



Devoir de rentrée

SI - MP1 - MP2

Table des matières

1	Chariot JacXson - CCINP PSI 2023	2
1.1	Contexte de l'étude	2
1.1.a	Présentation du produit	2
1.1.b	Structure du chariot JacXson	4
1.2	Commande des vérins électriques	4
2	Freinage d'un avion	6
3	Solide soumis à l'action de la pesanteur	8
4	Identification dans le plan de Bode	8
5	PalanAmain	9
5.1	Présentation du système	9
5.2	Modélisation	9
5.3	Étude	10
6	Contact ponctuel pour une moto	10
7	Chaudière à granulés	11
7.1	Modélisation en SLCI du corps de chauffe de la chaudière	12
7.2	Étude des performances du corps de chauffe de la chaudière	13
7.3	Étude de l'asservissement du corps de chauffe de la chaudière	14
8	Gain d'adaptation	15
9	Quille pendulaire de bateau	16
9.1	Mise en évidence de l'intérêt d'une quille pendulaire	17
9.2	Validation des performances cinématiques	18

Consignes

- Le devoir est long, ne pas attendre les derniers jours pour le commencer.
- A rendre le lundi 1 Septembre 2025. **Aucun retard ne sera accepté.**
- Copies propres et bien présentées : encadrer vos résultats, souligner les applications numériques (avec une règle bien sûr)...

- Les graphes de structure/liaison et schémas cinématiques doivent être réalisés **en couleur et proprement** afin qu'ils soient bien compréhensibles.
- L'évaluation se fera par compétence et ne donnera pas lieu à une note, l'objectif est de vous remettre la SI en tête et de faire un état des lieux pour orienter les révisions. Il est donc complètement inutile de (re)copier...
- Les exercices sont indépendants.
- Ne pas oublier de rendre les Documents Réponses (DR), avec vos noms. Même s'ils ne sont pas remplis.

1. Chariot JacXson - CCINP PSI 2023

1.1 Contexte de l'étude

L'entretien des avions représente un budget conséquent pour les compagnies aériennes (de l'ordre de 10% des dépenses d'exploitation). Chaque type d'avion possède son propre programme de maintenance.

Parmi les opérations de maintenance, la révision d'un moteur s'avère l'une des plus contraignantes. En effet, ce dernier doit être désassemblé de l'avion, habituellement par l'intermédiaire de treuils à chaîne, suspendus à un échafaudage et actionnés manuellement par plusieurs opérateurs. Ces maintenances s'avèrent longues et très délicates vis-à-vis de la sécurité des techniciens et occasionnent des risques de dommages sur les composants.

1.1.a Présentation du produit

Le *JacXson U70* (Figure 1), développé par le groupe EXCENT, basé à Toulouse, se destine aux activités de pose/dépose des moteurs sur des avions moyens courriers. Ce produit se substitue aux traditionnels outillages très fastidieux à mettre en œuvre, en proposant une assistance mécanique entièrement pilotée et en répondant à tous les impératifs liés à la manipulation des moteurs lors des différentes séquences de pose et dépose. Il présente également la particularité de s'adapter aisément aux modèles de moteurs usuels pour ce type d'avion.

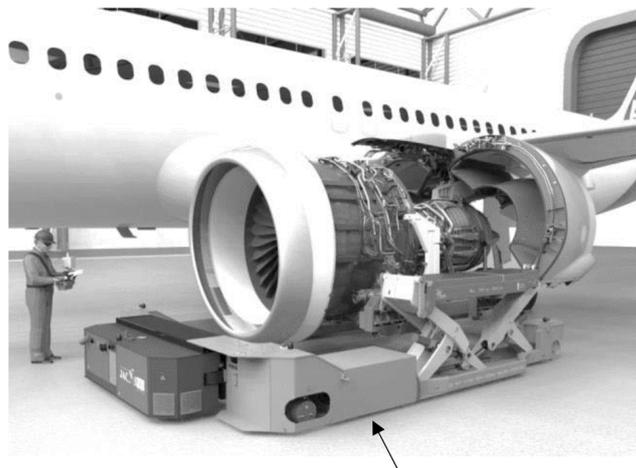


FIGURE 1 – Chariot JacXson en action

Selon ses concepteurs, les avantages du chariot *JacXson U70* sont :

- un gain de temps significatif sur les opérations et par conséquent un gain de coût ;
- une amélioration considérable de la sécurité des opérateurs et de l'ergonomie de travail ;
- un risque très réduit de dommage sur les moteurs et sur leur environnement proche ;

- une quantité d'outillages à gérer fortement diminuée.

Le chariot *JacXson U70* se présente globalement sous la forme d'un chariot élévateur. Un châssis de manutention appelé "stand" est préalablement fixé au moteur d'avion afin de manipuler ce dernier sans risque d'avarie (le stand est une structure mécanique fournie par le constructeur du moteur). L'ensemble moteur + stand est supporté par deux poutres par l'intermédiaire de fourches solidaires de ces dernières (Figure 2). Un sous-système motorisé adapte automatiquement l'écartement des deux poutres à la largeur du stand.

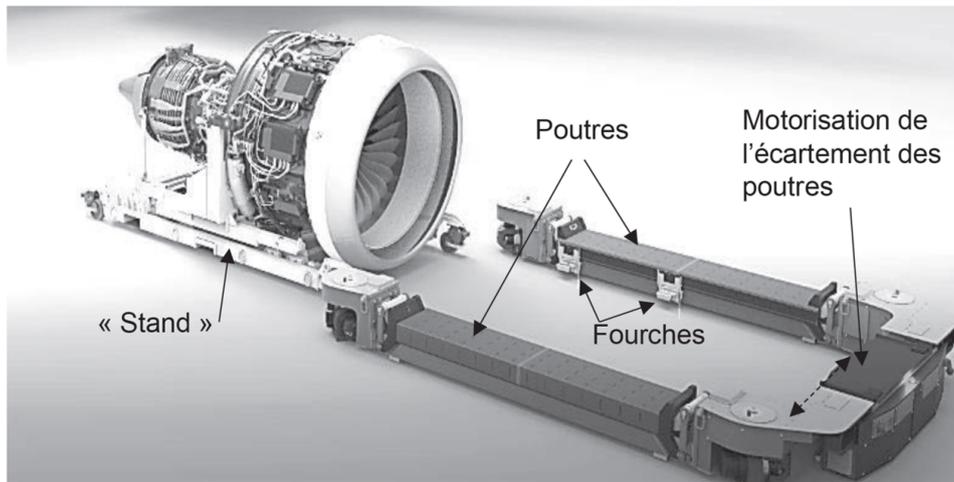


FIGURE 2 – Principe de préhension d'un moteur d'avion

Chaque poutre est liée au châssis du chariot par deux sous-systèmes "bras élévateur" (Figure 3), chacun constitué d'un bras principal, d'un bras secondaire et d'un vérin électrique (intégrant un moteur, un réducteur, un frein à manque de courant). La commande différenciée de chacun des quatre bras élévateurs permet de soulever et d'orienter le stand selon des angles de tangage et de roulis.

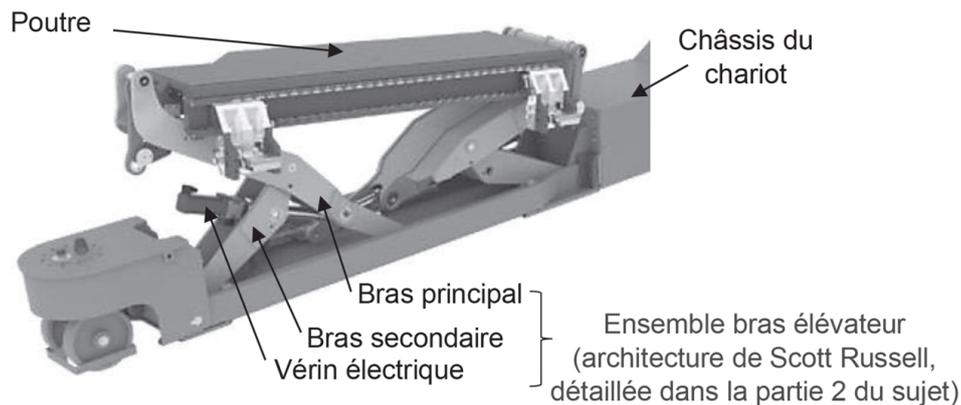


FIGURE 3 – Ensemble bras élévateur

Deux roues arrière motrices et directrices et deux paires de roues avant uniquement directrices assurent des mobilités omnidirectionnelles au porteur (Figure 4).

Le *JacXson U70* a aussi l'avantage de pouvoir être entièrement piloté à distance par une seule personne grâce à une interface tactile mobile.



FIGURE 4 – Déplacements possibles du JacXson

1.1.b Structure du chariot JacXson

Les liaisons du moteur d'avion à l'aile sont réalisées par un jeu de 4 broches à l'avant de celui-ci et un jeu de 2 broches à l'arrière (Figure 5). Lors de l'amarrage du moteur à l'aile, il est nécessaire de garantir un parfait positionnement entre le moteur et ces broches.

Pour cela, le moteur doit pouvoir être orienté par rapport à l'aile suivant un angle de tangage (autour de l'axe \vec{z}_0) et suivant un angle de roulis (autour de l'axe \vec{x}) schématisé sur la Figure 6. De plus, des mobilités transversales du moteur par rapport au chariot doivent rester libres (selon les axes \vec{x} et \vec{z} du référentiel du stand) de façon à faciliter l'engagement des broches.

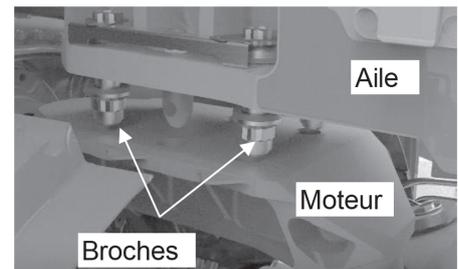


FIGURE 5 – Fixation du moteur à l'aile

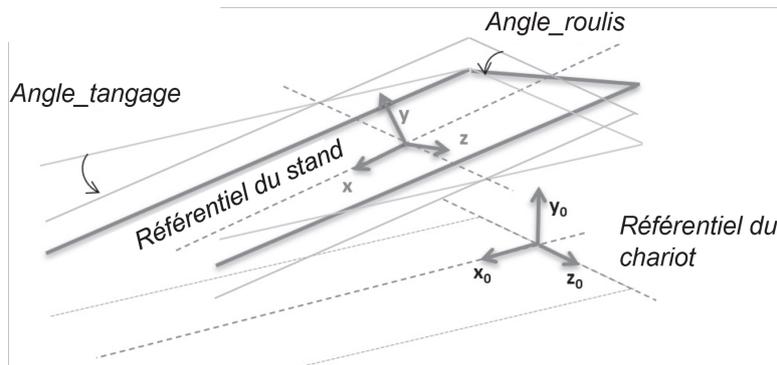


FIGURE 6 – Mobilité du stand par rapport au référentiel du chariot

1.2 Commande des vérins électriques

La commande des 4 vérins électriques permet de piloter le *JacXson U70* suivant différents modes.

La Figure 7 présente le repérage des quatre actionneurs : V_{G1} , V_{G2} , V_{D1} , V_{D2} .

Les variables associées aux ordres de commande d'un actionneur V_i sont notées V_{i+} et V_{i-} , pour respectivement un déplacement vers le haut et un déplacement vers le bas du bras associé.

Un algorithme permet, à partir des signaux délivrés par les butées "soft" de chaque bras, de générer un signal "tout ou rien", représenté par la variable *Butée*, active si une butée soft est atteinte.

