

SESSION 2026

AGREGATION CONCOURS EXTERNE

Section : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

**Options : sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie mécanique
sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie électrique
sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie des constructions
sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie informatique**

ANALYSE ET EXPLOITATION PÉDAGOGIQUE D'UN SYSTÈME PLURITECHNOLOGIQUE

Durée : 6 heures

Calculatrice autorisée selon les modalités de la circulaire du 17 juin 2021 publiée au BOEN du 29 juillet 2021.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Il appartient au candidat de vérifier qu'il a reçu un sujet complet et correspondant à l'épreuve à laquelle il se présente.

Si vous repérez ce qui vous semble être une erreur d'énoncé, vous devez le signaler très lisiblement sur votre copie, en proposer la correction et poursuivre l'épreuve en conséquence. De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, vous devez la (ou les) mentionner explicitement.

NB : Conformément au principe d'anonymat, votre copie ne doit comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé consiste notamment en la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de la signer ou de l'identifier.

Le fait de rendre une copie blanche est éliminatoire

Tournez la page S.V.P.

INFORMATION AUX CANDIDATS

Vous trouverez ci-après les codes nécessaires vous permettant de compléter les rubriques figurant en en-tête de votre copie

Ces codes doivent être reportés sur chacune des copies que vous remettrez.

Option : sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie mécanique

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAE	1414A	101	7175

Option : Sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie électrique

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAE	1415A	101	7175

Option : Sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie des constructions

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAE	1416A	101	7175

Option : Sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie informatique

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAE	1417A	101	7175

Définition de l'épreuve

L'épreuve est commune à toutes les options. Les candidats composent sur le même sujet au titre de la même session quelle que soit l'option choisie.

Elle a pour but de vérifier que le candidat est capable de mobiliser ses connaissances scientifiques et techniques pour conduire une analyse systémique, élaborer et exploiter les modèles de comportement permettant de quantifier les performances globales et détaillées d'un système des points de vue matière, énergie et information afin de valider tout ou partie de la réponse au besoin exprimé par un cahier des charges. Elle permet de vérifier les compétences d'un candidat à synthétiser ses connaissances pour analyser et modéliser le comportement d'un système pluritechnologique automatique.

Conseils aux candidats

Il est demandé aux candidats :

- de rédiger les réponses aux différentes parties sur des feuilles de copie séparées et clairement repérées ;
- de numéroter chaque feuille de copie et indiquer le numéro de la question traitée ;
- de rendre tous les documents réponses, même non complétés ;
- d'utiliser exclusivement les notations indiquées dans le sujet lors de la rédaction des réponses ;
- de justifier clairement les réponses ;
- d'encadrer ou souligner les résultats ;
- de présenter lisiblement les applications numériques, sans omettre les unités, après avoir explicité les expressions littérales des calculs ;
- de formuler les hypothèses nécessaires à la résolution des problèmes posés si celles-ci ne sont pas indiquées dans le sujet.

Organisation du sujet

Ce sujet se décompose de la façon suivante :

- l'énoncé du sujet commençant par la mise en situation et comportant 71 questions ;
- le dossier technique comportant 3 documents techniques : DT1 à DT3 ;
- le dossier réponse comportant 4 documents réponse : DR1 à DR4.

Recommandations

L'étude est composée de 5 parties :

- Partie 1 : Pertinence de l'usage d'ailes rigides
- Partie 2 : Prédimensionnement du mât de l'aile
- Partie 3 : Dimensionnement, consommation et commande des moteurs de pivotement des ailes
- Partie 4 : Contrôle de la position des ailes
- Partie 5 : Déploiement et inversion des ailes
- Partie 6 : Synthèse.

Ces parties sont indépendantes. Il est toutefois recommandé de les aborder dans l'ordre proposé.

Remarque : par souci de confidentialité, à la demande de l'industriel, les données techniques ont été modifiées.

Le porte-conteneurs Meltem

D'après l'Organisation maritime internationale (OMI), le transport maritime représente au niveau mondial près de 3% des émissions de gaz à effet de serre.

Moyen de transport efficace d'un point de vue énergétique rapporté aux volumes transportés, le transport maritime n'en est pas moins quasi exclusivement dépendant des énergies fossiles. Il doit aujourd'hui opérer une transition énergétique sans précédent afin de respecter les engagements fixés au niveau international et européen, mais aussi contribuer à l'effort national de décarbonation. Pour répondre aux objectifs, plusieurs technologies sont à l'étude comme l'utilisation de piles à combustibles, la motorisation électrique et la propulsion vélique. C'est cette dernière qui est étudiée dans la suite.

Le porte-conteneurs Meltem (figure 1), développé par l'entreprise Zéphyr Borée, est doté de quatre paires d'ails, conçues par l'entreprise CWS. Il possède une passerelle 3/4 avant, de manière à pallier l'obstruction de la visibilité sur l'avant du navire. La propulsion mécanique est assurée par deux moteurs thermiques de 4 800 kW. Afin de limiter la hauteur du centre de voilure, la hauteur maximum des bays de conteneur est réduite par rapport à un navire conventionnel de mêmes dimensions. La capacité maximale géométrique est donc moindre, mais la capacité de chargement de 1 800 conteneurs de 14 tonnes en moyenne reste identique à celle d'un navire de mêmes dimensions sans ailes.



Figure 1 – Meltem Porte conteneur de Zéphyr et Borée, dotée de 4 paires d'ails CWS.

Source : lemarin.ouest-France.fr

Partie 1 : Pertinence de l'usage d'ailes rigides

Objectif : justifier l'ajout d'ailes rigides sur des porte-conteneurs dans un contexte de décarbonation des activités maritimes.

Le cas d'un porte-conteneurs standard naviguant sur un trajet Le Havre - New York est étudié.

Le cas prédominant rencontré sur ce voyage est schématisé figure 2 pour une seule aile.

Correspondance des vitesses : 1 nœud = 1,852 km·h⁻¹.

Hypothèses de l'étude :

- la vitesse du vent réel est $V_R = 40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$;
- le vent vitesse du bateau est $V_V = 12 \text{ nœuds}$. Le vent vitesse est le vent créé par le bateau lorsqu'il avance. Il est toujours dans l'axe du bateau et s'oppose au sens de déplacement du bateau ;
- la densité de l'air à 10°C est $\rho = 1,23 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$;
- la surface de référence de l'aile : $S = 350 \text{ m}^2$;
- le trajet Le Havre – New York correspond à une distance $D = 3\,130 \text{ nautiques}$ soit $D = 5\,800 \text{ km}$;
- 2 moteurs thermiques de 4 800 kW.

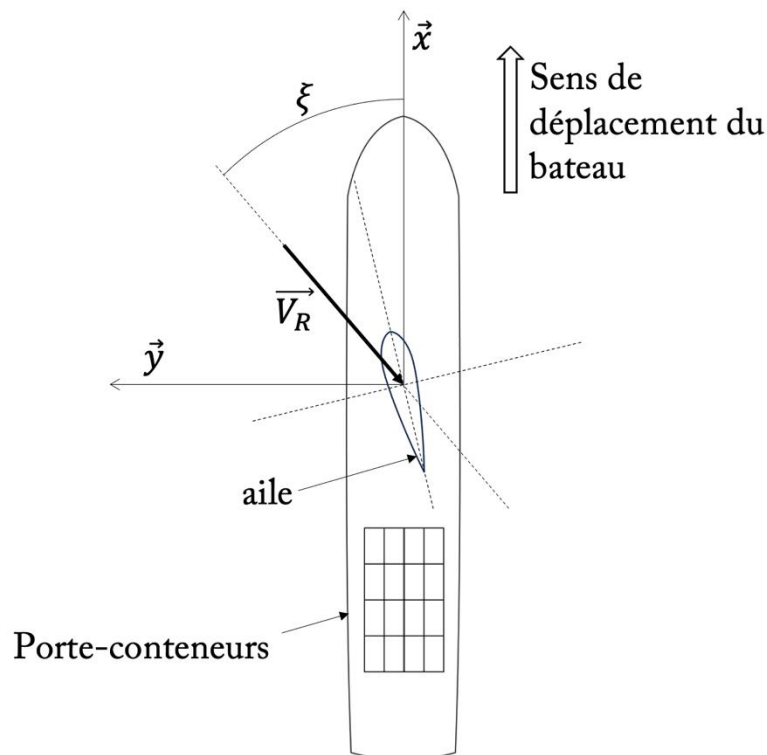


Figure 2 – Porte-conteneurs naviguant

Q1. Le vecteur vent réel $\vec{V}_R$ étant donné sur le document réponse DR1 pour une valeur d'inclinaison ξ de 40° , tracer sur la figure, à l'échelle $1 \text{ cm} = 10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, le vecteur vent vitesse du bateau $\vec{V}_V$ et en déduire le vecteur vent apparent $\vec{V}_A$ défini comme la somme vectorielle du vent réel et du vent vitesse. Tracer γ , l'angle de vent apparent, correspondant à l'angle entre la direction du vent apparent et l'axe du bateau tel que $\gamma \in \left[0; \frac{\pi}{2}\right]$.

Q2. Déterminer l'expression littérale de γ et V_A en fonction de V_R , ξ et V_V (V_A , V_R et V_V étant respectivement les normes de $\vec{V}_A$, $\vec{V}_R$ et $\vec{V}_V$).

Il s'agit maintenant d'évaluer la force propulsive générée par l'ajout des ailes. Afin d'appréhender dans un premier temps les relations entre portance (*lift*) et traînée (*drag*) d'une part, et forces propulsive et latérale d'autre part, ces grandeurs doivent être représentées graphiquement.

Il est rappelé que la traînée est colinéaire et de même direction que le vent apparent, tandis que la portance générée est perpendiculaire à la traînée.

Pour cette représentation graphique, la traînée est supposée quatre fois plus faible que la portance.

Q3. Tracer sur le document réponse DR1, en respectant les proportions indiquées, la portance $\vec{F}_L$ et la traînée $\vec{F}_D$ générée par l'aile pour le vent apparent $\vec{V}_A$.

Les forces générées par l'aile sont notées F_x pour la force propulsive et F_y pour la force latérale.

Q4. À partir de la construction précédente, exprimer F_x en fonction de F_L et F_D , respectivement la norme de $\vec{F}_L$ et $\vec{F}_D$, et γ .

L'angle d'incidence de l'aile par rapport au vent apparent est noté α . L'objectif est de déterminer l'angle α optimal pour maximiser la valeur de la force propulsive F_x . On note ρ la masse volumique de l'air.

Les expressions de la portance F_L et de la traînée F_D sont données :

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_A^2 \cdot C_L$$

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_A^2 \cdot C_D$$

Avec les coefficients de portance et de traînée définis en première approximation :

$$C_L = a \cdot \alpha + b$$

$$C_D = C_{D0} + c \cdot \alpha^2$$

où a , C_{D0} , b et c sont des coefficients propres au type d'aile utilisée.

Q5. Exprimer F_x en fonction de ρ , V_A , a , α , C_{D0} , b , c et γ .

Q6. Déterminer l'expression de α maximisant la force propulsive F_x en fonction de a , c et γ , puis en fonction de a , c , V_R , ξ et V_V .

