On rappelle que K_{cc} est le rapport de la chaîne de cinématique tel que : $\omega_b(t) = K_{cc} \cdot V_{20}(t)$

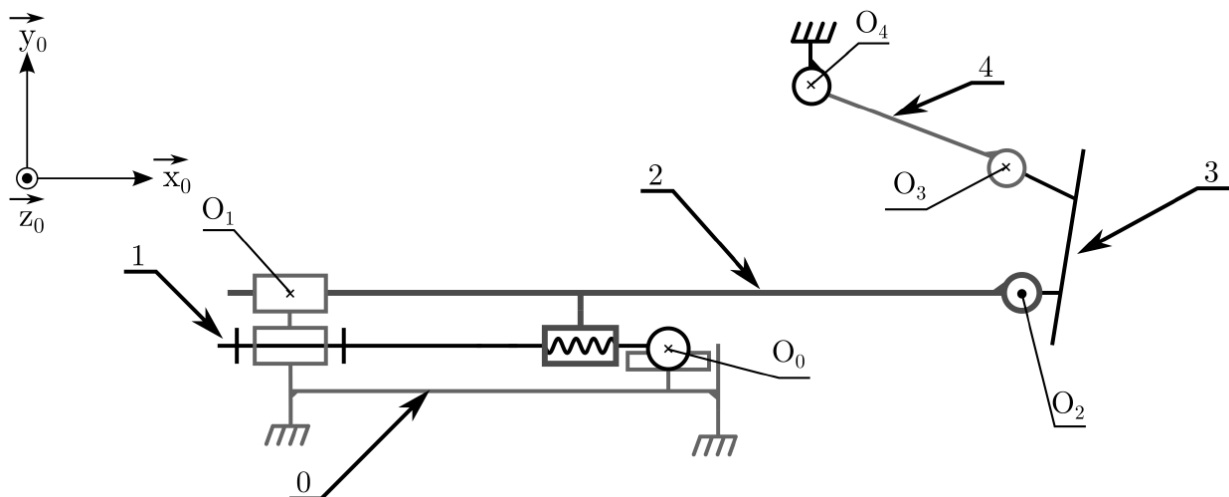


Figure 12 : Schéma cinématique du mécanisme d'ouverture de la nacelle lorsque les volets sont fermés.

Pour les questions suivantes, on utilisera le schéma cinématique donné sur la Figure 12, schéma basé sur la configuration de la partie basse de la Figure 3. On utilisera le paramétrage de la partie 4-1 également.

Q15. Compléter le graphe de structure (ou de liaisons) représentant le mécanisme d'ouverture de la nacelle donné sur le document réponse.

Afin de pouvoir appliquer le théorème de l'énergie cinétique à l'ensemble en mouvement, il est nécessaire de définir les torseurs cinématiques des différentes liaisons.

On définit le torseur cinématique de la liaison hélicoïdale 2/1 de la manière suivante :

$$V_{2/1} = \left\{ \begin{array}{l} \vec{\Omega}_{2/1} = \omega_{21} \vec{x}_0 \\ \vec{V}(O_2, 2/1) = V_{21} \vec{x}_0 \end{array} \right\}_{O_2}$$

Q16. Donner la relation cinématique entre V_{21} et ω_{21} puis celle entre V_{20} et $\dot{\theta}_f$, et enfin celle entre $\dot{\theta}_b$ et $\dot{\theta}_f$.

Q17. En déduire les expressions les plus simples de chacun des torseurs cinématiques ci-dessous en fonction de $\dot{\theta}_f$, p , K_{cc} et L_3 :

$$V_{1/0} = \left\{ \begin{array}{l} \vec{\Omega}_{1/0} \\ \vec{V}(O_0, 1/0) \end{array} \right\}_{O_0}, V_{2/1} = \left\{ \begin{array}{l} \vec{\Omega}_{2/1} \\ \vec{V}(O_2, 2/1) \end{array} \right\}_{O_2}, V_{2/0} = \left\{ \begin{array}{l} \vec{\Omega}_{2/0} \\ \vec{V}(O_2, 2/0) \end{array} \right\}_{O_2}, V_{3/2} = \left\{ \begin{array}{l} \vec{\Omega}_{3/2} \\ \vec{V}(O_2, 3/2) \end{array} \right\}_{O_2}$$

et $V_{3/0} = \left\{ \begin{array}{l} \vec{\Omega}_{3/0} \\ \vec{V}(G_3, 3/0) \end{array} \right\}_{G_3}$ avec G_3 , centre de gravité de 3 tel que : $\overrightarrow{O_2 G_3} = \frac{L_3}{2} \vec{x}_3$