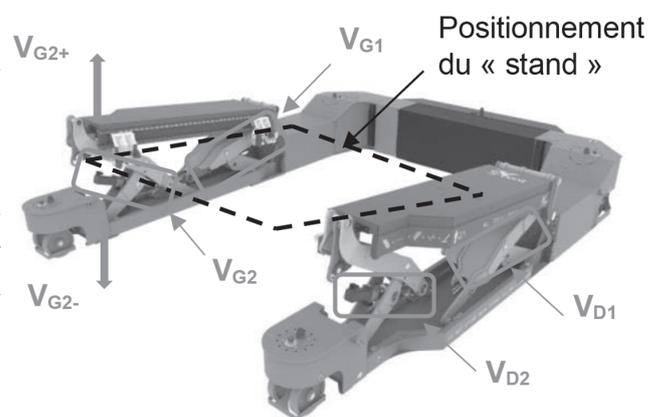


FIGURE 7 – Pilotage des vérins électriques

L'opérateur a la possibilité de sélectionner 3 modes à partir d'une télécommande :

- *Mode Levage* : déplacement du stand avec une commande identique sur les quatre actionneurs; on note $L+$ la variable qui génère un déplacement ascendant et $L-$ un déplacement descendant du stand;
- *Mode Tangage* : rotation du stand autour de l'axe \vec{z}_0 du référentiel du chariot (Figure 6); on note, $T+$ la variable qui génère une rotation suivant le sens direct et $T-$ une rotation dans le sens indirect;
- *Mode Roulis* : rotation du stand autour de l'axe \vec{x} de son référentiel (Figure 6); on note $R+$ la variable qui génère une rotation suivant le sens direct et $R-$ une rotation dans le sens indirect.

Ces modes sont activés respectivement par les variables : Levage, Tangage et Roulis.

Le diagramme d'état partiel du pilotage des actionneurs ainsi que le diagramme d'état composite du *Mode Roulis* sont donnés sur les Figures 8 et 9.

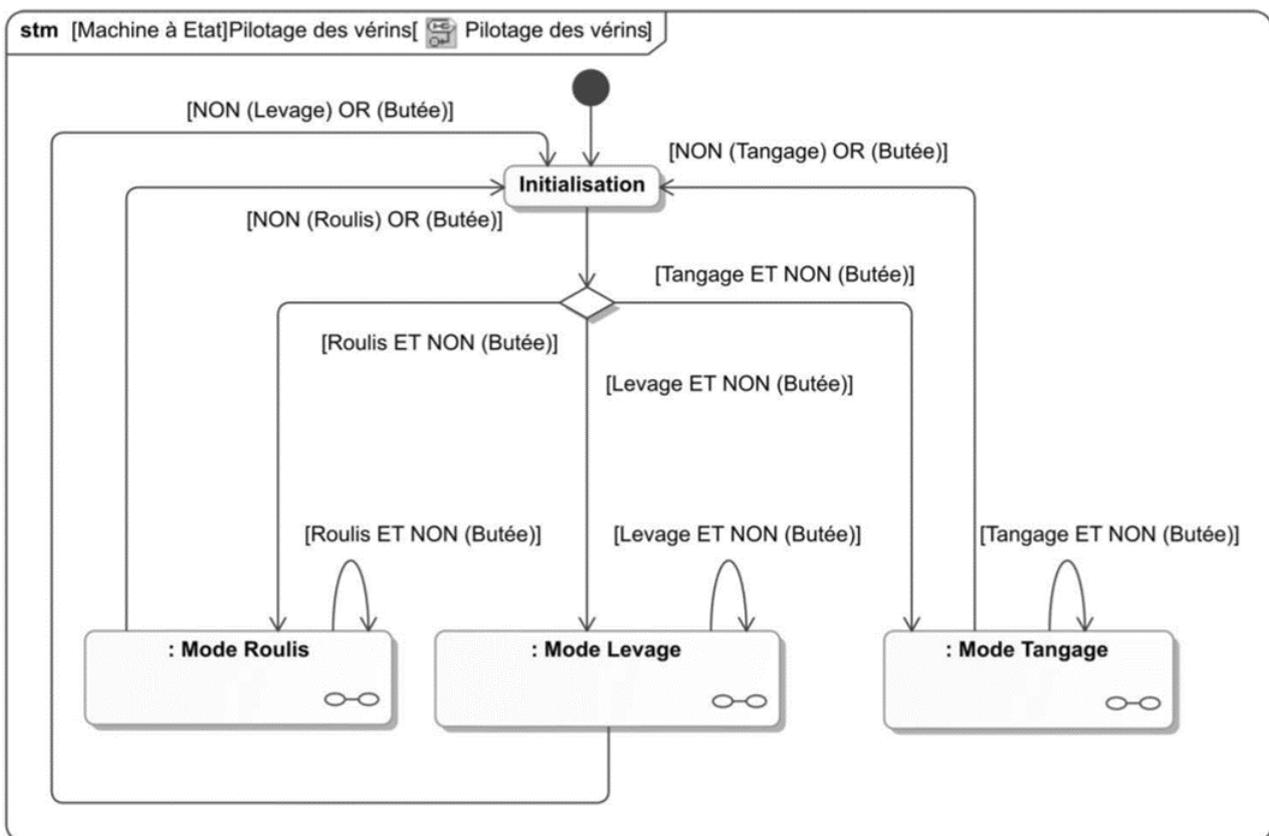


FIGURE 8 – Diagramme d'état du pilotage des vérins

Question 1: Compléter sur les documents réponse 1 et 2 les diagrammes d'états composites du *Mode Levage* et du *Mode Tangage* en précisant les actions et évènements manquants.

Question 2: Compléter le chronogramme du document réponse 3, en traçant les signaux V_{G1+} , V_{G1-} , V_{D2+} et V_{D2-} résultant d'une commande de levage $L+$ suivie d'une commande de tangage $T+$.

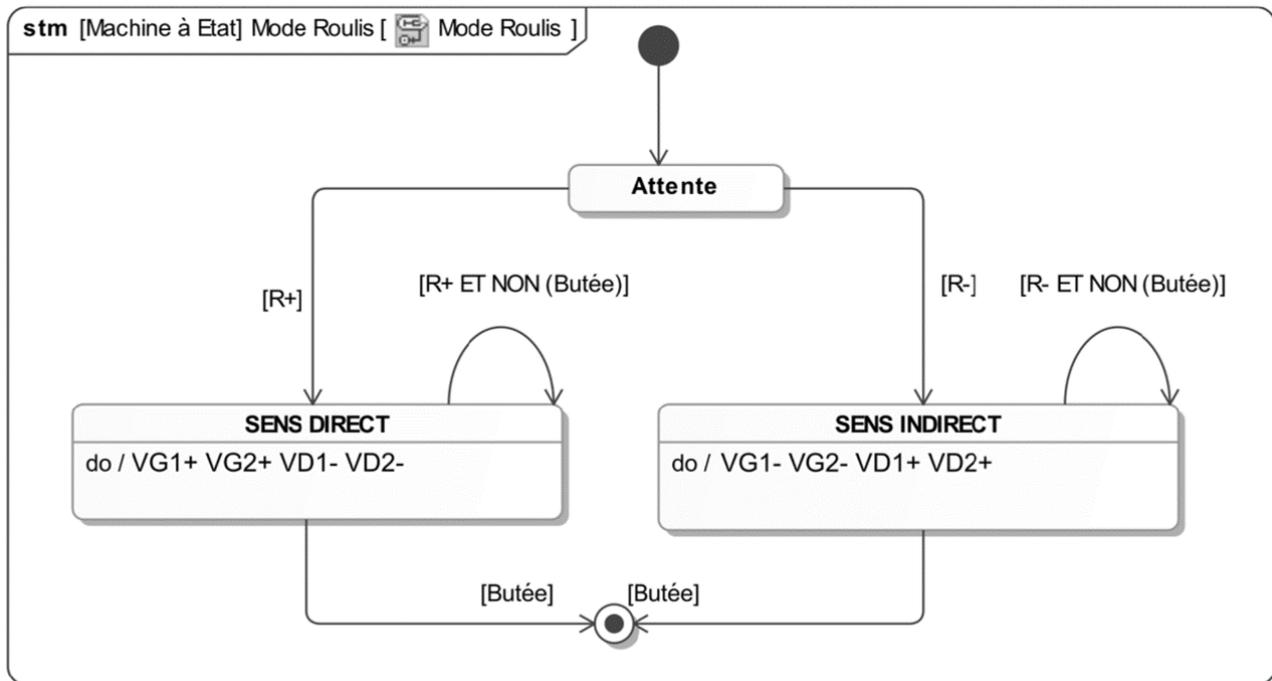


FIGURE 9 – Diagramme d'état du Mode roulis

2. Freinage d'un avion



Le freinage est une des fonctions vitales d'un avion, au même titre que la propulsion ou la sustentation. C'est grâce à lui que l'avion peut s'immobiliser après l'atterrissage, circuler au sol en toute sécurité mais également s'arrêter en cas d'urgence lors d'une interruption de décollage alors que l'avion est à pleine charge de carburant et lancé à la vitesse de décollage (même si le risque est de l'ordre de 1 pour 1 million de décollages). Outre les freins, le pilote peut aussi actionner les inverseurs de poussée des moteurs et les aérofreins.

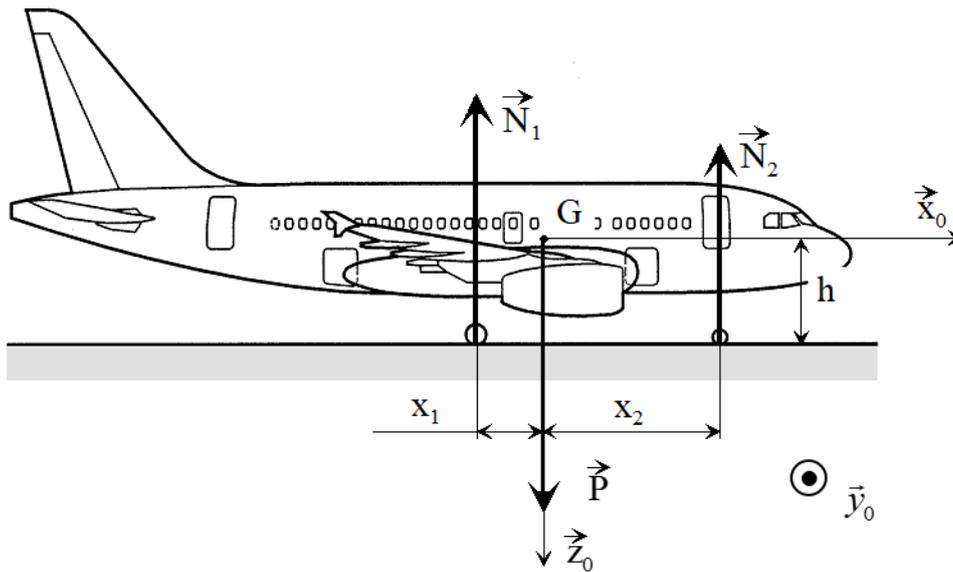
La fonction globale de freinage doit répondre à des exigences économiques et opérationnelles extrêmement élevées :

- Les exigences économiques sont essentiellement relatives à la maintenance des équipements et au renouvellement des parties consommables (les freins et les pneumatiques), dont la périodicité dépend directement de l'endurance de ceux-ci. La notion de coût à l'atterrissage (CPL ou *Cost Per Landing*) est un paramètre essentiel pour les compagnies.
- Les exigences opérationnelles se déclinent essentiellement en trois qualités techniques : sécurité, efficacité et confort de freinage.