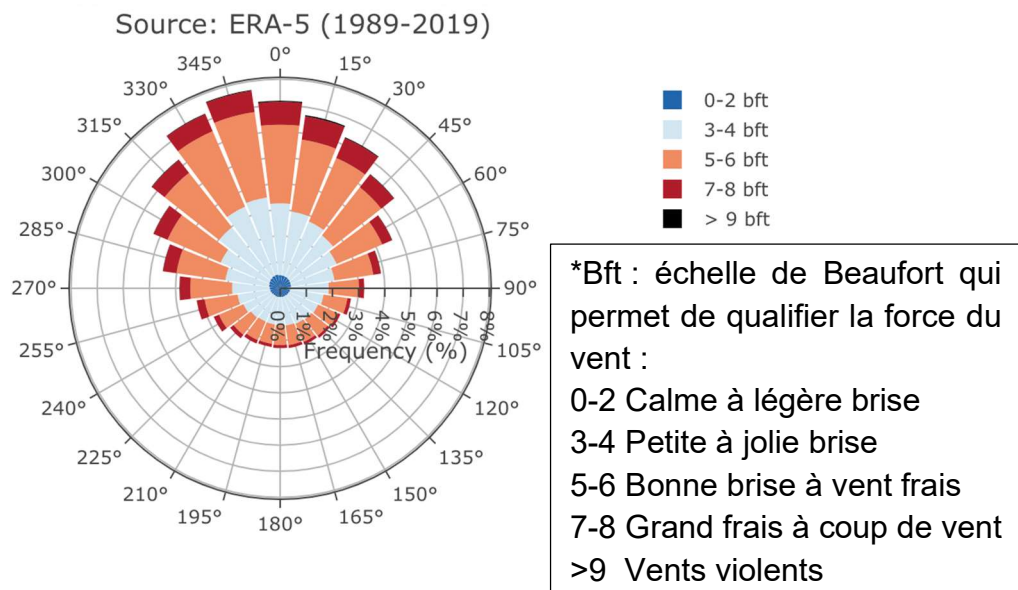


Figure 3 – Statistiques de vent réel sur le trajet Le Havre-New York, obtenus à partir de l'outil Blue route de Marin.

Q7. À l'aide de la figure 3, donner la plage de variation de ξ pour une fréquence d'occurrence supérieure à 5% sur le trajet Le Havre-New-York. En déduire la plage de variation de l'angle α permettant de maximiser la force propulsive sur ce trajet. Expliquer l'intérêt de connaître la plage de variation de cet angle sur le dimensionnement du système de transmission.

Sur le trajet, les valeurs moyennes de force propulsive et de vitesse du bateau sont supposées respectivement égales à 11 kN et 12 nœuds. La répartition du vent en direction et en intensité est supposée la même sur chaque aile.

Q8. Exprimer P_{prop} la puissance moyenne propulsive pour 8 ailes en fonction de F_x et V_V . Faire l'application numérique.

Le taux d'utilisation des ailes est évalué à 60% du temps de trajet car, pour des raisons de sécurité, les ailes ne sont pas utilisées pour une vitesse du bateau dépassant les 14 nœuds.

Q9. En déduire E_1 , l'énergie moyenne en kWh générée par les 8 ailes sur un trajet Le Havre – New York.

Q10. Déterminer l'énergie moyenne consommée E_2 en kWh par les deux moteurs thermiques en absence d'ailes.

La consommation en fioul du navire est de $185 \text{ g} \cdot \text{kWh}^{-1}$.

La masse des 8 ailes est considérée comme négligeable par rapport à la masse du porte-conteneurs et de son chargement. La consommation des moteurs de pilotage des ailes et son déploiement, est également négligeable par rapport à la puissance vélique générée.

Q11. Calculer le gain en fioul $G_{f\%}$ en pourcent sur le trajet Le Havre - New York.

Q12. Calculer le gain G_{CO_2} en tonnes de CO_2 sur le trajet Le Havre - New York, sachant qu'une tonne de fioul brûlée produit 3,114 tonnes de CO_2 .

Q13. Conclure sur la pertinence de l'utilisation de la propulsion vélique sur un porte-conteneurs.

Partie 2 : Prédimensionnement du mât de l'aile

Objectif : vérifier le dimensionnement de la structure du mât pliable qui supporte l'aile rigide.

L'aile développée a la particularité de pouvoir se plier en deux grâce à un système d'ouverture/fermeture situé à 18 m du pied. Le mécanisme d'ouverture/fermeture est l'objet de la partie 5. On se propose dans cette partie de vérifier le dimensionnement du mât supportant l'aile rigide.

Le système représenté en figure 4 est modélisé par le schéma mécanique illustré figure 5 dans le plan $(A, \vec{y}, \vec{z})$.



Figure 4 –
Modèle DAO de
l'aile rigide

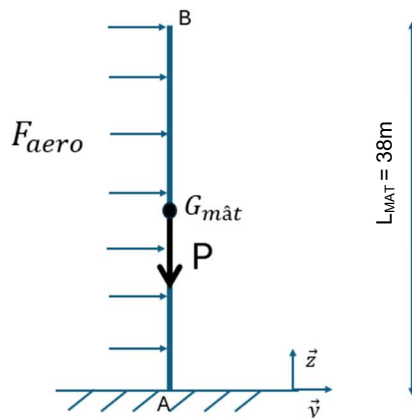


Figure 5 - Modèle mécanique RDM du mât

Hypothèses de l'étude :

- les hypothèses de la résistance des matériaux sont vérifiées ;
- l'acier utilisé est du S355, de module d'Young $E = 210 \text{ GPa}$;
- l'aile, le mât et les équipements représentent une masse $M = 50$ tonnes ;
- l'accélération de pesanteur est $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$;
- les poids des équipements et de l'aile sont modélisés par une charge ponctuelle appliquée au centre de gravité du mât $G_{\text{mât}}$, notée P exprimée en kN ;
- les coordonnées du centre de gravité $G_{\text{mât}}$ de l'aile sont : $\overrightarrow{AG_{\text{mât}}} = z_{G_{\text{mât}}} \cdot \vec{z}$ avec $z_{G_{\text{mât}}} = 17 \text{ m}$;
- la liaison avec le piédestal en A est une liaison encastrement parfaite ;
- l'extrémité B du mât est libre ;
- la force exercée par le vent $F_{\text{aéro}}$ est répartie de manière homogène sur l'aile. Elle est modélisée par une charge linéique exprimée en $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$. La pression aérodynamique associée, exprimée en $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ est définie comme suit :

$$P_{\text{aéro}} = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho \cdot V_i^2$$

Avec $C_D = 1,2$ coefficient de trainée ;
 $\rho = 1,23 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ masse volumique de l'air à 10°C et à P_{atm} ;
 $V_i = 70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ vitesse de vent extrême moyenne s'appliquant sur la voile en cas de défaillance du système de sécurité.

- la surface projetée de pénétration dans l'air de la voile : 2,2 m de largeur par 38 m de hauteur.

Q14. Indiquer à quels types de sollicitation mécanique est soumis le mât pliable de la voile dans la configuration illustrée figure 5.

Q15. À partir des données, calculer la valeur de chacune des charges s'appliquant sur le système (un coefficient de sécurité de 35% est appliqué sur la charge permanente G et un coefficient de sécurité de 50% est appliqué sur la charge linéique de vent, notée dans la suite W).

Q16. Déterminer les éléments du torseur de cohésion du mât. Tracer leur diagramme respectif.

Q17. En déduire la valeur des efforts à reprendre au niveau du système de fermeture de repliement de voile situé à 18 m du pied. Ces efforts sont intéressants à connaître dans le cas du dimensionnement de cette liaison (non étudié ici).

L'entreprise a choisi un profilé carré creux en acier S355, de côté 70 cm et d'épaisseur 50 mm. La section est supposée de classe 1 ou 2 au sens de l'Eurocode 3.

Critère de dimensionnement : la somme de la contrainte normale de flexion σ_f et normale de compression σ_c ne doit pas dépasser la limite élastique σ_y du matériau, soit :

$$\sigma_c + \sigma_f \leq \sigma_y$$

Q18. Justifier l'avantage d'utiliser un profilé creux par rapport à un profilé plein.

Q19. Vérifier la section choisie vis-à-vis de la compression seule. Indiquer quelle instabilité pourrait également être vérifiée.

Q20. Vérifier les caractéristiques de la section choisie permettant de vérifier le critère de dimensionnement énoncé précédemment.

Q21. Calculer la flèche, notée Δ , en tête du mât en B.

Dans la suite de l'étude une flèche de 1,6 m est considérée en tête de mât. Avec un déplacement horizontal non négligeable en tête de mât, le modèle RDM choisi précédemment peut-être remis en cause. Une deuxième étude RDM est réalisée, mais cette fois, sur un modèle déformé pour tenir compte de ce déplacement important en tête.

Hypothèses des petites perturbations :

- la pression du vent s'applique toujours perpendiculairement à la surface de l'aile, l'angle d'inclinaison étant faible ;
- la longueur de la poutre déformée est prise égale à la longueur non déformée.

Le schéma mécanique illustré en figure 6 modélise la situation déformée.

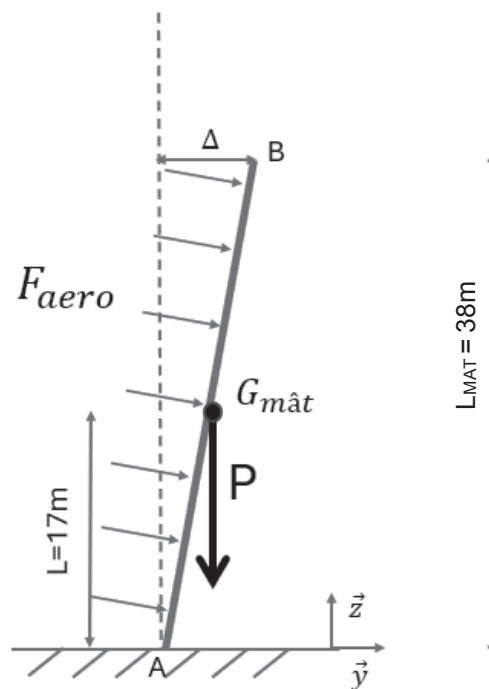


Figure 6 - Modèle mécanique RDM déformé

Q22. Justifier, à partir du modèle proposé figure 6, les deux hypothèses établies précédemment.

Q23. Déterminer l'équation du moment fléchissant $M_{fx}(z)$ et donner sa valeur maximale.

Q24. Calculer l'écart relatif sur le moment fléchissant entre le modèle déformé (figure 6) et non déformé (figure 5). Conclure.

Les déplacements étant importants, il est également envisageable d'utiliser un modèle numérique en grand déplacement pour gagner en précision. Les hypothèses des petites perturbations ne s'appliquent désormais plus.

Le document technique DT1 fournit les résultats obtenus par simulation dans le cas des petits et grands déplacements.

Q25. À l'aide du document technique DT1, comparer les résultats obtenus en grands et petits déplacements. Conclure sur les dimensions du profilé carré choisi.

Partie 3 : Dimensionnement, consommation et commande des moteurs de pivotement des ailes

Objectif : choisir le motoréducteur permettant de faire pivoter les ailes autour de l'axe vertical afin de garantir une bonne orientation de celles-ci par rapport au vent apparent. À partir de ce choix, estimer la consommation électrique nécessaire au fonctionnement à partir d'un scénario établi, et étudier les performances de l'association machine-convertisseur.

3.1 Détermination du couple moteur nécessaire

Afin de dimensionner les motoréducteurs de pivotement, il est nécessaire d'estimer le couple nécessaire à la mise en rotation de chaque voile dans le cas le plus défavorable.

Le motoréducteur doit être capable de tourner la voile lors de vent violent avec l'angle d'attaque générant le plus de couple aérodynamique opposé à la rotation.

