

CONCOURS NATIONAL D'INGÉNIEURS DE MAURITANIE

(CNIM)



CONCOURS 2019

ÉPREUVE DE SCIENCE DE L'INGÉNIEUR

Durée de l'épreuve : 3 heures

**L'usage de l'ordinateur, de la calculatrice ou
tout autre objet connecté est interdit.**

L'énoncé de cette épreuve comporte 15 pages de texte.

Si au cours de l'épreuve, le candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre

Portique automoteur marin 75 tonnes

Présentation :

Le port de Tanit pour la pêche artisanale situé à 60 km au nord de Nouakchott, est en mesure d'assurer l'accostage de 400 pirogues de petites et moyennes tailles. Il est équipé d'un portique automoteur marin (figure 1) qui permet de soulever les pirogues en toute sécurité. Ce système fait l'objet d'étude dans ce sujet.

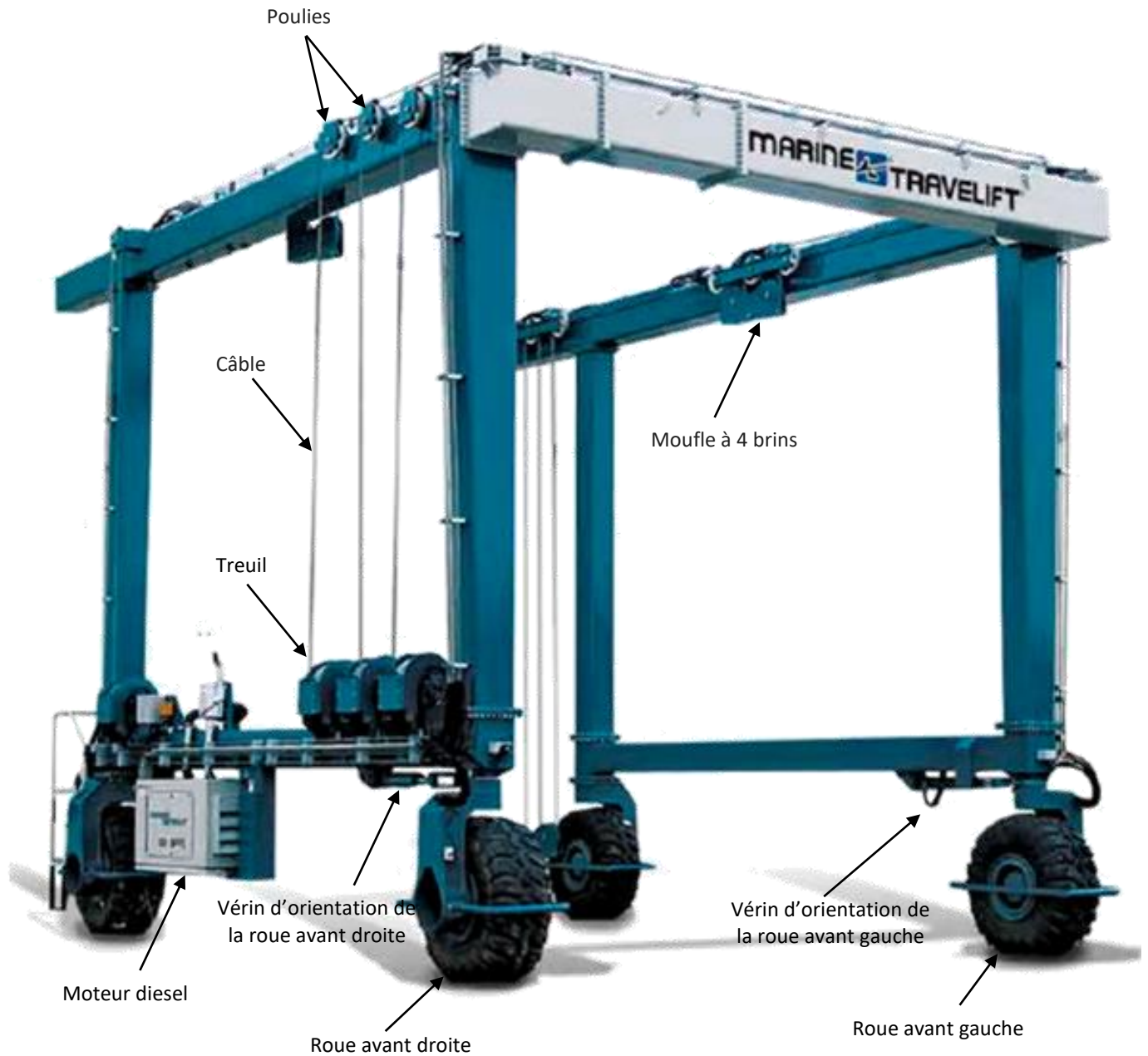


Figure 1. Portique automoteur marin : vue générale

La figure 2 correspond aux cas d'utilisation du portique automoteur marin dans son environnement.

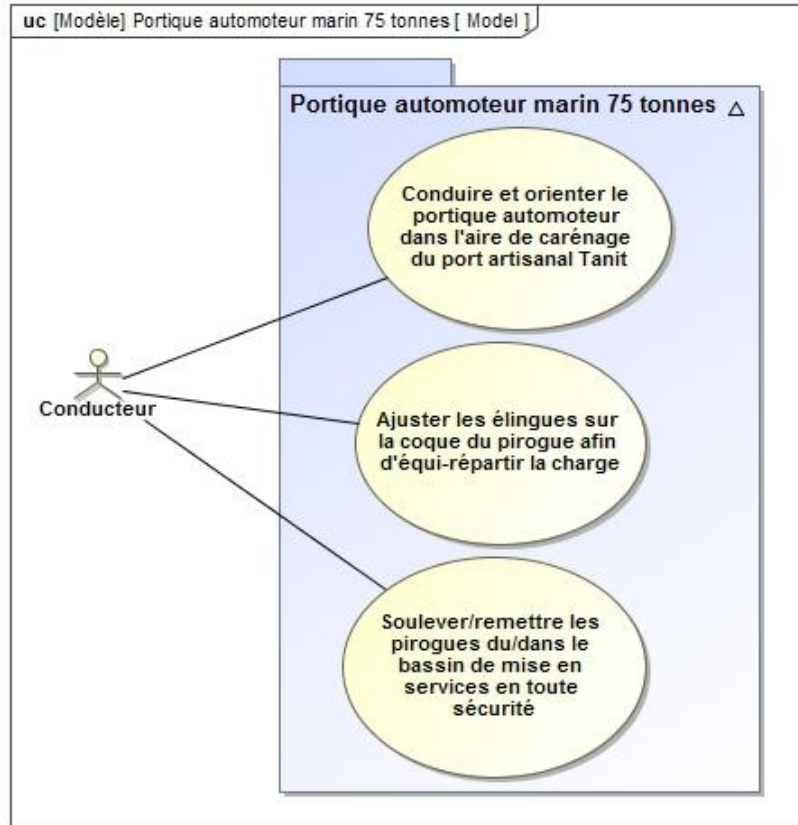


Figure 2. Diagramme partiel des cas d'utilisation du portique automoteur marin.

La figure 3 correspond aux diagrammes des exigences fonctionnelles du portique automoteur marin.