On retiendra le cas de l'Airbus A318, avion commercial de 120 places et de rayon d'action de 3240km. La masse maximale au décollage est de $60.10^3 kg$ et la vitesse de décollage est estimée à 240km/h. Pour les atterrisseurs, on distingue :

- le train avant qui, en dehors de l'appui, est orientable ce qui lui permet d'agir sur les trajectoires au sol mais qui n'est pas équipé de freins ;
- les deux trains principaux au niveau des ailes, chacun portant deux roues freinées indépendamment.

On considère l'avion à l'arrêt sur la piste. On note G son centre de gravité, $(G, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ un repère supposé galiléen où \vec{z}_0 est la verticale descendante. On suppose égales les actions de contact \vec{N}_1 au niveau de chacune **des quatre roues** des trains principaux et on note \vec{N}_2 l'action de contact au niveau **du train avant**.



On donne :

- masse de l'avion : $M = 60.10^3 kg$ et $g = 10 m.s^{-2}$
- $x_1 = 2m, x_2 = 8m, h = 4m$
- diamètre des roues du train principal $D = 1m$
- coefficient d'adhérence pneu-piste $f_0 = 1,5$

Les composantes des efforts seront exprimées en projection sur $\vec{n} = -\vec{z}_0$.

Question 3: Réaliser le graphe de structure de l'avion.

Question 4: Donner la forme des torseurs des actions mécaniques du sol sur le tain principal et sur le train avant (avion à l'arrêt).

Question 5: Isoler l'ensemble {avion + roues} et faire un bilan des actions mécaniques extérieures.

Question 6: Appliquez le principe fondamental de la statique afin de déterminer les expressions de N_1 et N_2 en fonction de x_1, x_2, M et g .

Question 7: Calculer les valeurs numériques de N_1 et N_2 .

Question 8: Représenter une roue et les actions \vec{N}_1 et \vec{T}_1 à la limite du glissement lors d'un freinage, où \vec{T}_1 est l'action tangentielle.

Question 9: Les freins de parking bloquant les roues du train principal, déterminer la valeur limite de la composante tangentielle au niveau de chaque roue conduisant au glissement des pneus sur la piste.

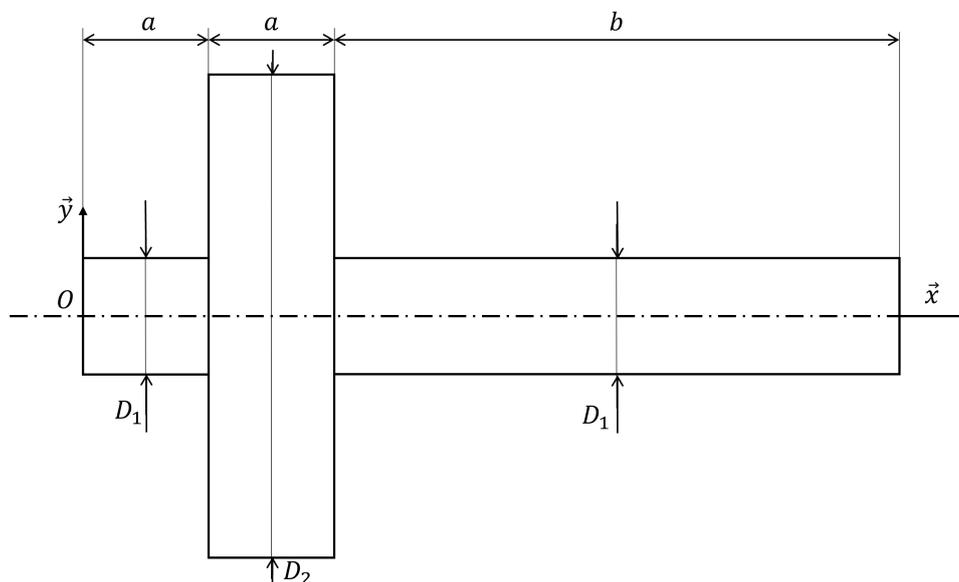
Question 10: En isolant une roue du train principal, donner l'expression et la valeur du *couple minimal de freinage* $C_{f_{mini}}$ que doivent exercer les freins de parking au niveau de chaque roue.

On considère maintenant le scénario suivant : l'avion roule sur la piste à pleine vitesse, soit $V_0 = 240\text{km/h}$, et seuls les freins sont actionnés pour un arrêt d'urgence. On suppose que le *couple de freinage* C_f exercé sur chacune des roues du train principal est constant et n'entraîne pas le glissement des roues sur la piste.

Question 11: Calculer l'énergie cinétique E_c à dissiper.

3. Solide soumis à l'action de la pesanteur

On considère un arbre **cylindrique** homogène S et de masse volumique ρ . Sa géométrie est présentée ci-dessous.



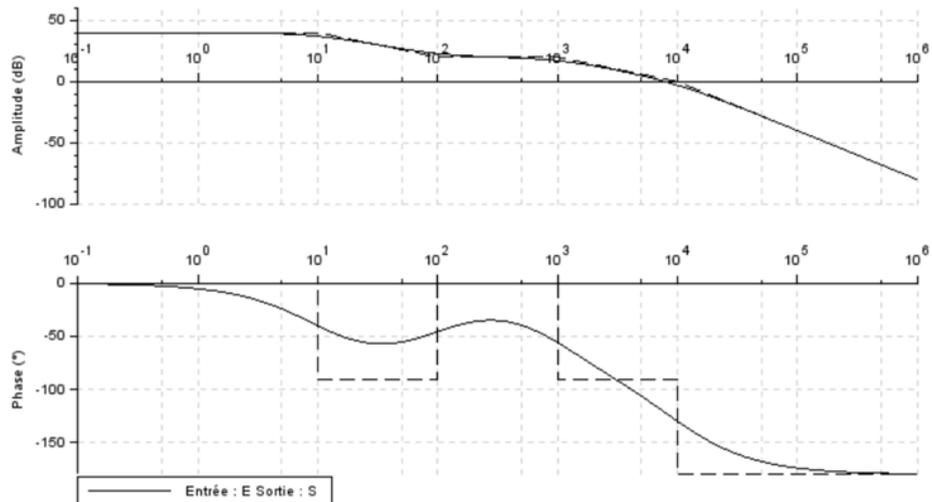
Question 12: Déterminer l'expression du poids \vec{P} du solide S .

Question 13: Déterminer la position du centre de gravité du solide S .

Question 14: Exprimer en O le moment de l'action de la pesanteur sur le solide S .

4. Identification dans le plan de Bode

Question 15: Identifier la fonction de transfert $H(p)$ représentée par le diagramme de Bode suivant :



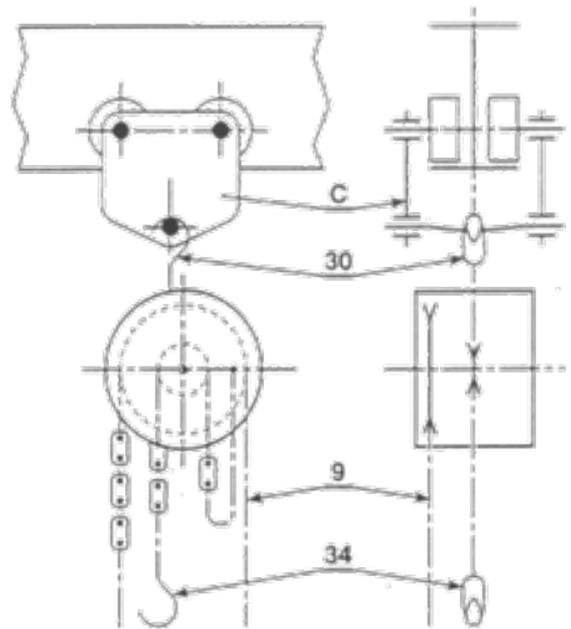
5. PalanAmain

5.1 Présentation du système

La figure ci-contre donne le schéma de situation d'un PalanAmain à commande manuelle. Celui-ci est suspendu par le crochet 30 à un chariot mono-rail C. La charge à soulever et à déplacer est suspendue au crochet 34.

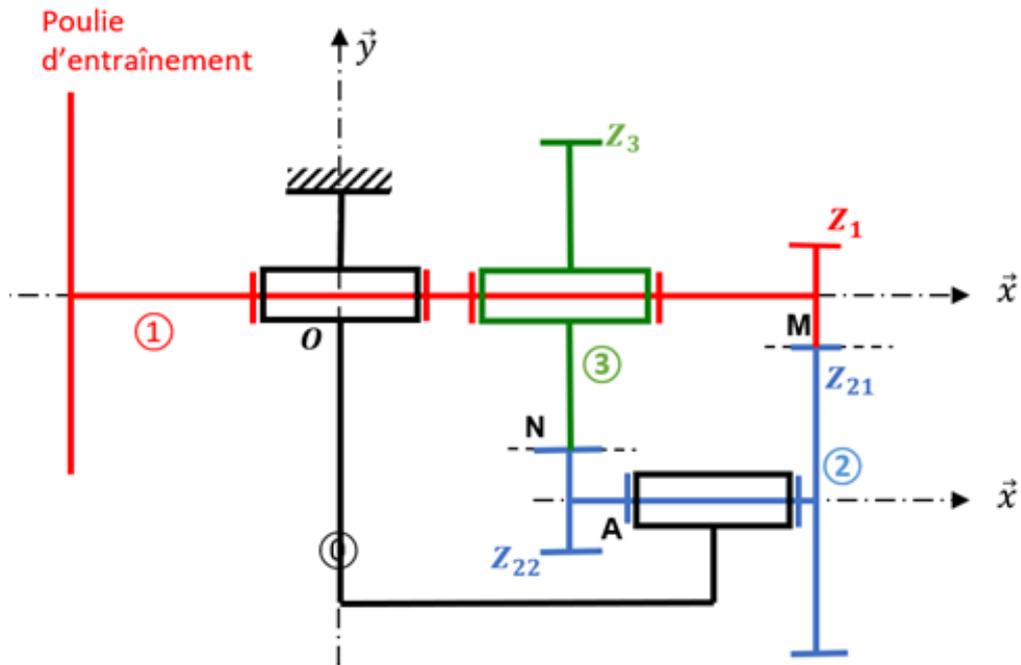
Les fonctions principales à assurer par ce mécanisme sont les suivantes :

- Provoquer la montée de la charge, par un effort de traction sur l'un des brins de la chaîne de commande 9.
- S'opposer automatiquement à la descente de la charge, lorsqu'on cesse d'exercer cet effort sur la chaîne 9.
- Commander la descente de la charge par un effort de traction sur l'autre brin de la chaîne 9 et régulariser la descente.