Dans cet objectif, des simulations aérodynamiques ont été réalisées pour une vitesse de vent apparent de $V_A=32 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Des essais en soufflerie ont également été menés par l'institut aérotechnique à Saint-Cyr-l'École (Yvelines) avec un modèle d'aile 3D à l'échelle 1/20^e afin de confirmer les résultats de simulations. Ces essais mobilisent une plateforme de force 6 axes associé à un piédestal rotatif mesurant les actions mécaniques de réaction du sol dans le repère du laboratoire dont l'origine est située à l'intersection entre le niveau du sol et l'axe de rotation du piédestal.

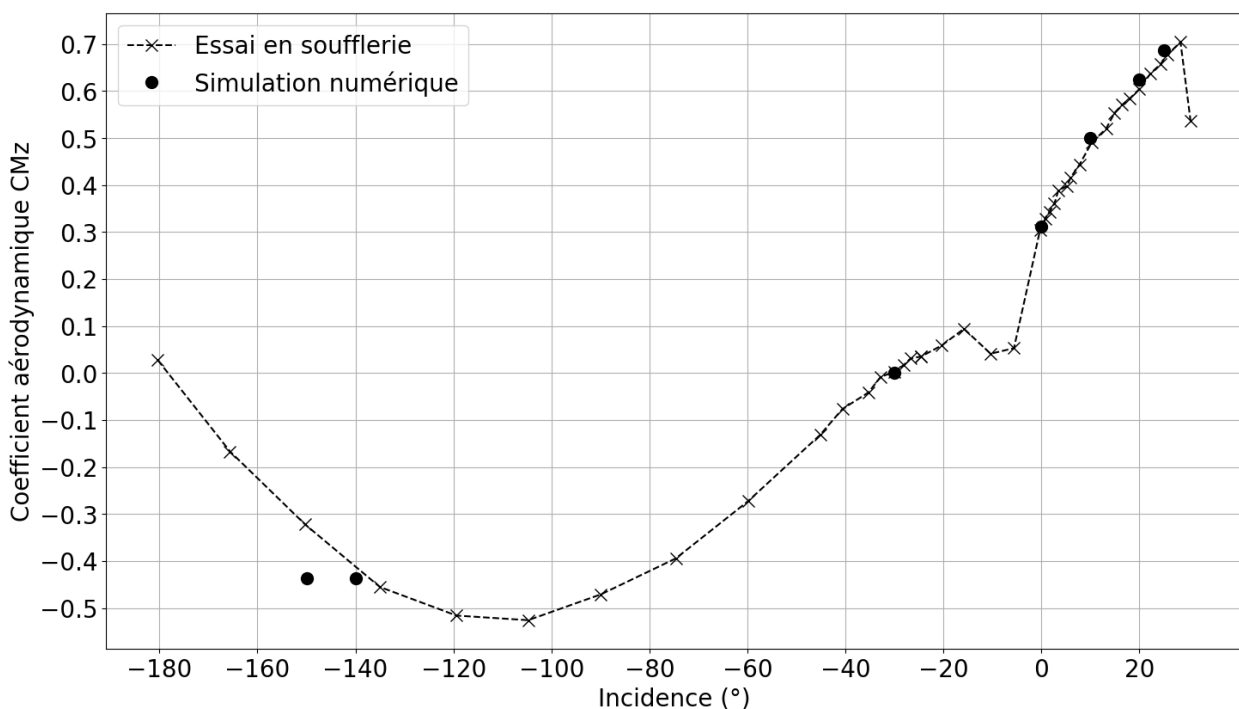


Figure 7 - Résultats de la simulation et des essais en soufflerie concernant le coefficient aérodynamique C_{Mz} du moment M_z autour de l'axe longitudinal de la voile.

Q26. À l'aide de la figure 7, déterminer la valeur absolue maximum du coefficient aérodynamique C_{Mz} et l'angle d'incidence associé.

Q27. Indiquer pourquoi seulement 9 simulations ont été réalisées contre une quarantaine d'expérimentations. Préciser l'intérêt de la simulation.

Le moment aérodynamique M_z est calculé grâce à la relation suivante :

$$M_z = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot L \cdot C_{Mz} \cdot V_A^2$$

Avec :

- la masse volumique de l'air $\rho = 1,23 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$;
- la surface de référence $S = 350 \text{ m}^2$ pour le modèle réel (et non le modèle 1/20^e) ;
- la longueur de référence $L = 10 \text{ m}$ la corde de l'aile
- la vitesse de vent apparent $V_A = 32 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Q28. Déterminer la valeur numérique maximale M_{zmax} du moment aérodynamique maximum M_z .

En prenant en compte les coefficients imposés par le constructeur, on suppose pour la suite que le moment aérodynamique est égal à 2 000 kN·m.

Un réducteur non réversible de rapport 1/1200 est proposé, induisant un couple de pertes par frottement sec évalué à 10 N·m au niveau de l'arbre moteur.

Q29. Déterminer le couple nécessaire C_m au niveau de l'arbre moteur afin de mettre en mouvement le système de réduction et l'aile soumise aux effets aérodynamiques les plus défavorables. Indiquer, en justifiant la réponse, si le couple de pertes par frottement sec du réducteur est significatif dans ce cas.

3.2 Choix du motoréducteur

Le cahier des charges fixe une vitesse de rotation maximale des ailes à 2 tr·min⁻¹.

En prenant en compte les résultats précédents et les coefficients imposés par le constructeur, le couple nécessaire maximum au niveau de l'arbre moteur est supposé de 2 kN·m. Pour le dimensionnement, le couple de démarrage indiqué dans le catalogue moteur fourni en document technique DT2 est utilisé.

Q30. À l'aide du document technique DT2, choisir un moteur asynchrone adapté.

3.3 Stratégie de limitation de surintensité

Pour la suite de l'étude, le moteur LS 315 MP est choisi, associé au réducteur 1/1200 pour mettre en mouvement chaque voile.

Q31. À l'aide du document technique DT2, déterminer le courant I_d nécessaire au démarrage d'un moteur puis celui I_{d8} pour le démarrage simultané des 8 voiles en supposant des moteurs identiques et en phase. Proposer une solution permettant de limiter l'appel du courant lié au démarrage des 8 moteurs.

3.4 Estimation de la consommation d'un moteur de pivotement

Une armoire électrique de commande est installée pour chaque aile. Concernant le contrôle du pivotement, les constructeurs ont fait le choix d'un disjoncteur de 1 500 A-400V accompagné d'un Variateur à fréquence variable (VFD) assurant l'asservissement en vitesse grâce aux codeurs des moteurs asynchrones.

Le VFD assure la variation de la fréquence et de la tension de l'alimentation aux bornes du moteur et présente également la capacité de contrôler la rampe de décélération et d'accélération du moteur à l'arrêt ou au démarrage.

À partir des données météorologiques, les constructeurs évaluent qu'il est nécessaire de faire varier l'angle d'incidence de 3° chaque minute. La loi de commande de démarrage, représentée sur la figure 8, permet au moteur d'atteindre la vitesse nominale N_m en une durée t_d égale à 10 s. Cette rampe en vitesse est écourtée par une rampe de décélération ayant la même pente en valeur absolue pour atteindre l'angle de 3° après une durée t_f .

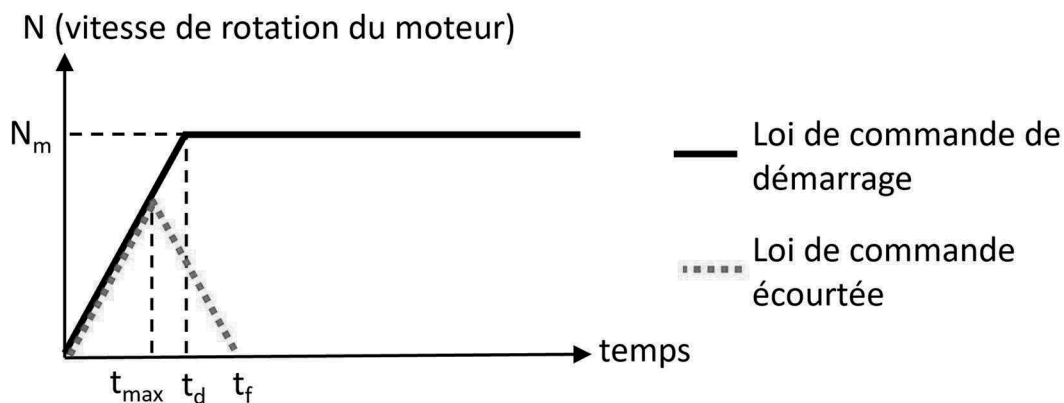


Figure 8 - Loi de commande de démarrage et loi de commande écourtée

Q32. Calculer numériquement l'accélération $\ddot{\theta}_m$ de cette loi de commande en degrés par seconde. Après avoir déterminé la variation angulaire de l'arbre moteur $\Delta\theta_m$ pour que l'aile tourne de 3° , en déduire le temps t_f pour réaliser ce mouvement avec la loi de commande écourtée.

On suppose le temps de réalisation du mouvement environ égal à 5 s.

Q33. Justifier l'hypothèse de fonctionnement du moteur en démarrage et freinage uniquement. En faisant l'hypothèse que la puissance consommée lors de ce mouvement est égale à 3 fois la puissance nominale du moteur, déterminer la puissance moyenne consommée par le moteur pour un cycle de mouvement de 5 s suivi d'un temps d'arrêt de 55 s. Conclure en comparant le résultat à la puissance des deux moteurs de propulsion de 4 800 kW.

3.5. Étude de l'association machine-convertisseur

Le moteur asynchrone repose sur le phénomène d'induction magnétique. Le stator est alimenté par le réseau de bord du navire sous la tension composée nominale $U_s = 400$ V et à la fréquence $f_s = 50$ Hz, on note ω_s la pulsation électrique du stator. Une force électromotrice est alors créée dans le rotor, ce qui induit des courants et provoque la mise en rotation de celui-ci à la vitesse mécanique $\Omega = \frac{\omega}{p}$, avec $p = 3$ le nombre de paires de pôles et $\omega_s - \omega$ la pulsation électrique du rotor.

Les grandeurs complexes sont notées $\underline{E}$ et les valeurs efficaces E .

Les notations suivantes sont utilisées :

- $\Omega_S = \frac{\omega_S}{p}$ est la vitesse de synchronisme de la machine ;
- R_S est la résistance des enroulements statoriques ;
- R_R est la résistance équivalente de l'induit ;
- $\underline{\psi}_S$ et $\underline{\psi}_R$ sont respectivement les flux magnétiques dans les circuits inducteurs et induits ;
- $\underline{E}_S = -j\omega_S \underline{\psi}_S$ est la force électromotrice au stator, et $\underline{E}_R$ est celle au rotor.

La figure 9 donne le modèle électrique monophasé équivalent de la machine.

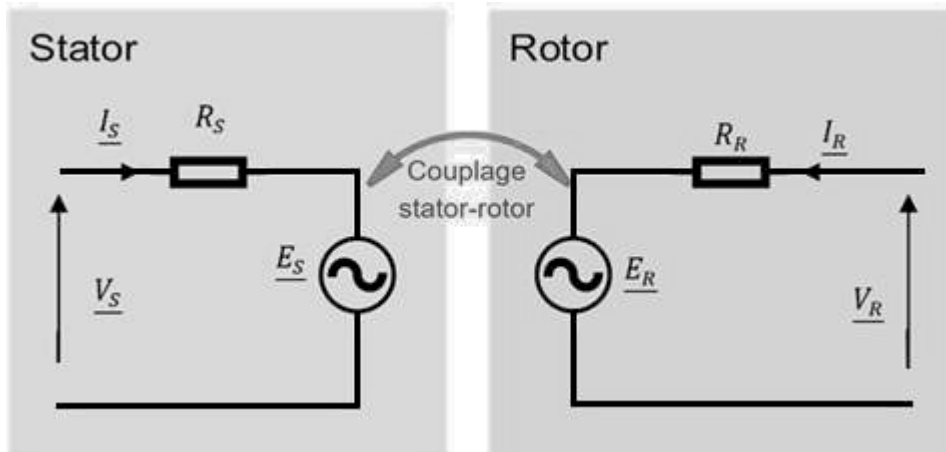


Figure 9 - Schéma électrique monophasé équivalent de la machine asynchrone étudiée

Q34. Justifier qualitativement que la pulsation électrique au rotor s'écrit $\omega_S - \omega$. En déduire par analogie avec l'expression de $\underline{E}_S$ que $\underline{E}_R = -j(\omega_S - \omega)\underline{\psi}_R$.