A l'issue de cette étude cinématique, l'application du théorème de l'énergie cinétique (programme 2^{ème} année) permet d'exprimer le couple C_f sur le flex-shaft (équation ci-dessous). Un asservissement en courant du moteur permettra de maîtriser celui-ci durant la phase d'ouverture et de maintien des volets de l'inverseur de poussée.

$$J_{eq} \cdot \ddot{\theta}_f - B_{eq} \cdot \frac{K_{cc} \cdot p}{4 \cdot \pi} \cdot \dot{\theta}_f^2 = C_f + \frac{K_{cc} \cdot p \cdot M_3 \cdot g \cdot L_3}{4 \cdot \pi} \cdot \cos(\theta_b) + F_{air} \cdot \frac{p}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\sin(\theta_b) - \frac{L_3}{2} \cdot K_{cc} \right)$$

Exercice : Roue ez-wheel (extrait CCP MP 14)

I. La roue autonome

Ez-Wheel SAS est une entreprise française de technologie innovante fondée en 2009. Elle propose une gamme de roues électriques "clé en main", 100% intégrées. La roue autonome ez-Wheel (prononcer "easy-wheel") propose une solution simple pour tracter des équipements de manutention et de transport de charges, des véhicules légers et matériels médicaux (figure1). Le stator de la roue ez-Wheel est fixé sur le châssis de l'engin à déplacer et son rotor est assemblé directement sur sa roue.

La solution intègre, au sein d'une roue, tous les composants nécessaires à la traction : la motorisation électrique, des batteries haute énergie de très longue durée de vie, un contrôleur de puissance assurant un pilotage optimal et la gestion de la batterie ainsi qu'une interface de commande sans fil. La transmission de l'énergie est réalisée par un variateur (incorporé à la carte de commande), un moteur brushless, puis un réducteur (figure1).

II. Mise en situation

Nous nous proposons, dans ce sujet, d'étudier l'implantation de la roue autonome sur un fauteuil roulant (figure2). Pour ce genre d'application, où il est nécessaire de mettre en place deux roues autonomes sur le fauteuil, la commande des roues n'est pas aussi simple que pour des applications à une seule roue. En effet, en plus de gérer le mouvement d'avance du fauteuil, il faut également gérer ses changements de direction. Les deux ez-Wheel étant implantées sur chacune des deux roues arrière, le pilotage des deux roues est lié afin de maîtriser la direction du fauteuil. Chacune des deux roues est alors asservie par l'intermédiaire de capteurs mesurant la vitesse de rotation de l'arbre du moteur brushless.

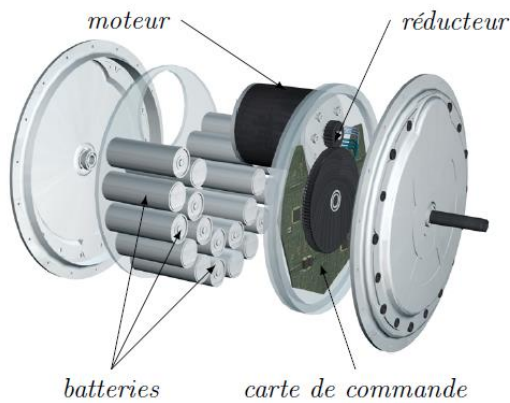


Figure 1 : Principaux éléments d'une roue ez-Wheel



Figure 2 : Prototype de fauteuil roulant équipé de deux ez-Wheel

Le fonctionnement du fauteuil motorisé désiré par la société ez-Wheel est le suivant : l'utilisateur fournit une commande au système via un joystick. La carte de commande génère alors un ordre au variateur qui distribue une énergie électrique adaptée au moteur électrique. L'énergie mécanique de rotation fournie par le moteur électrique est alors adaptée et transmise aux roues. Afin d'assurer l'asservissement en vitesse des roues (et donc du fauteuil), des capteurs permettent de mesurer la vitesse de rotation sur l'arbre de sortie du moteur.