5.2 Modélisation

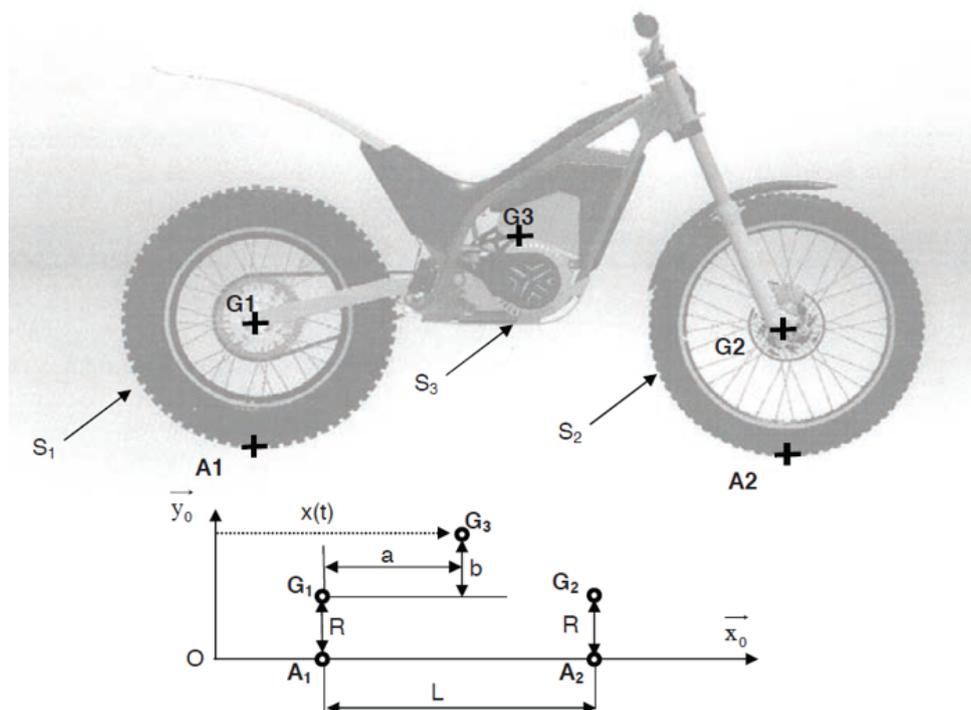
On adopte pour le palan le modèle cinématique suivant :



5.3 Étude

Question 16: Déterminer le rapport de réduction du palan $r = \frac{\omega_{3/0}}{\omega_{1/0}}$ en fonction des nombres de dents Z_1, Z_{21}, Z_{22} et Z_3 .

6. Contact ponctuel pour une moto



La moto est modélisée par trois solides : la roue arrière S_1 , la roue avant S_2 et l'ensemble {cadre-moteur-pilote} S_3 . Les roues sont en liaison pivots parfaites avec le avec le cadre. On suppose le problème plan $(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0)$ dans le repère $R_0 = (O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ où \vec{x}_0 est l'horizontale.

Données :

- Roue arrière S_1 : masse m_1 , de rayon R et de centre de masse G_1 ;
- Roue avant S_2 : masse m_2 , de rayon R et de centre de masse G_2 ;
- Ensemble S_3 : masse m_3 et centre de masse G_3 .

La position de la moto est repérée par le paramètre $x(t)$, abscisse de G_3 .

L'angle de rotation de la roue i par rapport au repère R_3 , lié à S_3 , est noté θ_i .

On suppose que les deux roues sont en contact avec le sol et que ce contact, aux points A_1 et A_2 se fait sans glissement.

La moto est en mouvement de translation rectiligne.

Question 17: Déterminer l'expression de la vitesse $\vec{V}_{A_1 \in S_1 / S_3}$.

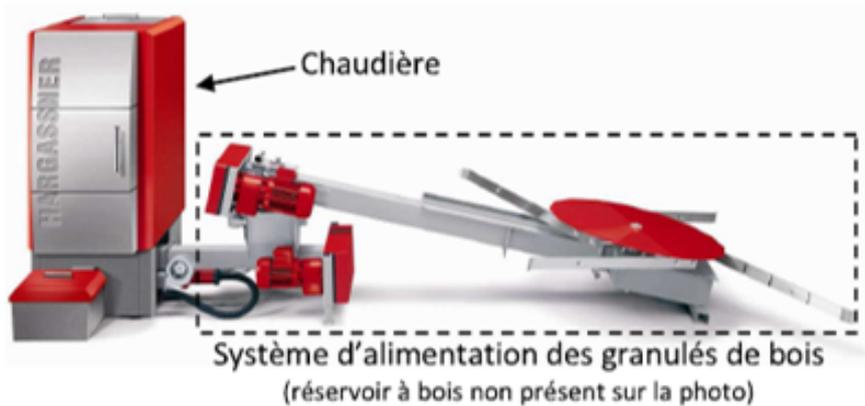
Question 18: Déterminer l'expression de la vitesse $\vec{V}_{A_1 \in S_3 / R_0}$ en fonction de $\dot{x}(t)$.

Question 19: En exprimant le roulement sans glissement au point A_1 , en déduire une relation entre $\dot{x}(t)$ et $\dot{\theta}_1(t)$ puis entre $\ddot{x}(t)$ et $\ddot{\theta}_1(t)$.

Question 20: Déterminer les expressions des accélérations $\vec{\Gamma}_{G_1 \in S_1 / R_0}$, $\vec{\Gamma}_{G_2 \in S_2 / R_0}$ et $\vec{\Gamma}_{G_3 \in S_3 / R_0}$.

7. Chaudière à granulés

On s'intéresse au corps de chauffe situé dans une chaudière à granulés de bois dont on donne une description structurale ainsi qu'un extrait partiel de cahier des charges.

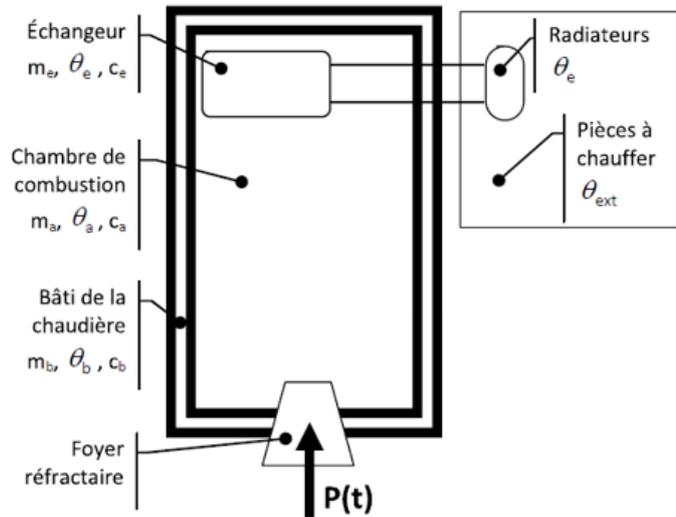


Exigences	Critères	Niveaux
1.1 Le système doit permettre le chauffage de bâtiments à partir de la combustion de granulés de bois	Température à atteindre dans la pièce à puissance nominale.	$25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ pour une puissance calorifique de $P_0 = 10\text{kW}$.

7.1 Modélisation en SLCI du corps de chauffe de la chaudière

Pour ce modèle on considère que :

- $P(t)$ est la puissance calorifique en Watt fournie par le bois brûlé au niveau du foyer réfractaire. Elle permet la montée en température du bâti de la chaudière.
- L'air situé dans la chambre de combustion permet de monter à la température $\theta_e(t)$ l'eau située dans l'échangeur.
- L'eau chaude, au travers des radiateurs permet de chauffer les pièces à une température $\theta_{ext}(t)$.
- Le corps de chauffe est parfaitement isolé de l'extérieur.



On note :

Notation	Grandeur	Valeur
$\theta_b(t)$	la température du bâti de la chaudière	
m_b	la masse du bâti à monter en température	$m_b = 200\text{kg}$
c_b	la capacité calorifique massique du bâti	$c_b = 500\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
$\theta_a(t)$	la température de l'air dans la chambre de combustion	
m_a	la masse de l'air à monter en température	$m_a = 2\text{kg}$
c_a	la capacité calorifique massique de l'air	$c_a = 700\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
$\theta_e(t)$	la température de l'eau dans l'échangeur et les radiateurs	
m_e	la masse de l'eau à monter en température dans l'échangeur	$m_e = 50\text{kg}$
$\theta_{ext}(t)$	la température ambiante des pièces à chauffer	
c_e	la capacité calorifique massique de l'eau	$c_e = 4000\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

On donne ci-dessous les équations issues du modèle de connaissance de la chaudière :

$$m_b c_b \frac{d\theta_b(t)}{dt} + K_{ab} [\theta_b(t) - \theta_a(t)] = P(t) \quad (1)$$

$$m_a c_a \frac{d\theta_a(t)}{dt} + K_{ae} [\theta_a(t) - \theta_e(t)] = K_{ab} [\theta_b(t) - \theta_a(t)] \quad (2)$$

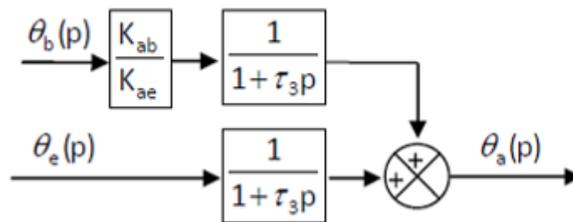
$$m_e c_e \frac{d\theta_e(t)}{dt} + K_{ae} [\theta_e(t) - \theta_{ext}(t)] = K_{ae} [\theta_a(t) - \theta_e(t)] \quad (3)$$

Avec :

- K_{ab} la conductance thermique entre le bâti et l'air dans la chambre de combustion tel que $K_{ab} = 40\text{J.s}^{-1}.\text{K}^{-1}$;
- K_{ae} la conductance thermique entre l'air et l'eau au travers de l'échangeur ou des radiateurs tel que $K_{ae} = 400\text{J.s}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

- Question 21:** En supposant des conditions initiales nulles (conditions de Heaviside), donner dans le domaine de Laplace la transformée des équations du modèle de connaissance présenté.
- Question 22:** Exprimer $\theta_b(p)$ en fonction de $\theta_a(p)$ et de $P(p)$ et des variables m_b , c_b et K_{ab} . Mettre sous la forme $\theta_b(p) = H_1(p)\theta_a(p) + H_2(p)P(p)$.
- Question 23:** Préciser l'ordre des fonctions de transfert $H_1(p)$ et $H_2(p)$. Définir les expressions littérales de la constante de temps de ce système τ_1 et des gains K_1 et K_2 , respectivement de $H_1(p)$ et $H_2(p)$. Calculer la valeur numérique approchée de τ_1 .
- Question 24:** Compléter le schéma bloc du document réponse 4 en n'utilisant que les variables K_{ab} et τ_1 .
- Question 25:** Exprimer $\theta_a(p)$ en fonction de $\theta_e(p)$ et de $\theta_b(p)$ et des variables m_a , c_a , K_{ae} et K_{ab} . Mettre sous la forme $\theta_a(p) = H_3(p)\theta_e(p) + H_4(p)\theta_b(p)$.
- Question 26:** Préciser l'ordre des fonctions de transfert $H_3(p)$ et $H_4(p)$. Définir les expressions littérales de la constante de temps de ce système τ_3 et des gains K_3 et K_4 , respectivement de $H_3(p)$ et $H_4(p)$. Calculer la valeur numérique approchée de τ_3 , constante de temps de ces systèmes.