Q35. Calculer la vitesse de synchronisme Ω_S de la machine en $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ et N_S en $\text{tr}\cdot\text{min}^{-1}$.

Le glissement de la machine est défini par : $g = \frac{\Omega_S - \Omega}{\Omega_S}$.

Q36. À l'aide du document technique DT2, calculer le glissement nominal g_n de la machine.

Q37. Exprimer $\underline{E}_R$ en fonction de $\underline{\psi}_R$, ω_S et g .

Le rotor est en court-circuit. Les pertes Joule dans le stator et les pertes mécaniques sont supposées négligeables, et il n'y a pas de fuite du champ magnétique (donc $\underline{\psi}_S = \underline{\psi}_R$). Le modèle du rotor est ramené au niveau du stator pour effectuer les calculs.

Q38. En déduire V_R , la valeur efficace de $\underline{V}_R$, puis exprimer $\underline{E}_R$ en fonction de R_R et $\underline{I}_R$.

Q39. Exprimer $\underline{E}_S$ en fonction de $\underline{I}_R$. À l'aide des hypothèses, en déduire $\underline{E}_S$ en fonction de $\underline{I}_S$. Donner la valeur de la résistance équivalente du rotor ramenée au stator. Dessiner le modèle électrique équivalent ramené au stator dans ces hypothèses.

Q40. Le modèle est étudié dans les conditions nominales. Exprimer la puissance active consommée par le moteur P_n en fonction de U_S , g_n et R_R .

À partir de l'équation précédente, il est possible d'exprimer le couple mécanique C sous la forme suivante :

$$C = K_0 \cdot \left(\frac{V_s}{\omega_s} \right)^2 \cdot \frac{1}{\frac{g}{g_0} + \frac{g_0}{g}}$$

où K_0 et g_0 sont des constantes dépendant des paramètres intrinsèques de la machine.

Q41. Au regard de cette équation et de la question Q33, justifier le choix d'une commande « U/f constant ». En déduire le type de convertisseur statique nécessaire pour réaliser cette commande.

Partie 4 : Contrôle de la position des ailes

Objectif : étudier différents systèmes permettant la commande de l'orientation des ailes en fonction de la direction du vent.

4.1 Acquisition de la direction du vent

L'optimisation des performances des ailes nécessite une mesure précise de la force exercée par le vent sur celles-ci. Des accéléromètres, disposés en haut et en bas de chaque voile, permettent de mesurer indirectement la force du vent en enregistrant les accélérations subies, lesquelles sont ensuite traitées pour estimer cette force.

Parmi les capteurs adaptés à cette application, l'ADXL345 se distingue par sa capacité à mesurer des accélérations jusqu'à $16g$ ($g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$) sur les trois axes. Ce capteur communique via le protocole SPI (Serial Peripheral Interface) selon une configuration à quatre fils, décrite en figure 10. Le protocole SPI permet d'établir une liaison de transmission de données série synchrone entre le processeur (maître) et le capteur (esclave) : un exemple de trame en lecture est donné en figure 11. Les différents registres du capteur sont décrits dans le tableau de la figure 12.

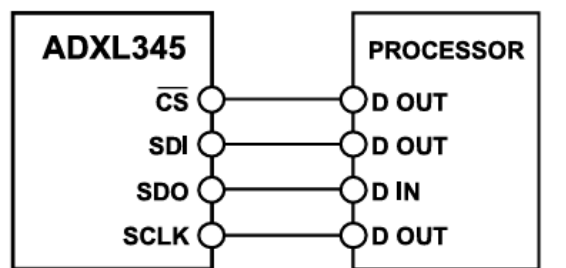


Figure 10 - Connexion SPI à quatre fils entre le capteur ADXL345 et le processeur

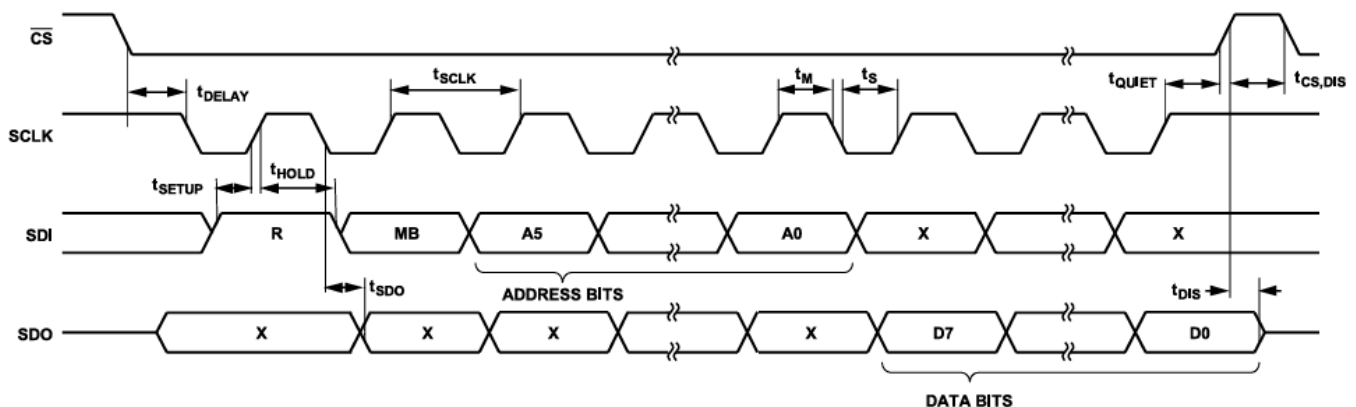


Figure 11 - Exemple d'une trame d'écriture en protocole SPI (X représente un bit qui n'est pas pris en compte).

Address					
Hex	Dec	Name	Type	Reset Value	Description
0x00	0	DEVID	R	11100101	Device ID
0x01 to 0x1C	1 to 28	Reserved			Reserved ; do not access
0x1D	29	THRESH_TAP	R/ $\bar{W}$	00000000	Tap threshold
0x1E	30	OFSX	R/ $\bar{W}$	00000000	X-axis offset
0x1F	31	OFSY	R/ $\bar{W}$	00000000	Y-axis offset
0x20	32	OFSZ	R/ $\bar{W}$	00000000	Z-axis offset
0x21	33	DUR	R/ $\bar{W}$	00000000	Tap duration
0x22	34	Latent	R/ $\bar{W}$	00000000	Tap latency
0x23	35	Window	R/ $\bar{W}$	00000000	Tap window
0x24	36	THRESH_ACT	R/ $\bar{W}$	00000000	Activity threshold
0x25	37	THRESH_INACT	R/ $\bar{W}$	00000000	Inactivity threshold
0x26	38	TIME_INACT	R/ $\bar{W}$	00000000	Inactivity time
0x27	39	ACT_INACT_CTL	R/ $\bar{W}$	00000000	Axis enable control for activity/inactivity detection
0x28	40	THRESH_FF	R/ $\bar{W}$	00000000	Free-fall threshold
0x29	41	TIME_FF	R/ $\bar{W}$	00000000	Free-fall time
0x2A	42	TAP_AXES	R/ $\bar{W}$	00000000	Axis control for single tap/double tap
0x2B	43	ACT_TAP_STATUS	R	00000000	Source of single tap/double tap
0x2C	44	BW_RATE	R/ $\bar{W}$	00001010	Data rate and power mode control
0x2D	45	POWER_CTL	R/ $\bar{W}$	00000000	Power-saving features control
0x2E	46	INT_ENABLE	R/ $\bar{W}$	00000000	Interrupt enable control
0x2F	47	INT_MAP	R/ $\bar{W}$	00000000	Interrupt mapping control
0x30	48	INT_SOURCE	R	00000010	Source of interrupts
0x31	49	DATA_FORMAT	R/ $\bar{W}$	00000000	Data format control
0x32	50	DATA0	R	00000000	X-Axis Data 0
0x33	51	DATA1	R	00000000	X-Axis Data 1
0x34	52	DATA0	R	00000000	Y-Axis Data 0
0x35	53	DATA1	R	00000000	Y-Axis Data 1
0x36	54	DATA0	R	00000000	Z-Axis Data 0
0x37	55	DATA1	R	00000000	Z-Axis Data 1
0x38	56	FIFO_CTL	R/ $\bar{W}$	00000000	FIFO control
0x39	57	FIFO_STATUS	R	00000000	FIFO status

Figure 12 - Registres du capteur ADXL345

L'objectif est de récupérer les données du capteur ADXL345 en lisant successivement les mesures des 3 axes X, Y et Z afin de minimiser le décalage temporel entre les mesures lors de leur réception par le processeur.

Le paragraphe suivant est extrait de la documentation technique du capteur (traduit depuis l'anglais), il décrit la procédure permettant la lecture des registres en protocole SPI :

$\overline{CS}$ (*Chip Select*) est la ligne d'activation du port série et est contrôlée par le maître SPI. Cette ligne doit être maintenue à l'état bas au début d'une transmission et repassée à l'état haut à la fin de celle-ci. SCLK (*Serial Clock*) est l'horloge du port série, fournie par le maître SPI. Elle doit rester à l'état haut lorsqu'aucune transmission n'a lieu. SDI (*Serial Data In*) et SDO (*Serial Data Out*) correspondent respectivement à l'entrée et la sortie. Les données sont mises à jour sur le front descendant de SCLK. Pour lire ou écrire plusieurs octets en une seule transmission, le bit MB (*Multiple Byte*), situé après le bit de lecture/écriture (R/W) dans le premier octet transféré, doit être mis à 1. Après l'adressage du registre et la transmission du premier octet de données, chaque série de huit impulsions d'horloge entraîne l'ADXL345 à pointer vers le registre suivant pour une lecture ou une écriture. Ce processus, appelé « lecture multiple », se poursuit jusqu'à l'arrêt des impulsions d'horloge et la mise à l'état haut de $\overline{CS}$. Pour effectuer des lectures ou écritures sur des registres non séquentiels, $\overline{CS}$ doit être remis à l'état haut entre chaque transmission, et le nouveau registre doit être adressé séparément.

Q42. Justifier pourquoi il est possible d'utiliser la lecture multiple pour lire les mesures de 3 axes en une seule transmission. Préciser quelle doit être la valeur du bit MB et l'adresse (en binaire) demandée par le maître pour réaliser cette transmission.

Une trame en lecture est partiellement donnée sur le document réponse DR2.

Q43. Compléter sur le document réponse DR2 les lignes $\overline{CS}$ et SDI de la trame.

Q44. En analysant la trame du document réponse DR2, indiquer la valeur mesurée sur la donnée 0 de l'axe X (X-Axis Data 0). Le résultat est attendu en binaire et en décimal.