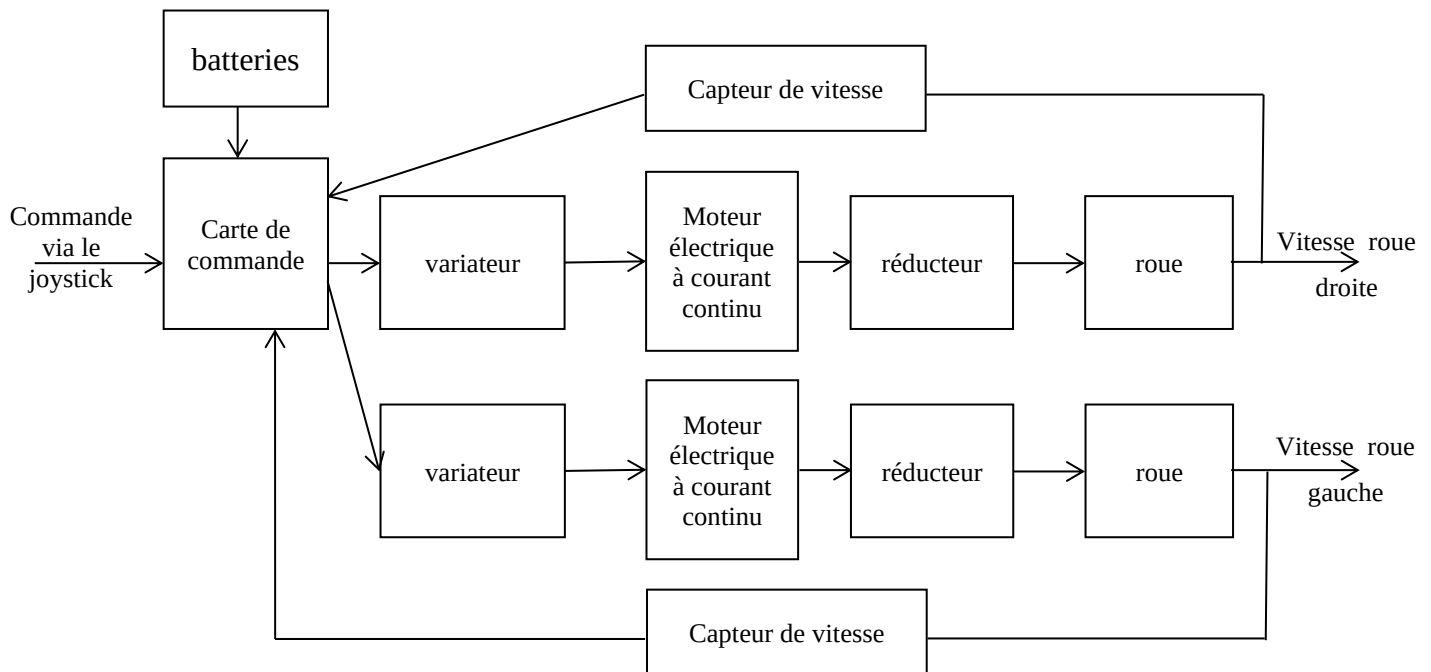


Figure 3 : schéma-bloc fonctionnel

Afin de commander le déplacement du fauteuil, l'utilisateur dispose d'un joystick (figure 4).