Dans la suite de l'étude, on suppose que K_{ae} est très grand devant K_{ab} , ainsi le schéma bloc ayant pour entrées $\theta_b(p)$ et $\theta_e(p)$ et pour sortie $\theta_a(p)$ peut se mettre sous la forme suivante :

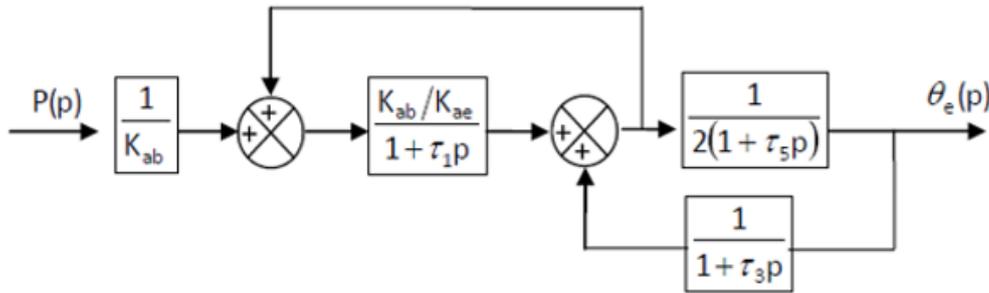


- Question 27:** Exprimer $\theta_e(p)$ en fonction de $\theta_a(p)$ et de $\theta_{ext}(p)$. Préciser l'ordre de cette fonction ainsi que les expressions littérales de ses caractéristiques K_5 et τ_5 . Calculer la valeur numérique approchée de τ_5 .
- Question 28:** Réaliser un schéma bloc (un comparateur et un bloc) ayant pour entrée $\theta_a(p)$, pour sortie $\theta_e(p)$ et pour perturbation $\theta_{ext}(p)$, pour cela utiliser uniquement K_5 et τ_5 .
- Question 29:** Compléter le schéma bloc du système global sur le document réponse 5. Celui-ci a pour entrée $P(p)$, pour sortie $\theta_e(p)$ et pour perturbation $\theta_{ext}(p)$. Dans les blocs, on ne fera apparaître que les paramètres suivants : K_{ab} , K_{ae} , τ_1 , τ_3 et τ_5 . Ne pas oublier de placer les liens $\theta_a(p)$ et $\theta_b(p)$.

7.2 Étude des performances du corps de chauffe de la chaudière

On s'intéresse dans cette partie aux performances du système de corps de chauffe à partir du modèle SLCI construit précédemment. Pour cette étude on considérera que $\theta_{ext}(p) = 0$, de plus comme la constante de temps τ_1 est grande devant τ_3 , le schéma bloc du système peut alors se simplifier par la forme suivante :

- Question 30:** Déterminer la fonction de transfert $H(p) = \frac{\theta_e(p)}{P(p)}$.



Après applications numériques dans lesquelles on considère que $K_{ab} \ll K_{ae}$, $\tau_3 \ll \tau_5$ et $\tau_3 \ll \tau_1$, on obtient la fonction de transfert simplifiée

$$H_{simplifiée} = \frac{\theta_e(p)}{P(p)} = \frac{1}{400(1 + 2500p)(1 + 500p)}$$

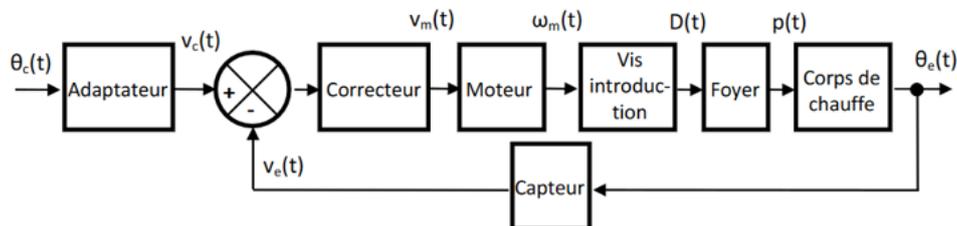
Question 31: Déterminer à l'aide du modèle simplifié les valeurs initiales et finales prévisibles pour les températures de l'eau $\theta_e(t)$ pour une entrée en échelon correspondant à la puissance de chauffe définie dans le cahier des charges. Préciser les noms de théorèmes utilisés.

Question 32: Représenter l'allure de la réponse $\theta_e(t)$ à une entrée échelon de puissance de 10kW sur le document réponse 6. Faire figurer tous les éléments remarquables de la réponse.

Question 33: Conclure par rapport au cahier des charges.

7.3 Étude de l'asservissement du corps de chauffe de la chaudière

On s'intéresse à l'asservissement en température du corps de chauffe dont on donne la modélisation en schéma-bloc fonctionnel. Une température de consigne $\theta_c(t)$ est donnée au système. Un adaptateur convertit celle-ci en une image en tension $V_c(t)$ telle que $V_c(p) : K_c \cdot \theta_c(p)$. Cette tension $V_c(t)$ est comparée à la tension $V_e(t)$ fournie par le capteur de gain $K_e = 0,2V/^\circ C$ mesurant la température de l'eau $\theta_e(t)$ au sein de l'échangeur. Cette différence de tension est amplifiée par un correcteur proportionnel $C(p) = K_{cor}$ qui alimente en tension $V_m(t)$ le moteur de la vis d'introduction. Le moteur entraîne la vis d'introduction, à la vitesse $\omega_m(t)$, qui fournit un débit massique de bois $D(t)$. Ce bois au sein du foyer dégage une puissance de chauffe $p(t)$. Une étude expérimentale



sur l'ensemble **moteur, vis d'introduction, foyer et corps de chauffe** a permis de déterminer par identification temporelle la fonction de transfert de cet ensemble. Cette fonction de transfert a pour expression :

$$H_{MC}(p) = \frac{\theta_e(p)}{V_M(p)} = \frac{K_{MC}}{(1 + \tau_A p)(1 + \tau_B p)}$$

Question 34: Tracer sur le document réponse 7 le diagramme de Bode asymptotique de la fonction de transfert $H_{MC}(p)$ avec $K_{MC} = 0,3^\circ C/V$, $\tau_A = 7000s$ et $\tau_B = 20000s$.

Question 35: Construire le schéma bloc de l'asservissement en température du système en ne faisant intervenir qu'un seul bloc pour l'ensemble moteur, vis d'introduction, foyer et corps de chauffe puis déterminer sous forme canonique la fonction de transfert en boucle fermée du système $H_G(p) = \frac{\theta_e(p)}{\theta_c(p)}$.

Question 36: En déduire l'expression littérale en régime permanent de $\theta_e(t)$ quand l'ensemble est soumis à une consigne d'entrée de type échelon d'amplitude θ_{C0} .

Question 37: Déterminer l'expression littérale de l'écart statique $\theta_e(t) - \theta_{C0}$ en régime permanent, puis en déduire l'expression littérale de K_c permettant d'obtenir un écart statique nul.

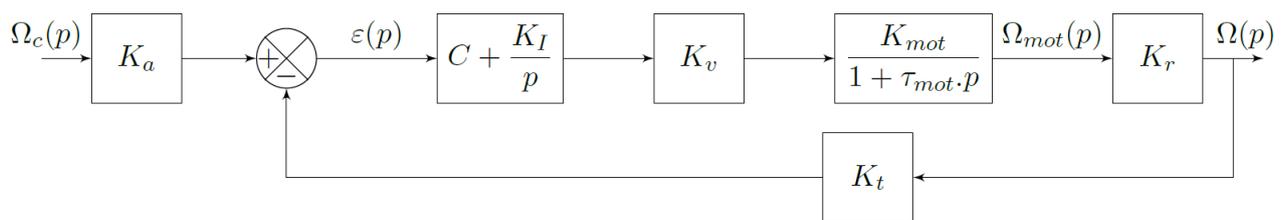
8. Gain d'adaptation

Source Lycée Châtelet.

Le schéma-blocs ci-dessous représente l'asservissement en vitesse d'un bras de robot.

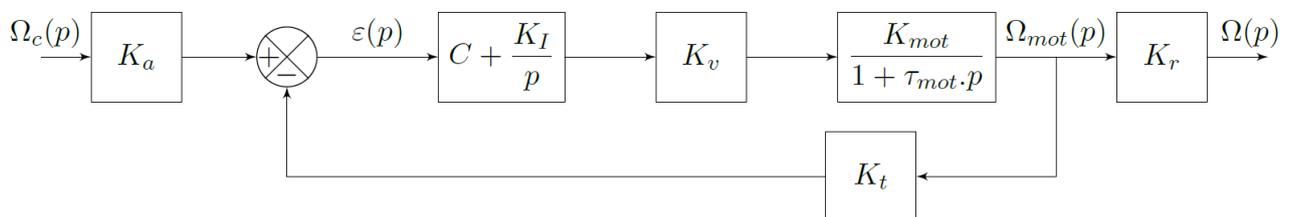
La consigne de vitesse angulaire est notée $\omega_c(t)$ (en $rad.s^{-1}$). Elle est adaptée à l'aide d'un adaptateur de gain K_a .

La vitesse de rotation du bras du robot est notée $\omega(t)(rad.s^{-1})$. Elle est mesurée par une génératrice tachymétrique de gain K_t qui mesure la vitesse angulaire réelle.



Question 38: Pour avoir un fonctionnement correct du système asservi, quelle valeur faut-il imposer pour K_a ?

Une nouvelle architecture est proposée sur le schéma-blocs ci-dessous. La génératrice tachymétrique mesure maintenant la vitesse de rotation du moteur $\omega_{mot}(t)(rad.s^{-1})$.



Question 39: Pour avoir un fonctionnement correct du système asservi, quelle **nouvelle valeur** faut-il imposer pour K_a ?

9. Quille pendulaire de bateau

Le comportement dynamique d'un Imoca 60 (bateau du Vendée globe) est conditionné par ses interactions avec les deux fluides avec lesquels il est en contact : l'air et l'eau. Il flotte sur l'eau grâce à la poussée d'Archimède qui agit sur la coque et il avance grâce à l'action aérodynamique de l'air sur les voiles. Ces actions aérodynamiques provoquent aussi son inclinaison autour de son axe longitudinal (axe de direction \vec{z}_N sur Figure 10), c'est le phénomène de gîte.

Pour contrebalancer ce mouvement et éviter que le voilier ne se couche sur l'eau, on utilise une quille qui joue le rôle de contrepoids. Cette quille est généralement constituée d'un voile en acier ou titane immergé dans l'eau à l'extrémité duquel se trouve un lest profilé. Son efficacité dépend de la masse du lest et de la longueur du voile de quille. Ces deux paramètres présentent cependant des limitations : le lest ne peut être trop important sous peine de solliciter dangereusement le voile de quille et la longueur de quille est limitée par le tirant d'eau maximal admissible (il faut permettre l'entrée dans les ports sans toucher le fond).

Une quille pendulaire s'oriente latéralement jusqu'à environ 45° . Cette quille est en liaison pivot d'axe (O, \vec{z}_N) avec la coque du navire et peut ainsi être orientée d'un côté ou de l'autre du navire. Une fois l'orientation désirée obtenue, tout mouvement dans la liaison pivot est supprimé par un blocage en rotation.

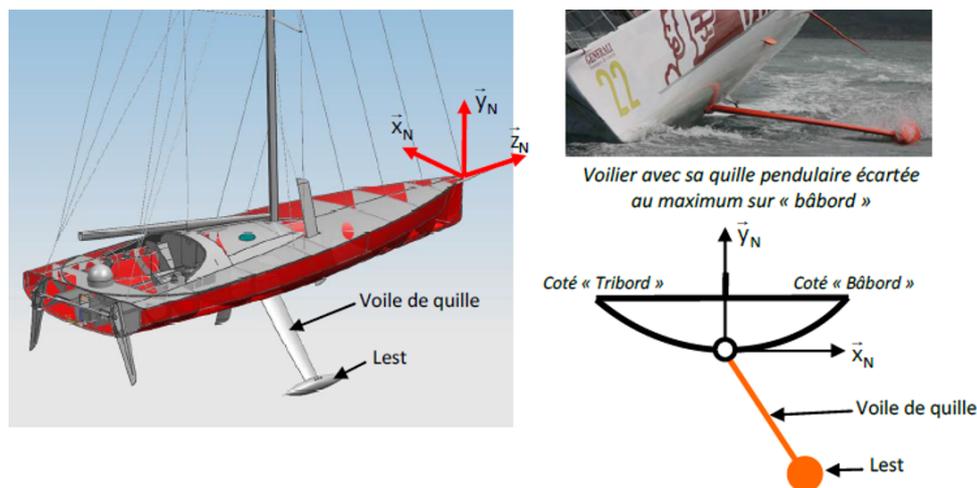


FIGURE 10 – Quille pendulaire de bateau Imoca 60

L'objectif est de valider les performances cinématiques de ce système de quille pendulaire dont on donne une description structurale ainsi qu'un extrait de cahier des charges.