4.2 Contrôle de l'orientation des ailes

L'algorithme d'optimisation de l'orientation des ailes pour maximiser leur efficacité en fonction des conditions du vent est à présent étudié. L'objectif est de calculer la position angulaire optimale d'une aile donnée afin d'élaborer la consigne pour l'asservissement du moteur correspondant.

Les fonctions suivantes sont pré-implémentées en Python :

- `mesure_force()` qui renvoie la norme de la force exercée par le vent sur l'aile, calculée à partir des mesures des capteurs ADXL345 ;
- `mesure_theta()` qui mesure la position angulaire réelle de l'aile par rapport au bateau, en degrés ;
- `consigne_position(theta)` qui envoie la consigne theta, exprimée en degrés, à la structure d'asservissement du moteur de l'aile (étudiée dans la sous-partie suivante).

Un premier algorithme de type « Perturbation et Observation » (P&O) est utilisé. En supposant que la force du vent F en fonction de l'angle de l'aile θ suit une courbe n'admettant qu'un unique maximum, la stratégie adoptée est la suivante (avec un pas $\delta\theta = 3^\circ$ initialement noté `d_theta` dans le script du document réponse DR3). Toutes les $\Delta t = 60$ s, on effectue les étapes suivantes :

- étape 1 : mesurer la position angulaire réelle de l'aile θ et la force du vent F .
- étape 2 : ajuster effectivement l'orientation de l'aile avec une consigne de $\theta + \delta\theta$.
- étape 3 : mesurer la nouvelle force induite par le vent F' .
- étape 4 : si $F' < F$, changer l'orientation de l'aile.

Q45. Compléter, sur le document réponse DR3, le code en Python traduisant l'algorithme P&O.

Q46. Identifier deux limitations de l'algorithme P&O, notamment au regard des puissances et des inerties mises en jeu, et proposer des pistes d'amélioration.

Un deuxième algorithme, de type montée de gradient (*gradient ascent*) est proposé. Au lieu de tourner d'un pas fixe $\delta\theta$, la mise à jour de l'angle s'effectue proportionnellement à l'estimation locale du gradient de la force. Le code partiel est donné ci-après.

1.	<code>def gradient_ascent(force, theta, eta):</code>
2.	<code>consigne_position(theta)</code>
3.	<code>sleep(60)</code>
4.	<code>theta_prime = mesure_theta()</code>
5.	<code>force_prime = mesure_force()</code>
6.	
7.	<code># Estimation du gradient</code>
8.	<code>gradient = ... # à compléter</code>
9.	
10.	<code># Mise à jour de l'angle</code>
11.	<code>theta = theta + eta * gradient</code>
12.	
13.	<code>return force_prime, theta</code>
14.	
15.	<code># initialisation</code>
16.	<code>force = mesure_force()</code>
17.	<code>theta = mesure_theta() + 3 # perturbation initiale</code>
18.	
19.	<code>eta = 0.5 # paramètre d'apprentissage, constant</code>
20.	
21.	<code>while True:</code>
22.	<code>force, theta = gradient_ascent(force, theta, eta)</code>

Q47. Donner l'expression approchée du gradient ∇F de la force en fonction de la force induite F et de l'angle θ , et de la force induite F' et de l'angle θ' après le délai Δt . En déduire l'instruction à écrire ligne 8 du code.

Q48. En justifiant, discuter si l'algorithme de montée de gradient permet de lever les limitations de l'algorithme P&O identifiées à la question Q46. Conclure.

Dans l'optique d'optimiser davantage la commande des ailes, le constructeur envisage d'intégrer un algorithme d'apprentissage automatique, capable d'exploiter l'ensemble des données historiques recueillies lors des multiples trajets. Pendant ces trajets, un accéléromètre supplémentaire a été stratégiquement positionné à un emplacement central du bateau, tandis qu'un accéléromètre était placé sur chaque aile comme décrit précédemment. Grâce à un algorithme d'optimisation directe présenté précédemment (P&O ou montée de gradient), il devient possible d'associer les angles optimaux des ailes (les sorties) aux mesures collectées par cet accéléromètre central (l'entrée). Cette approche vise à entraîner un modèle capable, à terme, de prédire les angles optimaux des différentes ailes en se basant uniquement sur les données fournies par un seul capteur centralisé.

Q49. Présenter succinctement les avantages et inconvénients de l'approche par apprentissage automatique basée sur un unique accéléromètre centralisé, comparée à l'approche précédente utilisant un capteur sur chaque aile avec un algorithme d'optimisation directe.

4.3 Asservissement en vitesse du moteur

Après avoir déterminé la consigne angulaire à imposer aux ailes, il s'agit à présent d'assurer leur asservissement en position. Pour ce faire, la commande s'effectue en régulant la position et la vitesse du moteur asynchrone. Seule la régulation en vitesse est étudiée.

Un variateur industriel prenant en charge la régulation interne du couple et du courant est utilisé. L'objectif est donc de concevoir le correcteur de la boucle de vitesse afin de garantir un suivi précis de la consigne de vitesse angulaire, notée $\omega_c(t)$.

En appliquant le théorème du moment dynamique, l'équation liant la vitesse angulaire $\omega(t)$ de l'arbre moteur, le couple moteur $c_{mot}(t)$, le couple résistant $c_r(t)$, le moment d'inertie équivalent ramené sur l'arbre moteur J et le coefficient de frottements visqueux f s'écrit :

$$J \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} = c_{mot}(t) - c_r(t) - f \cdot \omega(t)$$

Pour toute fonction temporelle, sa transformée de Laplace est exprimée avec une majuscule. Par exemple, la transformée de Laplace de $f(t)$ est notée $F(p)$. Les conditions de Heaviside sont par ailleurs supposées respectées. Le schéma-bloc simplifié de la structure d'asservissement est donné figure 13.

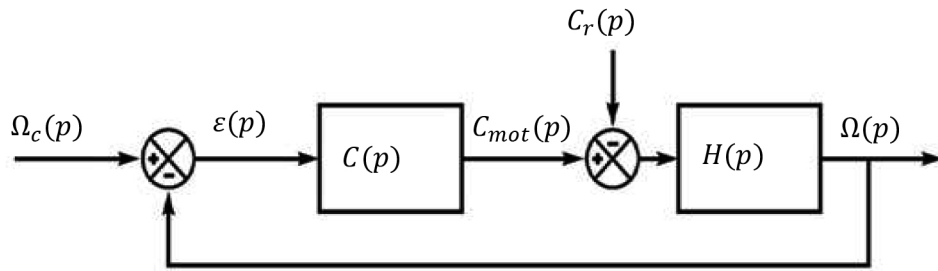


Figure 13 - Schéma-blocs simplifié de la structure d'asservissement en vitesse du moteur

Q50. Déterminer l'expression de la fonction de transfert $H(p) = \frac{\Omega(p)}{C_{mot}(p) - C_r(p)}$. Montrer qu'elle se met sous la forme suivante : $H(p) = \frac{K}{1+T \cdot p}$. Exprimer les paramètres caractéristiques K et T en fonction de J et f .

Plusieurs essais indiciels sur l'aile sont réalisés en l'absence de vent, les valeurs du couple moteur et de la vitesse de rotation sont mesurées.

Q51. Donner le protocole expérimental pour déterminer les valeurs du couple résistant c_r en l'absence de vent et du coefficient de frottements visqueux f .

Le protocole expérimental précédent a permis de déterminer l'amplitude du couple résistant correspondant seulement aux frottements secs : $c_r = 10 \text{ N}\cdot\text{m}$. Afin d'identifier expérimentalement les paramètres caractéristiques K et T , la boucle de vitesse est ouverte et le système soumis à un échelon de couple $C_{mot}(p) = \frac{c_0}{p}$, d'amplitude $c_0 = 100 \text{ N}\cdot\text{m}$. La réponse du système en vitesse est donnée sur la figure 14. La commande du moteur étant réalisée à couple constant, il est alors possible de considérer un fonctionnement linéaire du moteur.

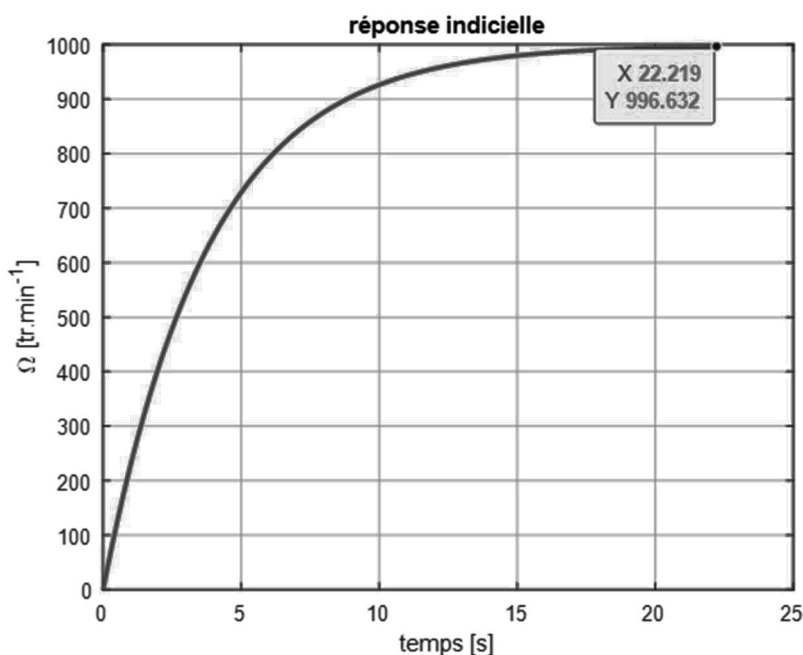


Figure 14 – Réponse indicielle du système en boucle de vitesse ouverte pour un échelon d'amplitude $c_0 = 100 \text{ N}\cdot\text{m}$

Q52. Déterminer les valeurs numériques des paramètres K et T .

Un correcteur de type proportionnel intégral (PI) est choisi. Sa fonction de transfert est :

$$C(p) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot p}\right)$$

La figure 15 fournit le diagramme de Bode associé au correcteur PI.

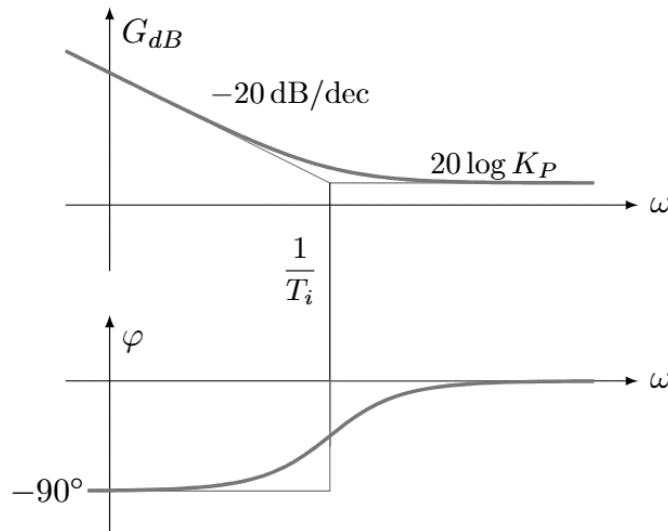


Figure 15 - Diagramme de Bode du correcteur PI

Q53. Justifier la pertinence de ce choix de correcteur.

L'objectif est d'obtenir, en boucle fermée, une dynamique deux fois plus rapide que celle observée en boucle ouverte.

Q54. Calculer la pulsation de coupure à 0 dB de $H(p)$. En déduire la valeur souhaitée $\omega_{0dB,corr}$ de la pulsation de coupure à 0 dB de la fonction de transfert en boucle ouverte corrigée.