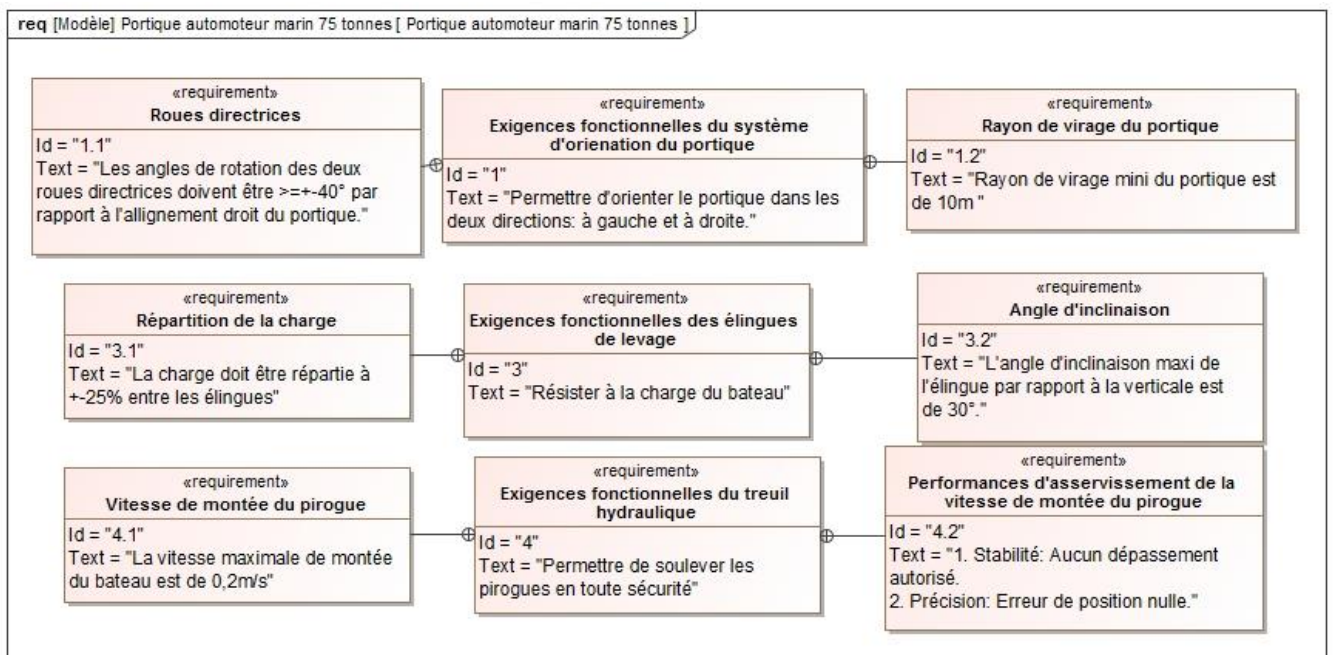


Figure 3 : Diagrammes des exigences fonctionnelles du portique automoteur marin.

Modélisation du système d'orientation des roues :

Le portique est équipé de 4 roues. Les deux premières sont directrices et orientables grâce à 2 vérins (figures 1 et 4) et un mécanisme à 4 bars (S_0, S_3, S_4 et S_5). La commande de l'orientation des deux roues est synchronisée à l'aide d'un système hydraulique donné par la figure 5.