Exigences	Critères	Niveaux
Angle d'inclinaison	Angle d'inclinaison maximal de la quille/coque	$\theta_{1,max} = \pm 45^\circ$
Vérins	Cours maximale des vérins	$< 1,6m$
Accélération	Accélération maximale du centre de gravité du lest	$< 5.10^{-3}m.s^{-2}$

9.1 Mise en évidence de l'intérêt d'une quille pendulaire

On considère le navire à l'arrêt et en équilibre sur un plan d'eau au repos (Figure 11 gauche). Il est soumis :

- à l'action mécanique de pesanteur modélisée ici par le poids P appliqué en G , centre de gravité du navire;
- à l'action mécanique de l'eau sur la coque modélisée par la force appelée « Poussée d'Archimède » appliquée en C , centre de carène du navire.

Une cause extérieure représentée comme l'effet du vent sur les voiles ou des vagues sur la coque, provoque la gîte du navire caractérisée par l'angle de gîte α (Figure 11 droite).

Un nouvel équilibre est alors obtenu sous l'effet des deux actions mécaniques précédentes, le poids et la poussée d'Archimède, ainsi que l'action mécanique extérieure causant le gîte.

Question 40: Le document réponse 8 donne la courbe de stabilité théorique du voilier à quille non pendulaire (quille fixe par rapport à la coque). Pour chaque point d'équilibre, repéré sur la courbe de A à F, remplir dans le tableau le numéro de la figure correspondant à la position d'équilibre correspondant.

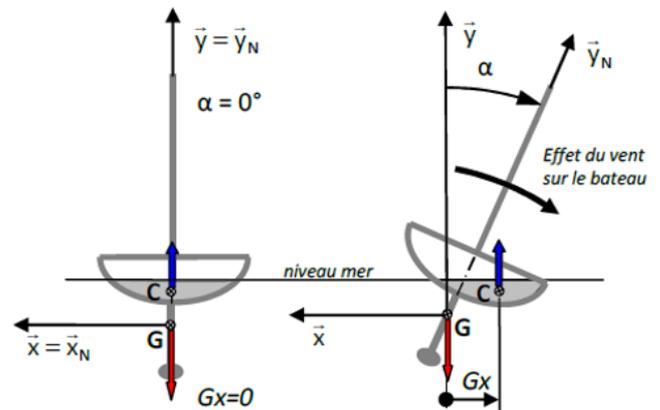


FIGURE 11 – Modélisation d'actions mécaniques sur la quille

La réglementation impose à l'architecte naval de créer des formes de coque pour lesquelles :

- L'angle de gîte provoquant la mise en situation de chavirage du voilier (changement de signe de Gx) soit au minimum de 120° , ce qui permet au navire un angle de gîte le plus grand possible sans chavirage (on remarquera qu'à 120° le navire à le mât dans l'eau).
- Le rapport des « aires » sur la courbe de stabilité théorique soit tel que $\frac{S_{01}}{S_{12}} = 5$, ce qui signifie que le travail du poids est 5 fois plus grand dans la zone de redressement que dans la zone de chavirage. Le bateau est "5 fois plus difficile" à faire chavirer qu'à redresser.

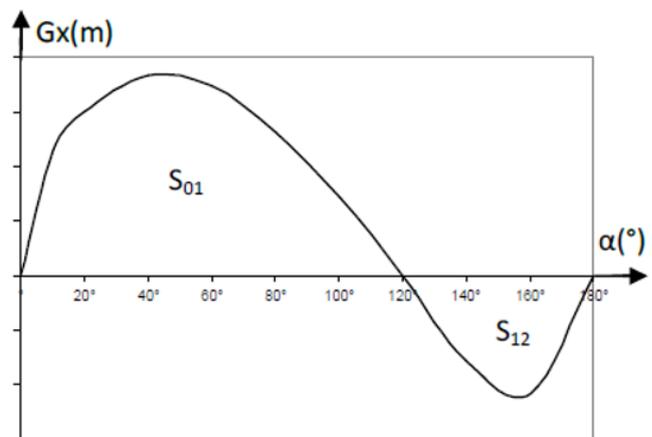


FIGURE 12 – Courbe de stabilité théorique : aires S_{01} et S_{12}

Le document réponse 9 donne les courbes de stabilité théorique d'un voilier dont la quille pendulaire est inclinée au maximum sur tribord (courbe 1) et du même voilier avec la quille non inclinée (courbe 2).

Question 41: Au vu des deux courbes du document réponse 9, déterminer les avantages principaux que procure la quille pendulaire au comportement du navire lorsqu'il gîte avec un angle α positif.

Question 42: Dans la situation de navigation où le vent vient de tribord et où la gîte ne doit pas être trop importante malgré la grande surface de voile déployée, quelle doit être la configuration de navigation à adopter? Répondre en s'aidant d'un schéma comme celui de la Figure 10 pour justifier votre choix.

9.2 Validation des performances cinématiques

Modélisation et hypothèses

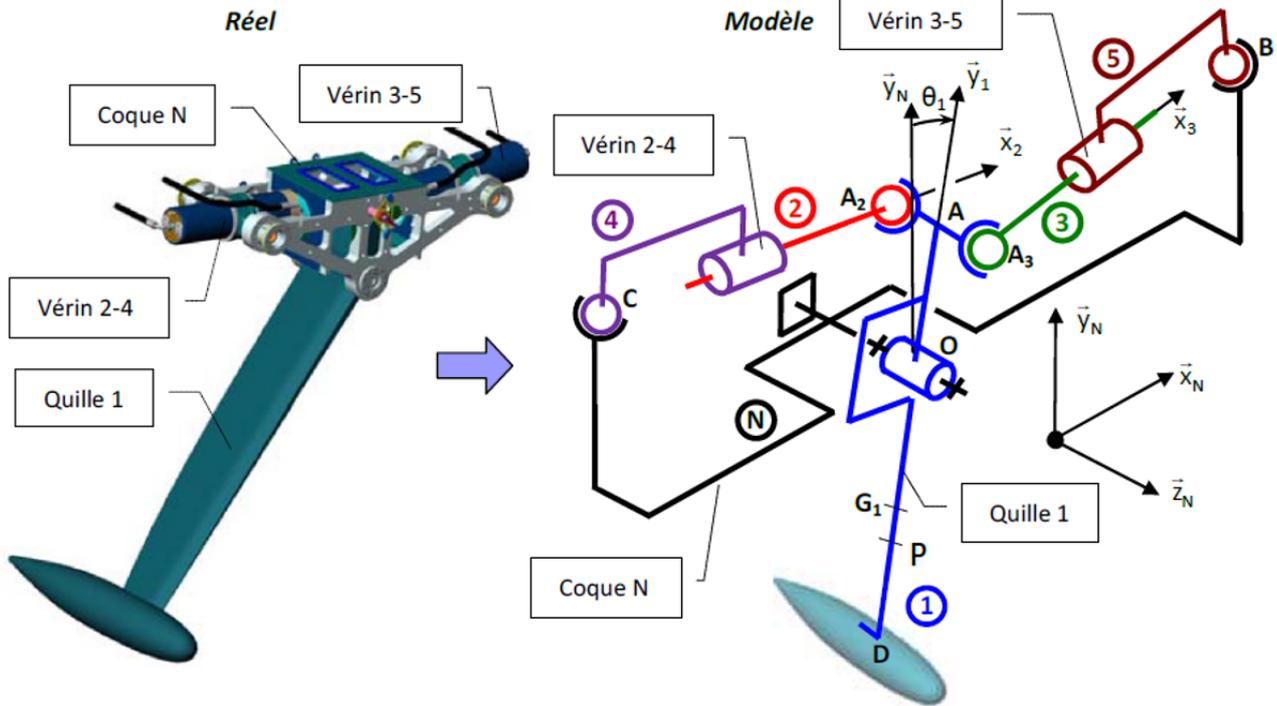


FIGURE 13 – Schéma cinématique du système de quille pendulaire

On considère sur ce modèle que la quille 1 est en liaison pivot d'axe (O, \vec{z}_N) par rapport à la coque N du bateau. Cette quille est mise en mouvement par l'intermédiaire de deux vérins notés 2-4 et 3-5. Le vérin 2—4 est constitué d'un corps de vérin 4 en liaison rotule avec la coque N au point C et d'une tige 2 en liaison rotule avec la quille 1 en A_2 . La tige 2 est en liaison pivot glissant d'axe (C, \vec{x}_2) par rapport au corps de vérin 4. Le vérin 3—5 est constitué d'un corps de vérin 5 en liaison rotule avec la coque N au point B et d'une tige 3 en liaison rotule avec la quille 1 en A_3 . La tige 3 est en liaison pivot glissant d'axe (B, \vec{x}_3) par rapport au corps de vérin 5.

On considérera que les vitesses angulaires de rotation des mouvements de 2/4 et de 3/5 sont nulles.

$R_N : (O, \vec{x}_N, \vec{y}_N, \vec{z}_N)$ repère lié à la coque du bateau considérée comme un bâti, il est supposé galiléen.

$R_1 : (O, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_N)$ repère lié à la quille tel que $\theta_1 = (\vec{x}_N, \vec{x}_1) = (\vec{y}_N, \vec{y}_1)$.

$R_2 : (C, \vec{x}_2, \vec{y}_2, \vec{z}_N)$ repère lié au vérin 2-4 tel que $\theta_1 = (\vec{x}_N, \vec{x}_2 = \vec{x}_4) = (\vec{y}_N, \vec{y}_2 = \vec{y}_4)$.

$R_3 : (C, \vec{x}_3, \vec{y}_3, \vec{z}_N)$ repère lié au vérin 3-5 tel que $\theta_3 = (\vec{x}_N, \vec{x}_3 = \vec{x}_5) = (\vec{y}_N, \vec{y}_3 = \vec{y}_5)$.

$$\begin{array}{llll} \vec{OA} = R\vec{y}_1 & \vec{AA}_2 = -d\vec{z}_N & \vec{AA}_3 = d\vec{z}_N & \vec{OC} = -a\vec{x}_N + b\vec{y}_N - d\vec{z}_N & \vec{DO} = L_{t1}\vec{y}_1 \\ \vec{OG}_1 = -L_1\vec{y}_1 & \vec{CA}_2 = x_{24}(t)\vec{x}_2 & \vec{OB} = a\vec{x}_N + b\vec{y}_N + d\vec{z}_N & \vec{A_3B} = x_{35}(t)\vec{x}_3 & \end{array}$$