Le paramètre T_i est choisi tel que la pulsation de cassure du correcteur soit placée une décade avant $\omega_{0dB,corr}$.

Q55. En déduire les valeurs de T_i et K_p .

Le diagramme de Bode asymptotique en gain et en phase de la fonction de transfert en boucle ouverte corrigée $C(p) \cdot H(p)$ avec les paramètres optimaux calculés précédemment est donné dans le document réponse DR4.

Q56. Déterminer les marges de stabilité du système corrigé.

Q57. Faire une synthèse sur les performances du système corrigé.

Partie 5 : Déploiement et inversion des ailes

Objectif : vérifier le dimensionnement des vérins de déploiement de l'aile.

La technologie mise en place sur le bateau prévoit un système de déploiement et d'inversion (voir figure 16) permettant aux ailes asymétriques d'utiliser les vents de bâbord et tribord. L'aile est composée de deux parties dont une est fixe sur un piédestal en pivot d'axe vertical par rapport à la carène du bateau. La deuxième, en pivot par rapport à la première, est mue grâce à deux vérins identiques dont la description est donnée sur le document technique DT3.



Figure 16 - Déploiement et repliement d'une aile

Seule la phase de déploiement de la demi-aile mobile est étudiée. Ce système est modélisé par le schéma cinématique illustré figure 17. Dans cette étude, la liaison piédestal/carène est supposée bloquée. La demi-aile fixe est, par conséquent, liée au repère de la carène.

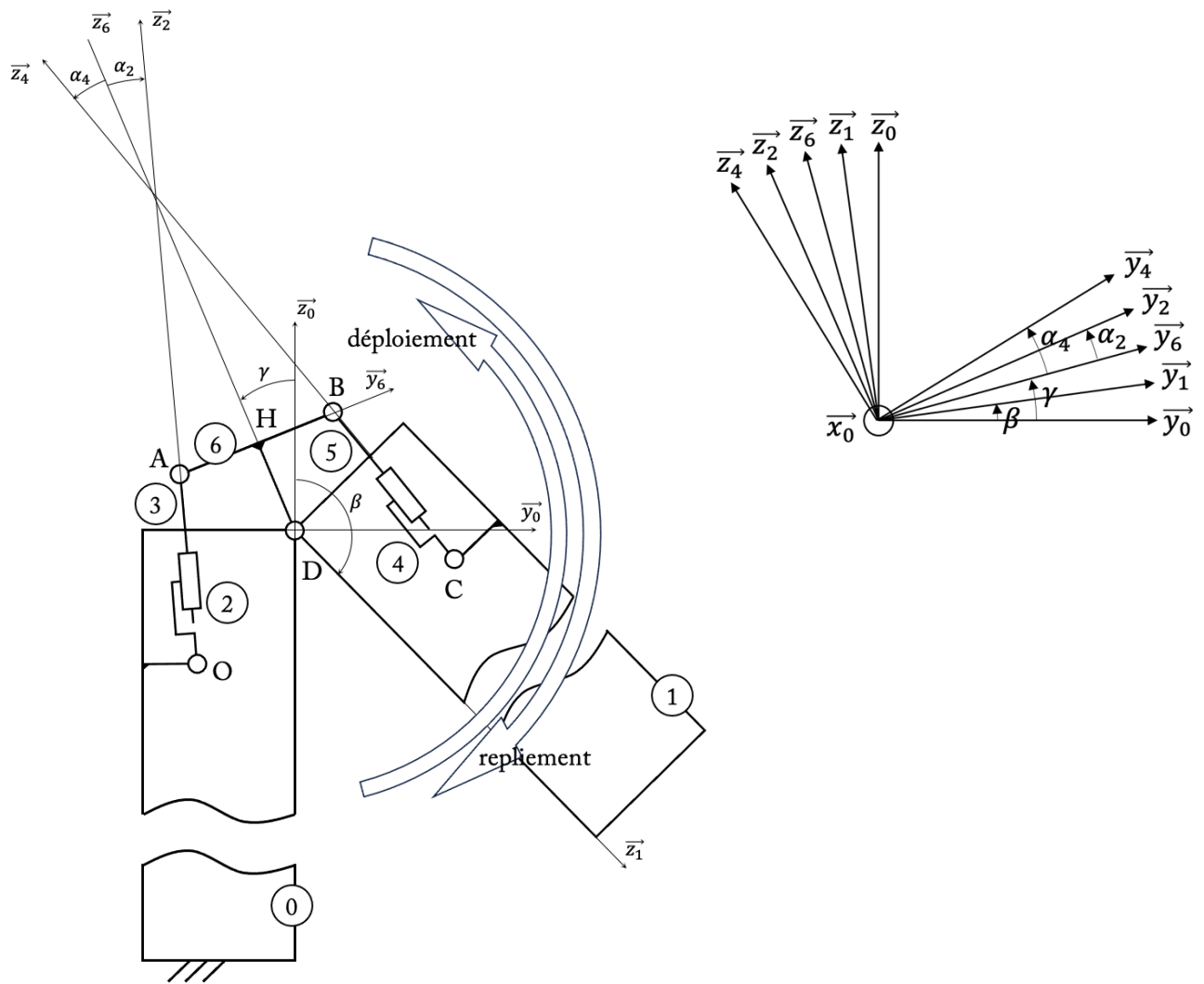


Figure 17 - Schéma cinématique du mécanisme de déploiement de l'aile mobile

La demi-aile mobile (1) est en liaison pivot d'axe $(D, \vec{x}_0)$ avec la demi-aile fixe (0).

Le système de déploiement est constitué d'un triangle (6), en liaison pivot d'axe $(D, \vec{x}_0)$ avec la demi-aile fixe (0) lié aux tiges des vérins (3) et (5) par deux liaisons pivots, respectivement d'axe $(A, \vec{x}_0)$ et $(B, \vec{x}_0)$. Les corps de vérins (2) et (4) sont, eux, en liaison pivot, respectivement d'axe $(O, \vec{x}_0)$ et $(C, \vec{x}_0)$ avec les demi-ailes (0) et (1).

Les repères associés :

- à la demi-aile fixe (0) est noté $R_0 = (O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$. Il est considéré comme galiléen ;
- à la demi-aile mobile (1) est noté $R_1 = (D, \vec{x}_0, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$;
- au triangle (6) est noté $R_6 = (D, \vec{x}_0, \vec{y}_6, \vec{z}_6)$;
- au corps de vérin (2) est noté $R_2 = (O, \vec{x}_0, \vec{y}_2, \vec{z}_2)$;
- à la tige de vérin (3) est noté $R_3 = (A, \vec{x}_0, \vec{y}_2, \vec{z}_2)$;
- au corps de vérin (4) est noté $R_4 = (C, \vec{x}_0, \vec{y}_4, \vec{z}_4)$;
- à la tige de vérin (5) est noté $R_5 = (B, \vec{x}_0, \vec{y}_4, \vec{z}_4)$.

μ est le coefficient de frottement visqueux équivalent de toutes les forces internes de frottements ramenées sur l'axe de rotation de l'aile.

Le système présente une symétrie de plan $(D, \vec{x}_0, \vec{z}_6)$ qui conduit à privilégier le paramétrage suivant :

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= (\vec{z}_0, \vec{z}_6) = (\vec{y}_0, \vec{y}_6) \\ \beta &= (\vec{z}_0, \vec{z}_1) = (\vec{y}_0, \vec{y}_1) \end{aligned} \right\} \quad \text{avec} \quad \gamma = \frac{\pi - \beta}{2}$$

$$\alpha_2 = (\vec{z}_6, \vec{z}_2) = (\vec{y}_6, \vec{y}_2)$$

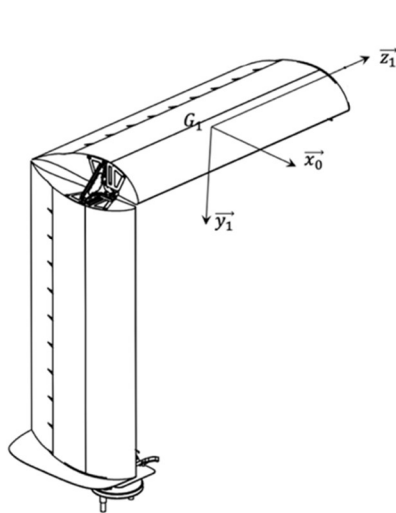
$$\alpha_4 = (\vec{z}_6, \vec{z}_4) = (\vec{y}_6, \vec{y}_4)$$

$$\begin{aligned} \vec{OA} &= \lambda(t) \cdot \vec{z}_2 & ; & \quad \vec{AH} = \frac{l_6}{2} \cdot \vec{y}_6 ; \\ \vec{CB} &= \lambda(t) \cdot \vec{z}_4 & ; & \quad \vec{OD} = l \cdot \vec{y}_0 + L \cdot \vec{z}_0 ; \\ \vec{AB} &= l_6 \cdot \vec{y}_6 & ; & \quad \vec{CD} = l \cdot \vec{y}_1 - L \cdot \vec{z}_1 ; \\ \vec{HD} &= -h_6 \cdot \vec{z}_6 \end{aligned}$$

La position du centre de gravité de la demi-aile mobile est donnée :

$$\vec{DG}_1 = -e_1 \cdot \vec{y}_1 + h_1 \cdot \vec{z}_1$$

Longueurs	l_6	h_6	l	L	e_1	h_1
Valeurs (mm)	2 340	1 583	1 380	1 662	1 106	8 100



Solide	1
Masse	$m_1 = 16,4$ tonnes
Éléments d'inertie	$\vec{I}_{G_1}(1)$ $= \begin{bmatrix} A_1 & -F_1 & 0 \\ -F_1 & B_1 & 0 \\ 0 & 0 & C_1 \end{bmatrix}_{(\vec{x}_0, \vec{y}_1, \vec{z}_1)}$

$$A_1 = 4,3 \cdot 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$B_1 = 4,7 \cdot 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

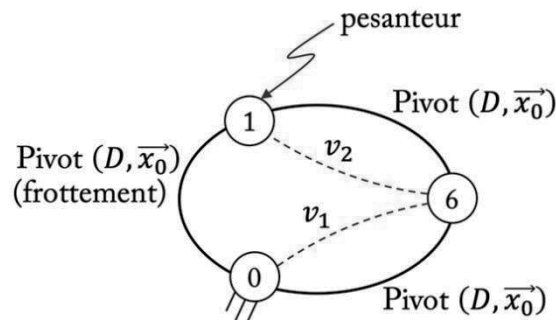
$$C_1 = 0,2 \cdot 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$F_1 = 10,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Figure 18 - Paramétrage cinétique

La masse et les éléments d'inertie des solides (2) à (6) sont considérés négligeables devant ceux du solide (1). $\Sigma = \{1,2,3,4,5,6\}$ est l'ensemble des solides en mouvement.

La géométrie du problème et les actions mécaniques en jeu conduisent à émettre une hypothèse de problème plan. De plus, une étude statique préliminaire sur les vérins a permis de proposer un modèle simplifié dont le graphe de structure est le suivant :



Effort exercé de 0 sur 6 par le vérin v_1 ((2) + (3)):

$$\{\tau_{v_1 \rightarrow 6}\} = \left\{ \begin{array}{c} \overrightarrow{R_{v_1 \rightarrow 6}} = -p_1 S \vec{z}_2 \\ \vec{0} \end{array} \right\}_A \text{ en déploiement de l'aile.}$$

Effort exercé de 6 sur 1 par le vérin v_2 ((4) + (5)):

$$\{\tau_{v_2 \rightarrow 1}\} = \left\{ \begin{array}{c} \overrightarrow{R_{v_2 \rightarrow 1}} = p_2 S \vec{z}_4 \\ \vec{0} \end{array} \right\}_B \text{ en déploiement de l'aile.}$$

avec $p_1 = p_2 = p$ la pression respectivement dans les vérins v_1 et v_2 et S les surfaces utiles des pistons pendant la phase de déploiement.