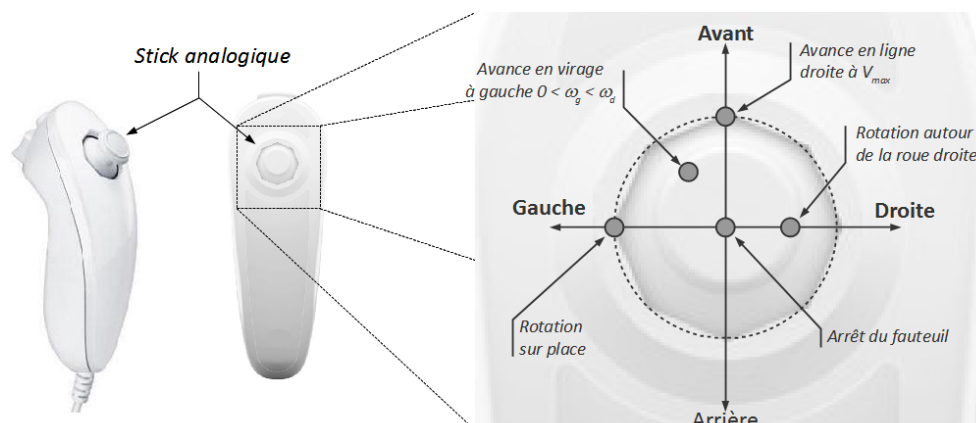


Figure 4 : Consignes de commande des roues en fonction de la position de la manette de commande

Cette manette de contrôle permet de piloter deux grandeurs (figure 5 et figure 6) : La vitesse du fauteuil, notée $V(t) = \|\vec{V}(O_f, R_f/R_0)\|$ et Le rayon de courbure du fauteuil, noté $\rho(t)$.

Les deux motoréducteurs ez-Wheel sont asservis en vitesse de rotation.

Objectif : Afin de vérifier les performances, relier les consignes en vitesse de rotation des deux moteurs et les consignes du joystick.

III. Relation entre les consignes joystick et les consignes moteur

Les hypothèses de la modélisation du déplacement du fauteuil sont (figures 5 et 6) :

- Le mouvement du fauteuil sans les roues est un mouvement plan sur plan $(\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ par rapport au référentiel fixe R_0 . Le point O est le centre de courbure du mouvement du fauteuil (appelé aussi centre instantané de rotation);
- Les deux roues arrière du fauteuil roulent sans glisser par rapport au référentiel fixe R_0 ;
- La roue arrière gauche, notée R_g , est en liaison pivot d'axe $(O_g, \vec{y}_f)$ par rapport au châssis du fauteuil
- La roue arrière droite, notée R_d , est en liaison pivot d'axe $(O_d, \vec{y}_f)$ par rapport au châssis du fauteuil ;
- Le rayon de courbure $\rho(t)$ est constant.

Notations :

- Référentiel fixe : $R_0 (O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$;
- Référentiel lié au châssis du fauteuil : $R_f (O_f, \vec{x}_f, \vec{y}_f, \vec{z}_f)$ avec $\vec{z}_0 = \vec{z}_f$;
- Référentiel lié à la roue gauche : $R_g (O_g, \vec{x}_g, \vec{y}_g, \vec{z}_g)$ avec $\vec{y}_f = \vec{y}_g$;
- Référentiel lié à la roue droite : $R_d (O_d, \vec{x}_d, \vec{y}_d, \vec{z}_d)$ avec $\vec{y}_f = \vec{y}_d$;
- $\vec{\Omega}(R_f/R_0) = \frac{d\beta}{dt} \vec{z}_0 = \dot{\beta} \vec{z}_0$;
- $\vec{\Omega}(R_g/R_f) = \omega_g \vec{y}_f = \frac{d\theta_g}{dt} \vec{y}_f = \dot{\theta}_g \vec{y}_f$;
- $\vec{\Omega}(R_d/R_f) = \omega_d \vec{y}_f = \frac{d\theta_d}{dt} \vec{y}_f = \dot{\theta}_d \vec{y}_f$;
- $\vec{OO}_f = -\rho \vec{y}_f$
- $\vec{O_dO_f} = \vec{O_fO_g} = \frac{a}{2} \vec{y}_f$ avec $a = 700 \text{ mm}$ la largeur du fauteuil ;
- I_g (respectivement I_d) est le point de contact entre la roue gauche (respectivement la roue droite) et le sol : $\vec{I_gO_g} = \vec{I_dO_d} = R \vec{z}_0$ avec R le rayon des roues arrière ;

Q1 : Donner : La valeur de ρ et la relation simple entre ω_g et ω_d lorsque la trajectoire du fauteuil est une droite puis lorsque le fauteuil tourne autour de l'axe $(O_f, \vec{z}_0)$;

Q2 : Donner Les valeurs de ρ et ω_g lorsque le fauteuil tourne autour de l'axe $(O_g, \vec{z}_0)$.