Données : $L_{t1} = 4,5m$; $a = 1,5m$; $b = R = 1m$; $L_1 = 3,5m$; $d > 0$

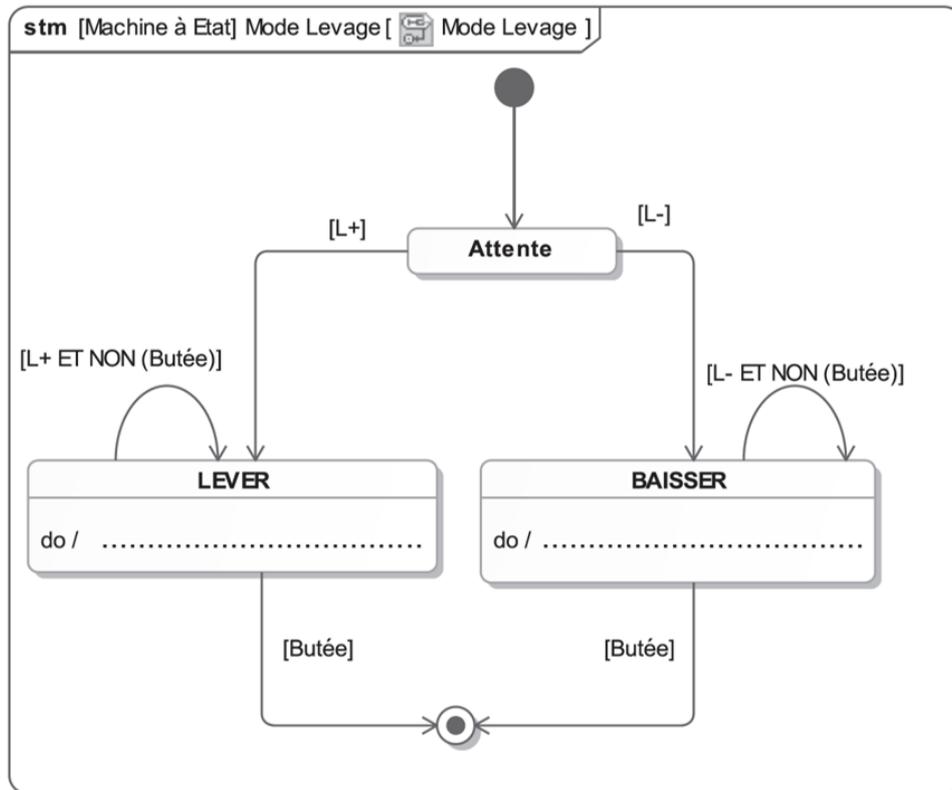
Question 43: Donner le ou les paramètre(s) géométrique(s) d'entrée qui permet(tent) de piloter le mouvement de la quille et celui de sortie.

Question 44: Réaliser le graphe de liaison correspondant à la modélisation représentée par la Figure 13.

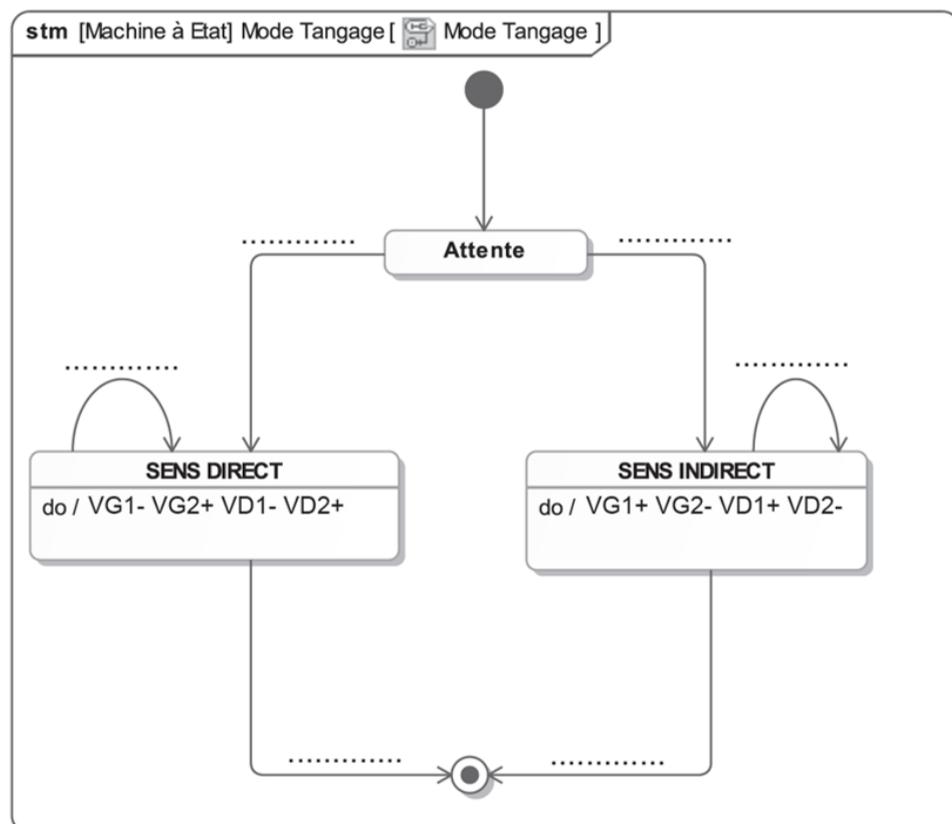
Question 45: Établir la ou les figure(s) de calcul représentant le paramétrage angulaire.

- Question 46:** Réaliser le schéma cinématique plan à l'échelle et en **couleur** de la quille sur le document réponse 10 pour la position correspondant à l'angle d'inclinaison maximal positif de la quille imposé par le cahier des charges. Doivent apparaître sur cette construction les solides N,1,2,3,4 et 5 ainsi que les points O , A , B et C .
- Question 47:** Sur la construction graphique réalisée question précédente, mesurer en mm la longueur du vérin bâbord puis en déduire la longueur réelle du vérin en position sortie.
- Question 48:** Sur la construction graphique réalisée document réponse 10, mesurer en mm la longueur du vérin tribord puis en déduire la longueur réelle du vérin en position rentrée. Puis, en exploitant la symétrie présente sur le système, déterminer la course totale des vérins permettant d'assurer l'inclinaison maximale de la quille et conclure vis à vis du cahier des charges.
- Question 49:** Écrire l'équation vectorielle correspondant à la fermeture de chaîne reliant les points O , C , A_2 et A . La projeter ensuite dans la base \mathcal{B}_N .
- Question 50:** A partir des résultats de la question précédente, déterminer la relation entre x_{24} et θ_1 . Faire l'application numérique pour la configuration inclinaison maximale ($\theta_1 = 45^\circ$) afin de vérifier un résultat précédent.
- Question 51:** A partir d'une fermeture géométrique de votre choix, déterminer la relation entre x_{35} et θ_1 . Faire l'application numérique pour la configuration inclinaison maximale ($\theta_1 = 45^\circ$) afin de vérifier un résultat précédent.
- Question 52:** Écrire les vecteurs de rotation instantanées $\overrightarrow{\Omega}_{1/N}$, $\overrightarrow{\Omega}_{2/N}$ et $\overrightarrow{\Omega}_{3/N}$.
- Question 53:** Calculer le vecteur vitesse $\overrightarrow{V}_{D \in 1/N}$.
- Question 54:** Retrouver par champ des vitesses le vecteur vitesse $\overrightarrow{V}_{D \in 1/N}$.
- Question 55:** Calculer les vecteurs vitesse $\overrightarrow{V}_{A_2 \in 2/4}$ et $\overrightarrow{V}_{A_2 \in 4/N}$ puis en déduire $\overrightarrow{V}_{A_2 \in 2/N}$. Retrouver $\overrightarrow{V}_{A_2 \in 2/N}$ par dérivation.
- Question 56:** Montrer que $\overrightarrow{V}_{A_3 \in N/1} + \overrightarrow{V}_{A_3 \in 1/3} + \overrightarrow{V}_{A_3 \in 3/5} + \overrightarrow{V}_{A_3 \in 5/N}$ correspond à la dérivée de l'équation vectorielle de la fermeture géométrique reliant les points O , B , A_3 et A .
- Question 57:** Calculer $\overrightarrow{\Gamma}_{D \in 1/N}$ puis projeter cette expression dans la base \mathcal{B}_N .
- Question 58:** Pour une vitesse angulaire constante $\dot{\theta}_1 = 0,025 \text{ rad/s}$, calculer $\|\overrightarrow{\Gamma}_{D \in 1/N}\|$. Conclure quant à l'exigence du cahier des charges.

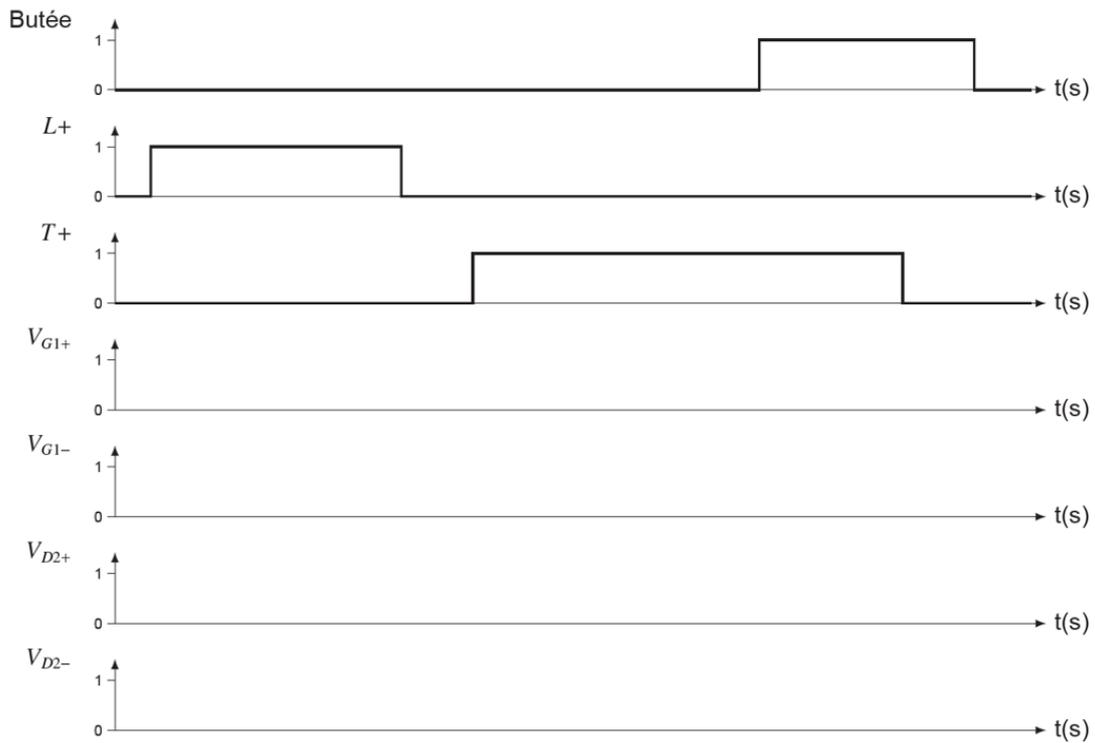
Document Réponse 1 — Chariot JacXson



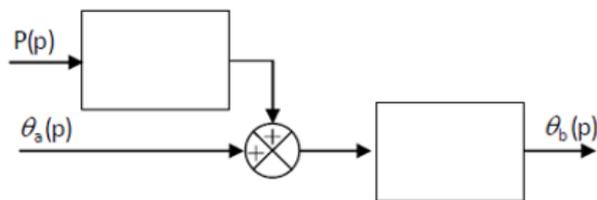
Document Réponse 2 — Chariot JacXson



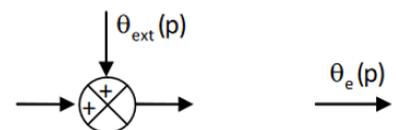
Document Réponse 3 — Chariot JacXson



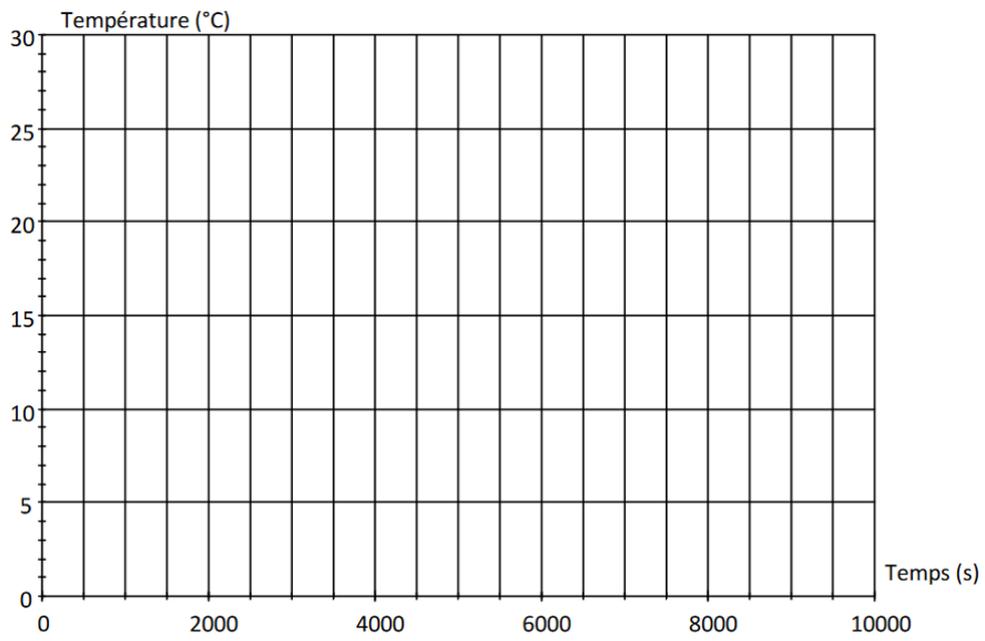
Document Réponse 4 — Chaudière à granulés