Q58. Déterminer, par une fermeture géométrique dans le polygone $OAHD$ projetée dans la base $(\vec{x}_0, \vec{y}_6, \vec{z}_6)$, l'expression de la course des vérins $\lambda(t)$ en fonction de l'angle d'ouverture de l'aile mobile (1) $\beta(t)$ et des paramètres géométriques.

La courbe correspondant à la relation trouvée a été tracée figure 19.

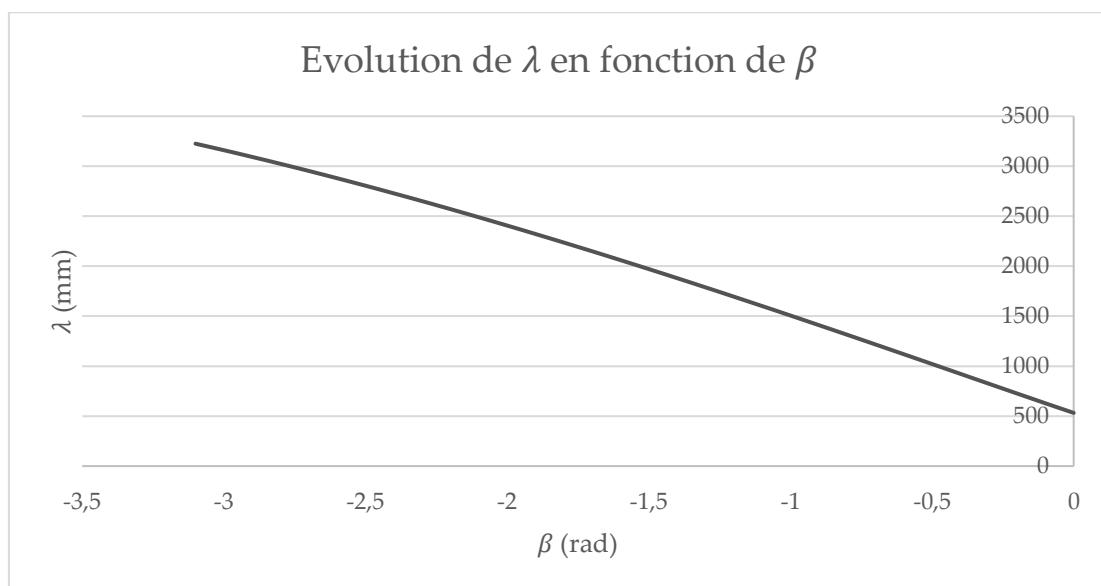


Figure 19 - Évolution de λ en fonction de β

Q59. À partir de la figure 19, mesurer la course des vérins. Justifier le choix de vérin fait par le concepteur du point de vue de ce critère à partir du document technique DT3.

En première approximation, la relation trouvée précédemment est approchée par une relation affine du type $\lambda(t) = a \cdot \beta(t) + b$.

Q60. Dédurre de la figure 19 les coefficients a et b de la relation affine entre $\lambda(t)$ et $\beta(t)$.

Q61. Justifier la forme de la matrice d'inertie $\bar{I}_1(G_1)$.

Q62. Exprimer l'énergie cinétique $E_{c,\Sigma/0}$ de l'ensemble Σ en fonction de $\lambda(t)$. En déduire l'inertie équivalente J_{eq} ramenée à la rotation de l'aile 1 par rapport à l'aile 0. Faire l'application numérique.

Q63. Exprimer la puissance galiléenne des actions extérieures et intérieures à l'ensemble Σ en fonction de $\dot{\beta}$.

Q64. Appliquer le théorème de l'énergie cinétique à l'ensemble Σ . En déduire l'expression de la pression p dans les vérins en fonction de β et de ses dérivées.

Le constructeur décide d'utiliser la loi en trapèze illustrée figure 20 pour le pilotage des vérins avec une accélération angulaire $\ddot{\beta} = 0,05^\circ \cdot s^{-2}$ choisie empiriquement. T_a et T_d sont respectivement les durées d'accélération et de décélération des vérins. Ici, $T_a = T_d$.

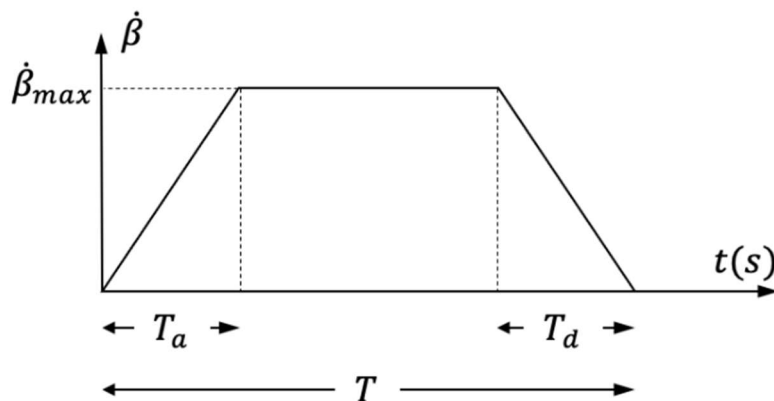


Figure 20 - Allure de la loi en trapèze de pilotage des vérins

Le cahier des charges impose une durée T de déploiement ($\beta = -180^\circ$ à $\beta = 0^\circ$) de la demi-aile de 270 s.

Q65. Expliquer l'avantage d'une loi en trapèze (figure 20) pour le pilotage de l'aile du point de vue des effets dynamiques. Calculer $\dot{\beta}_{max}$, en considérant l'accélération angulaire choisie.

Q66. Considérant que le cas d'étude est la phase de déploiement, indiquer si le vérin v_1 est utilisé en sortie ou en rentrée de tige. En déduire, à partir du document technique DT3, la surface utile S (sur laquelle s'applique la pression) des vérins.

Dans la suite de l'étude, l'action mécanique due aux frottements visqueux est négligée.

Q67. Calculer $\beta(T_a)$. En déduire l'expression simplifiée de l'expression de p obtenue à la question Q64 et celle de $p_{\max_acc}$, la pression maximale dans les vérins pendant la phase d'accélération.

L'application numérique permet d'obtenir la valeur de la pression maximale dans les vérins pendant la phase d'accélération $p_{\max_acc} = 32,5$ bars.

Q68. Déterminer, pour $\beta = -\frac{\pi}{2}$, l'expression de $p_{\max_cst}$, la pression maximale dans les vérins pendant la phase à vitesse de déploiement constante. Faire l'application numérique.

Q69. Conclure sur le choix du vérin à partir du document technique DT3.

Q70. Sachant que la puissance utile du vérin choisi est de 5 kW, calculer l'énergie nécessaire en kWh pour les 8 vérins utilisés 20 fois sur un trajet.

Partie 6 : Synthèse

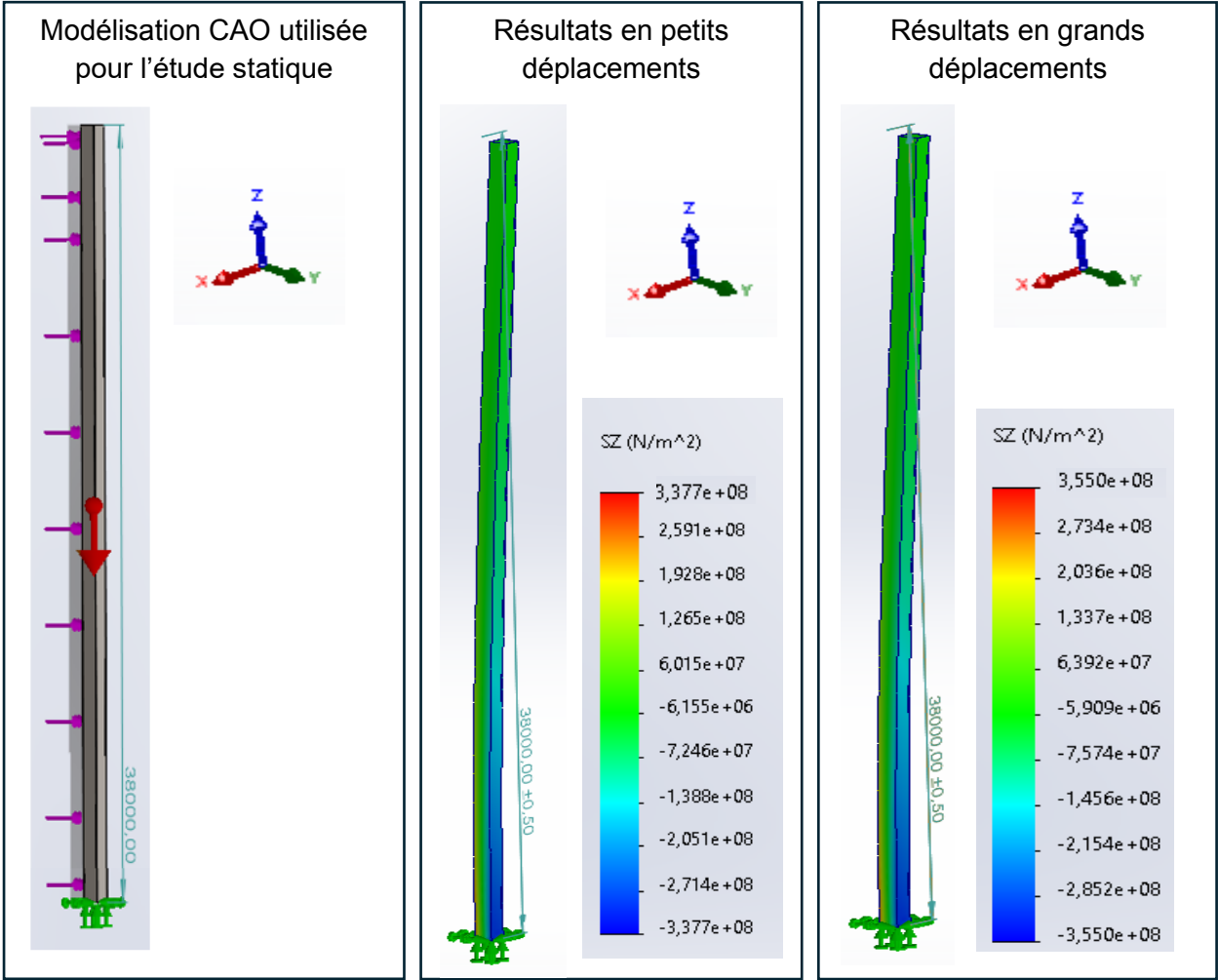
Objectif : réaliser un bilan énergétique de la propulsion vélique.

Les études précédemment menées ont permis d'estimer les différentes puissances mises en jeu pour une utilisation optimale des ailes. Les résultats obtenus pour un trajet le Havre - New York sont résumés ci-dessous :

- consommation optimisée avec l'algorithme d'apprentissage automatique des moteurs de pivotement : 500 kWh ;
- consommation du système hydraulique complet de déploiement des ailes, avec prise en compte des différents rendements : 120 kWh ;
- consommation de l'informatique embarquée pour la gestion des ailes : 50 kWh ;
- énergie économisée grâce aux 8 ailes rigides : 85 000 kWh.

Q71. Conclure sur la pertinence du système au regard des différents résultats énoncés précédemment.