Q3 : Dans le cas général d'une trajectoire autour du point O (voir figure 5), écrire trois expressions de $\vec{V}(O_f, R_f/R_0)$:

- En fonction de R , a , ω_g et $\dot{\beta}$ en utilisant le roulement sans glissement au point I_g ;
- En fonction de R , a , ω_d et $\dot{\beta}$ en utilisant le roulement sans glissement au point I_d ;
- En fonction de ρ et $\dot{\beta}$.

Q4 : En déduire les expressions de ω_g et ω_d en fonction de $V(t)$, de ρ et des données géométriques du fauteuil.

Ces vitesses exprimées représentent les consignes de vitesses de chacun des moteurs permettant le déplacement en virage du fauteuil équipé des roues ez-wheel.

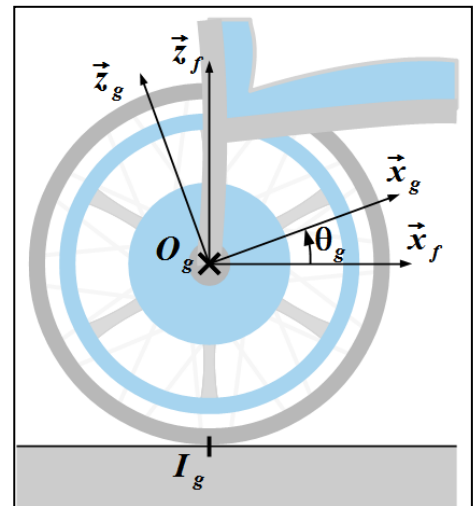
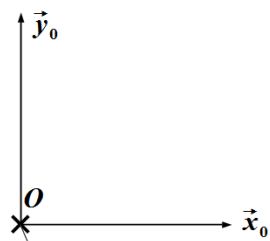