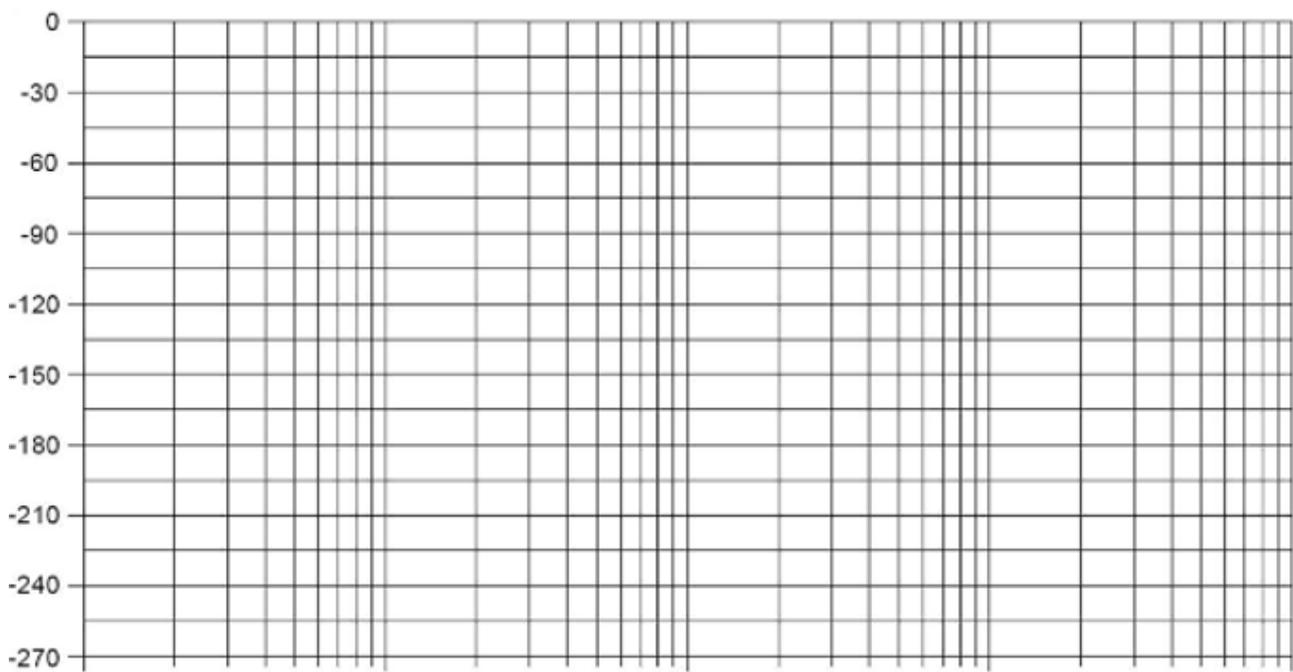
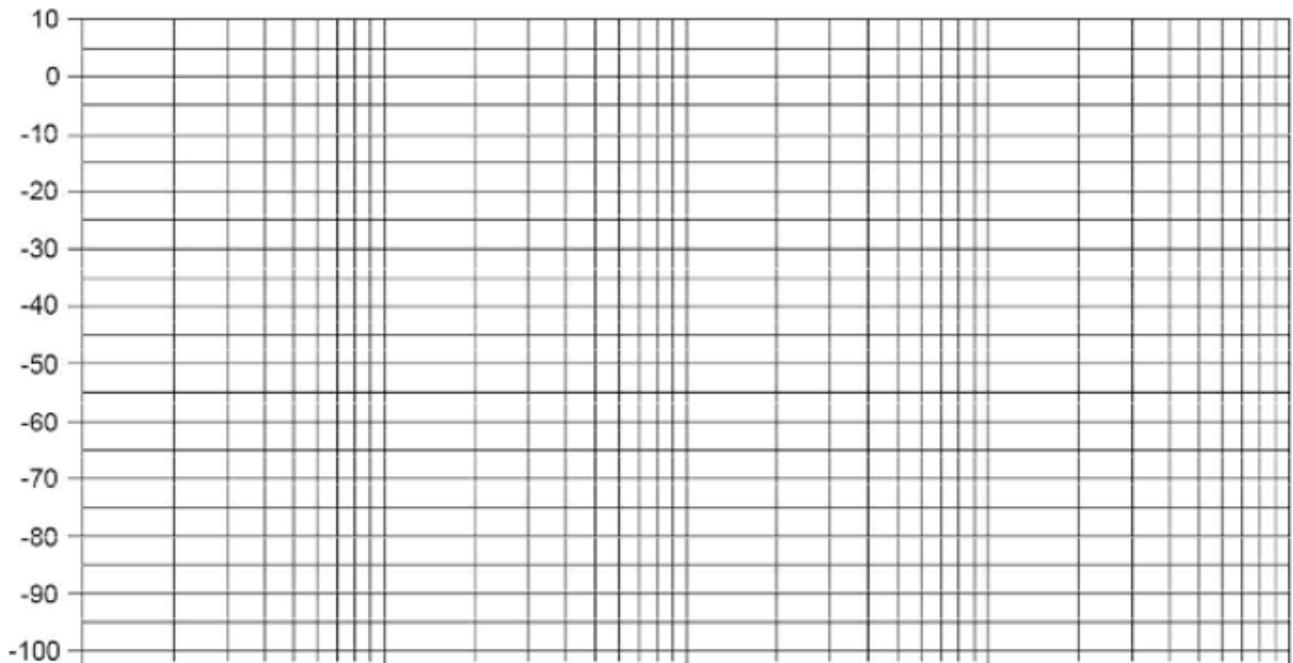
Document Réponse 5 — Chaudière



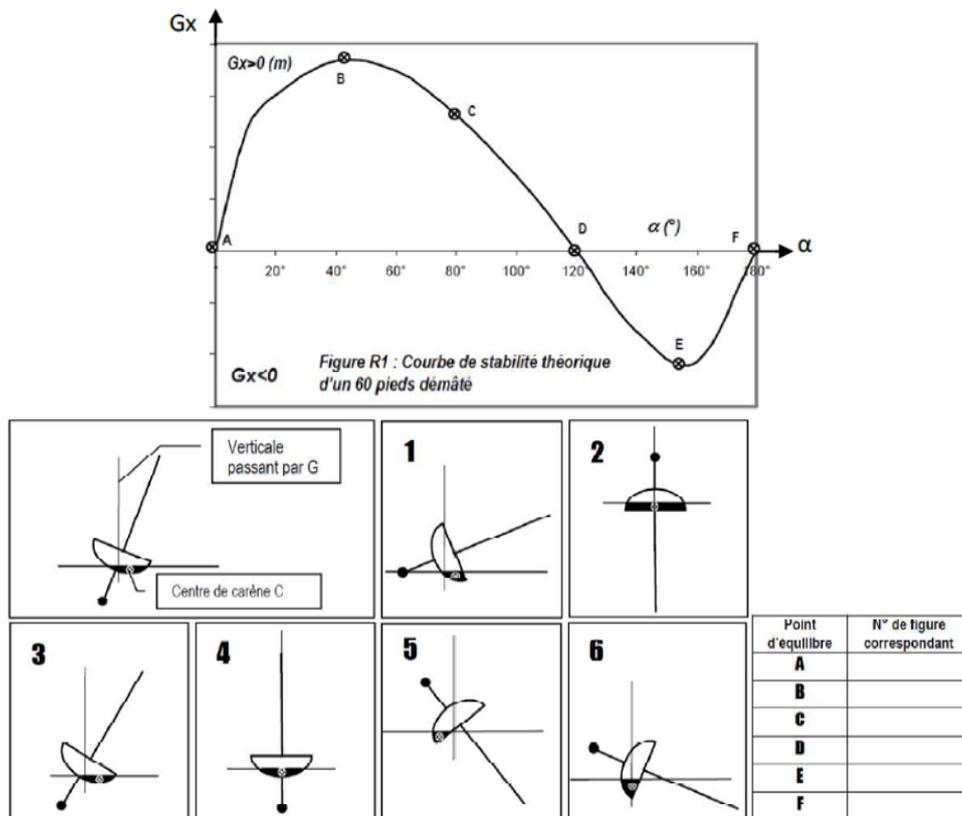
Document Réponse 6 — Chaudière



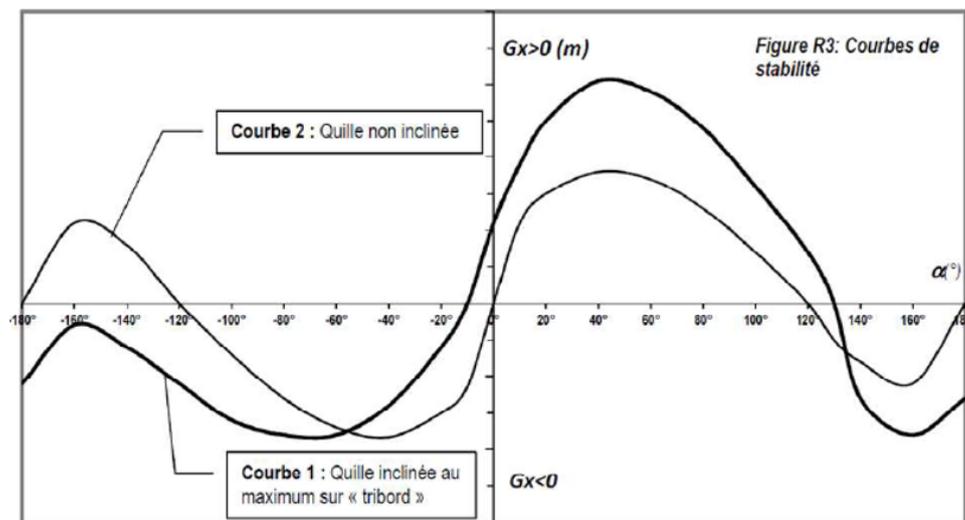
Document Réponse 7 — Chaudière



Document Réponse 8 — Quille de bateau



Document Réponse 9 — Quille de bateau



Document Réponse 10 — Quille de bateau

Échelle : 4cm \iff 1m