Document technique DT1 – Résultats de l'étude statique : contrainte normale de flexion σ_z



Moteurs asynchrones triphasés fermés LS

Sélection

IP 55 - 50 Hz - Classe F - Δ T 80 K - 230 V Δ / 400 V Y et 400 V Δ - S1 - Classe IE1

6 pôles
1000 min⁻¹

IE1

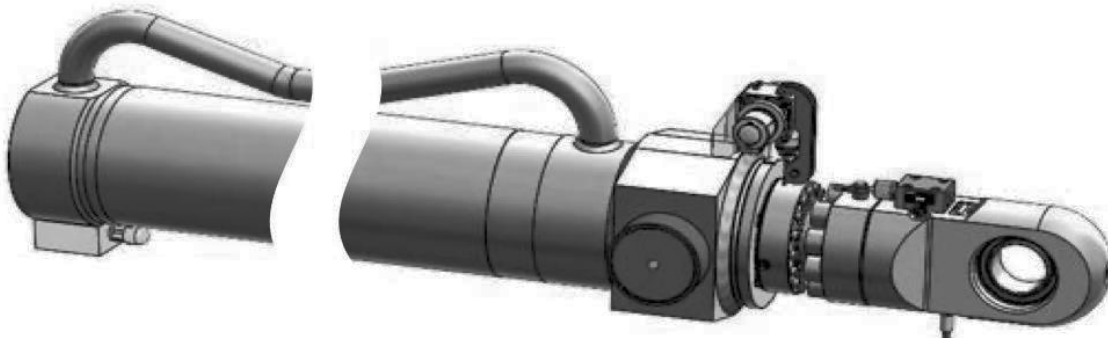
Type	Puissance nominale		Vitesse nominale	Moment nominal	Intensité nominale	Facteur de puissance			Rendement* CEI 60034-2-1; 2007		Courant démarrage/ Courant nominal		Moment démarrage/ Moment nominal	Moment maximum/ Moment nominal	Moment d'inertie	Masse	Bruit
	P _N kW	N _N min-1		M _N N.m	I _{N(400V)} A	4/4	3/4	2/4	η	I _d / I _n	M _d /M _n	M _u /M _n	J kg.m2	IM B3 kg	LP db(A)		
LS 315 SN	75	983		729	142	0.82	0.78	0.67	92.8	6.5	2.5	2.7	1.3	438	65		
LS 315 MP	90	980		877	164	0.85	0.83	0.76	92.9	7.2	2.4	2.9	3.74	760	74		
LS 315 MR	110	980		1072	200	0.85	0.83	0.76	93.3	7.2	2.4	2.9	4.36	850	74		



Product Description

Customer CWS
Reference M02959
Cylinder DE ø230 x 110 stroke 2750

Customer Reference
Designation



Cylinder definition

Bore 230 mm øA
Rod 110 mm øT
Stroke 2750 mm C
CCD 550 mm EAF
Pressure
Full section WP 250 bars Psp
Annular section WP 250 bars Psa
Force
Fsp max 1 287 974 N Max Push Force
Fsp Effective Push Force
Fsa max 993 372 N Max Pull Force
Fsa Effective Pull Force

Revision Table

Rev	Date	Visa	Update
A	22/07/24	ACO	Creation (from French version)

Vocabulaire :

- Bore : chambre
- Rod : tige
- Stroke : course
- Pressure : pression

Modèle CMEN v3

Nom de famille : []
(Suivi, s'il y a lieu, du nom d'usage)

Prénom(s) : []

Numéro Candidat : [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] **Né(e) le :** [] [] / [] [] / [] [] [] []

Cadre réservé aux candidats de concours de recrutement et examens professionnels

Concours : **Option / Section :** **N° d'inscription :** [] [] []

Cocher une seule case parmi les six types de concours suivants :
☐ externe ☐ 3^e externe ☐ externe spécial ☐ interne ou 1^{er} interne ☐ 2nd interne ☐ 2nd interne spécial

Examen professionnel pour l'avancement au grade de :

Cadre réservé aux candidats d'examens et du concours général

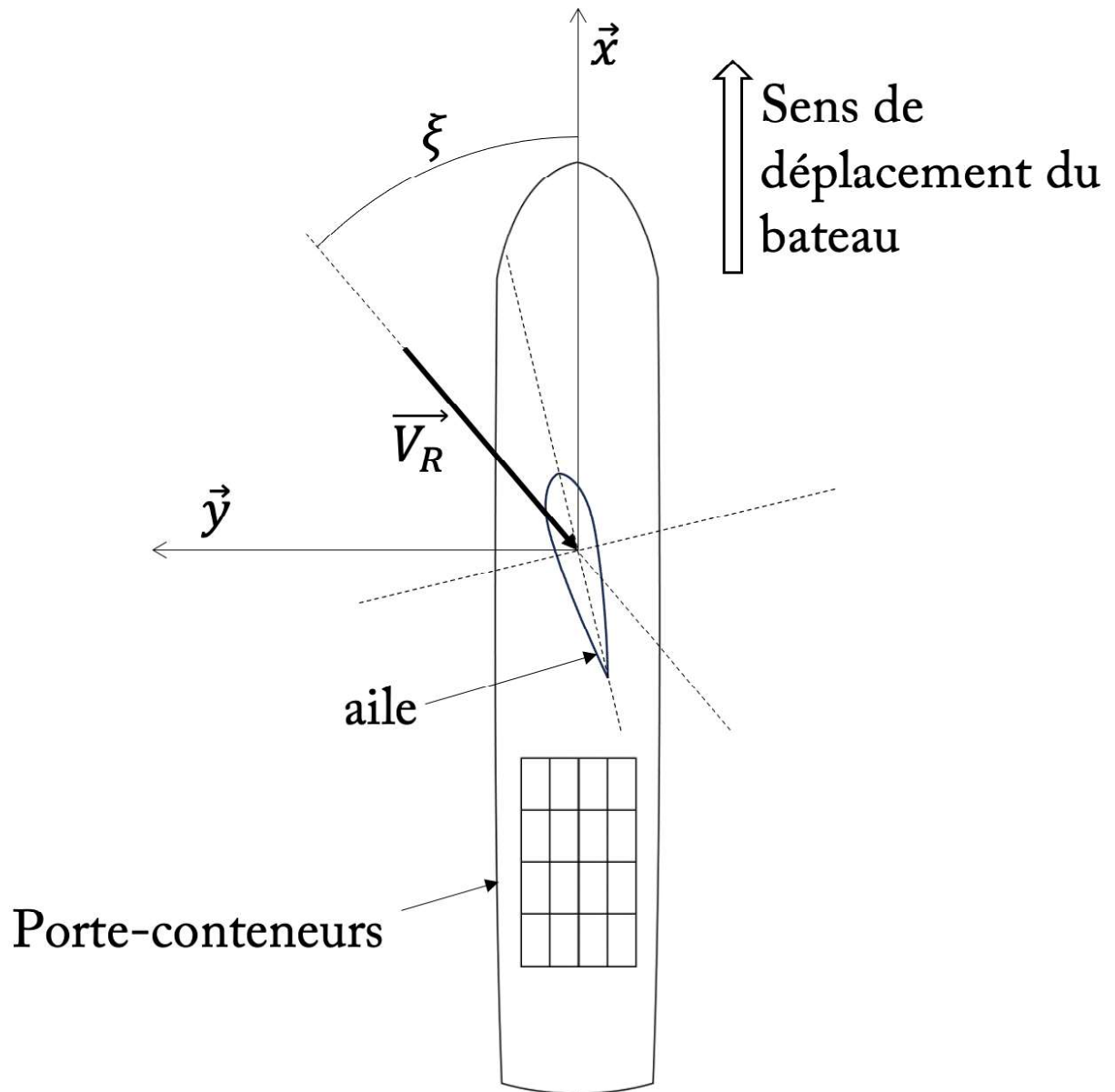
Examen : **Série / Spécialité :**

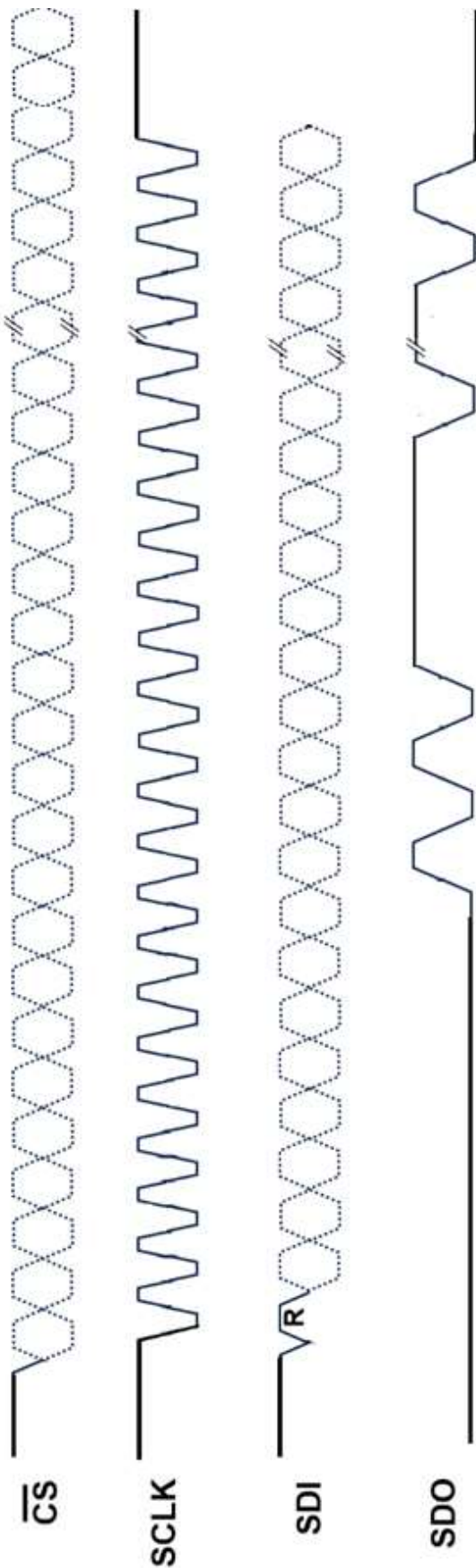
Epreuve - Matière : **Session :**

DR1 - DR2 - DR3

NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

Document Réponse DR1 - Vecteurs vents et trainée/portance





```
def PO(force, d_theta):
    theta = ...
    consigne_position(...)
    sleep(10) # attendre 10 secondes
    force_prime = ...
    if force_prime < force :
        ...
    ...
    return force_prime, d_theta

# initialisation
force = ...
d_theta = 3

while True:
    ...
```

Modèle CMEN v3

Nom de famille :

(Suivi, s'il y a lieu, du nom d'usage)

 **Prénom(s) :**

Numéro Candidat :

Né(e) le : / /

Cadre réservé aux candidats de concours de recrutement et examens professionnels

Concours : **Option / Section :** **N° d'inscription :**

Cocher une seule case parmi les six types de concours suivants :

☐ externe ☐ 3^e externe ☐ externe spécial ☐ interne ou 1^{er} interne ☐ 2nd interne ☐ 2nd interne spécial

Examen professionnel pour l'avancement au grade de :

Cadre réservé aux candidats d'examens et du concours général

Examen : **Série / Spécialité :**

Epreuve - Matière : **Session :**

EAE STI 1

DR4

**Tous les documents réponses sont à rendre,
même non complétés.**

NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

Document Réponse DR4 - Diagramme de Bode boucle ouverte corrigée $C(p) \cdot H(p)$