Figure 6 : Paramétrage de la roue gauche du fauteuil

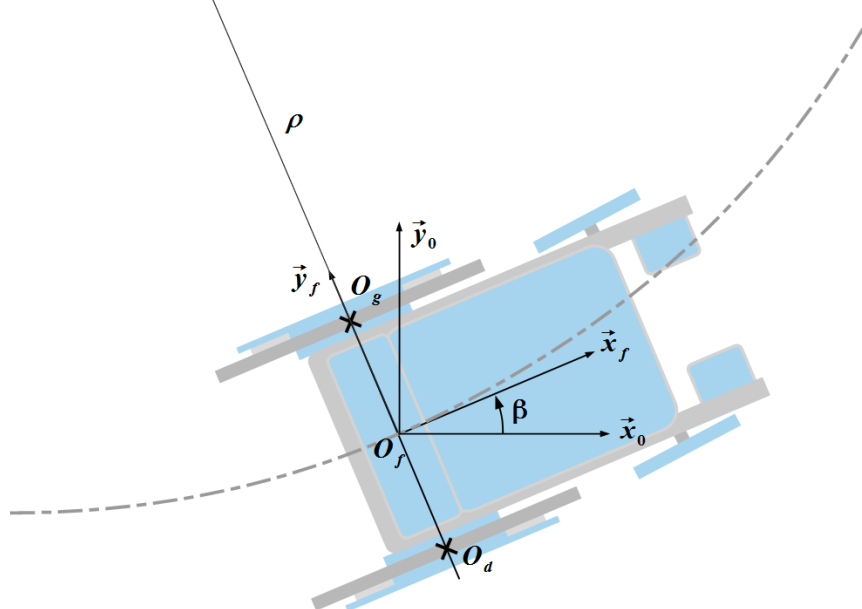
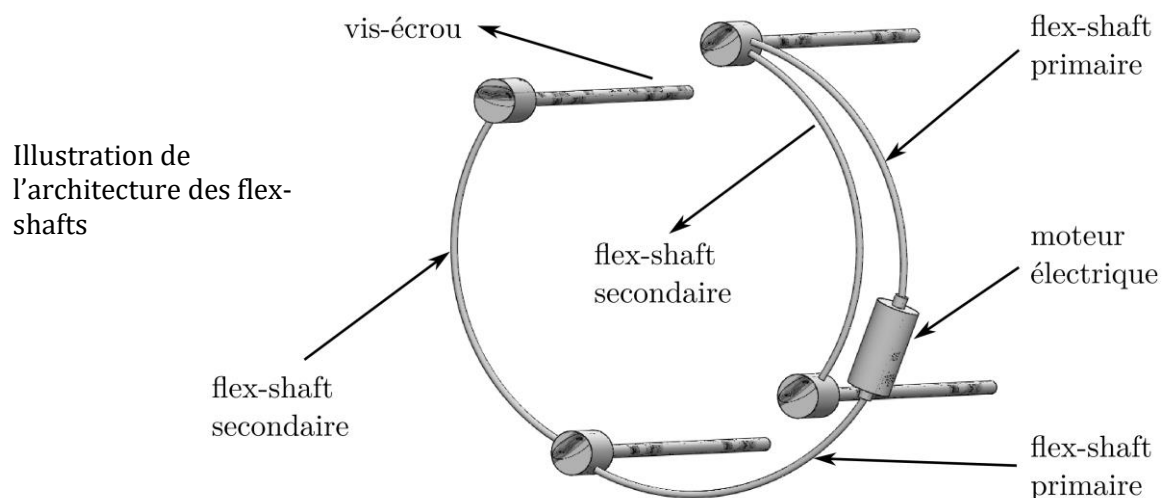
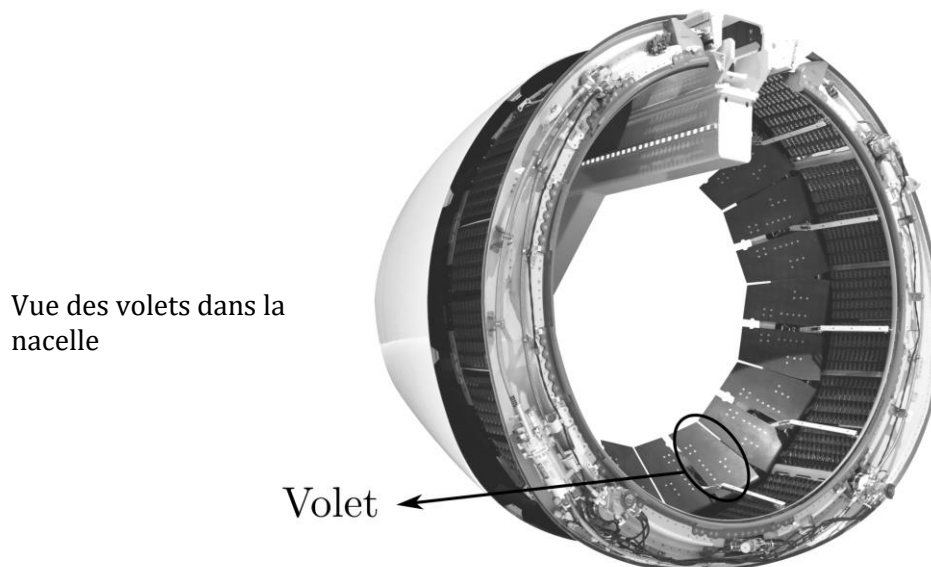
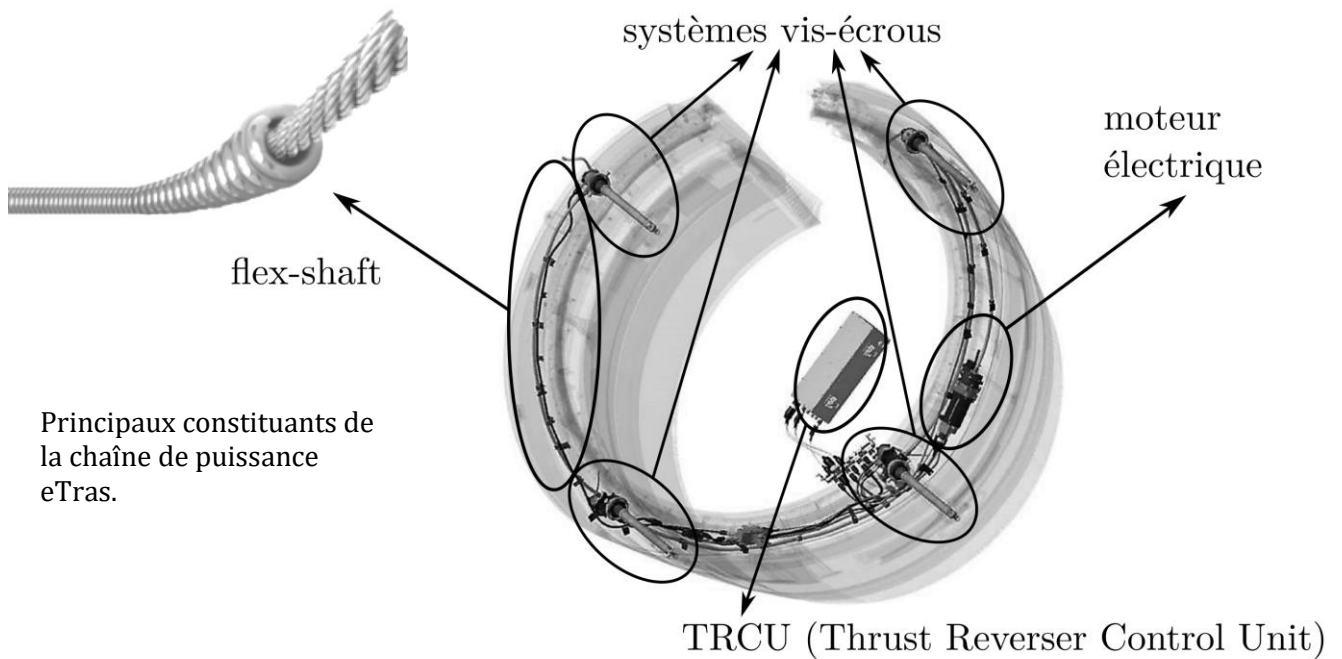


Figure 5 : Paramétrage du fauteuil en virage

Annexe 1 - Décomposition des éléments du système eTras[®]



Comme le montre la Figure 24, le moteur électrique est raccordé aux flex-shafts primaires qui à leur tour sont raccordés en série via des renvois d'angle situés au niveau des premiers systèmes vis-écrou aux flex-shafts secondaires. Chaque système vis-écrou est mis en mouvement par l'intermédiaire d'un ou deux flex-shafts et d'un renvoi d'angle.

Annexe 2 - Bibliothèque Scikit-Learn Python

Scikit-Learn est une bibliothèque Python spécifiquement conçue pour l'IA et le machine learning (ML). Ses principales fonctionnalités incluent la classification, le pré-traitement et la modélisation des données ainsi que la sélection de modèles. Elle fournit également une gamme d'algorithmes ML supervisés et non supervisés. Comme exemples de tâches ML utilisant Scikit-Learn, peuvent être citées la reconnaissance d'images, la prédiction ou la détection de spams. En outre, Scikit-Learn est interopérable avec la pile SciPy qui inclut NumPy, Matplotlib, IPython, SymPy et Pandas.

Apprentissage supervisé

- la régression linéaire : `from sklearn.linear_model import LinearRegression`

LinearRegression fits a linear model with coefficients $w = (w_1, \dots, w_p)$ to minimize the residual sum of squares between the observed targets in the dataset, and the targets predicted by the linear approximation.

```
1 import numpy
2 from sklearn.linear_model import LinearRegression
3
4 ## Exemple de fonction à linéariser :  $y = 1 * x_0 + 2 * x_1 + 3$ 
5 X = np.array([[1, 1], [1, 2], [2, 2], [2, 3]])
6 y = np.dot(X, np.array([1, 2])) + 3
7
8 reg = LinearRegression().fit(X, y)
9 reg.score(X, y)
10 >>> 1.0
11
12 reg.coef_
13 >>> array([1., 2.])
14
15 reg.intercept_
16 >>> 3.0
17
18 reg.predict(np.array([[3, 5]]))
19 >>> array([16.])
```