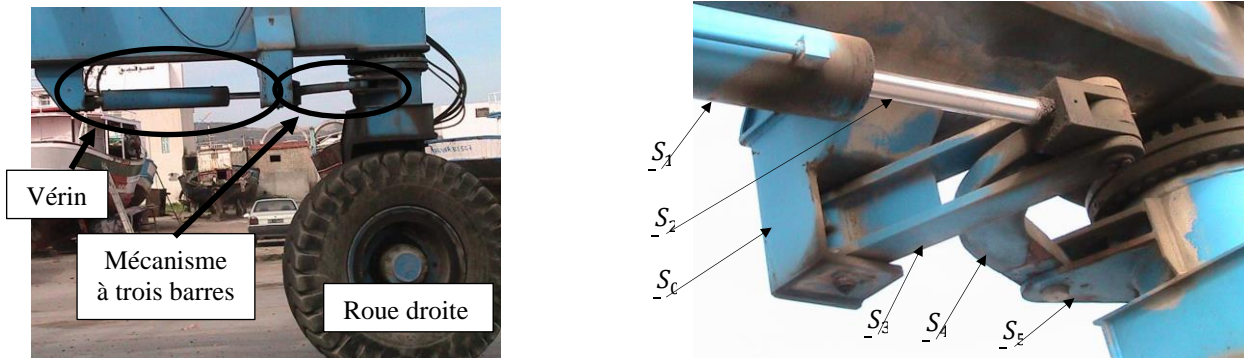


Figure 4. Système d'orientation des roues du portique

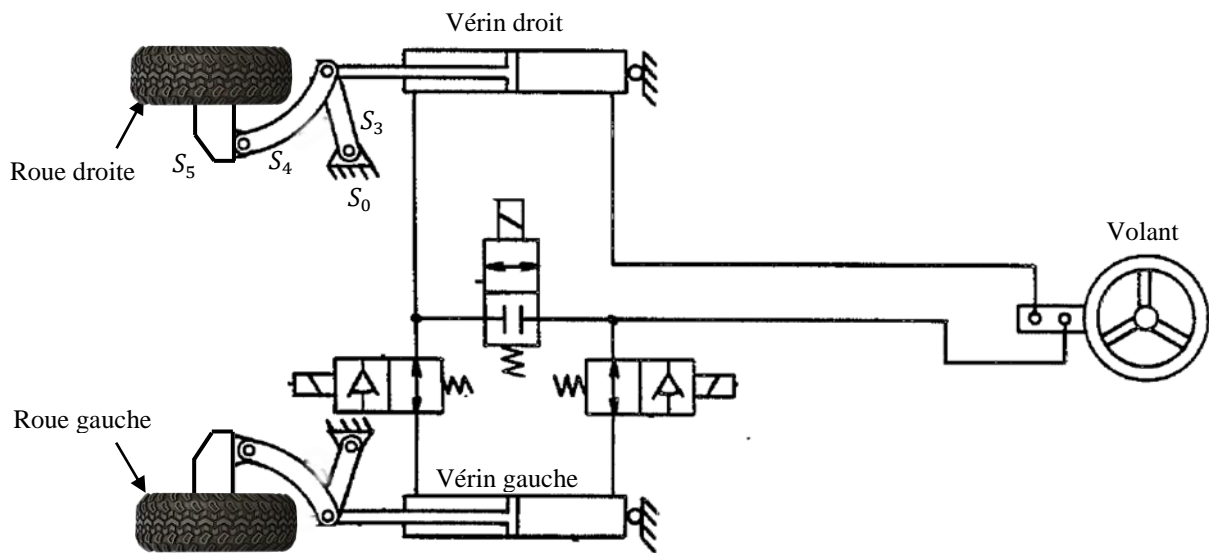


Figure 5. Synchronisation de fonctionnement des deux vérins.

La figure 6 correspond au schéma cinématique du système de direction des roues du portique. Il est composé de :

- Un bâti (S_0) lié au repère $R_0(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$;
- Un corps de vérin (S_1) lié au repère $R_1(O, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_0)$;
- Une tige de vérin (S_2) liée au repère $R_2(A, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_0)$;
- Un bras (S_3) lié au repère $R_3(B, \vec{x}_3, \vec{y}_3, \vec{z}_0)$;
- Une biellette (S_4) liée au repère $R_4(A, \vec{x}_4, \vec{y}_4, \vec{z}_0)$;
- Un bras (S_5), solidaire à la roue, est lié au repère $R_5(D, \vec{x}_5, \vec{y}_5, \vec{z}_0)$. Un angle α constant caractérise l'inclinaison du bras (S_5) par rapport à la ligne de direction de la roue.

On donne :

- $\vec{OA} = \lambda(t)\vec{x}_1$, $\vec{BA} = l_3\vec{x}_3$, $\vec{OB} = -a\vec{x}_0 + b\vec{y}_0$, $\vec{AC} = l_4\vec{x}_4$,
 $\vec{CD} = l_5\vec{x}_5$, $\vec{BD} = c\vec{x}_0 + d\vec{y}_0$
- $\theta_{roue} = \theta_5 + \alpha$, α est un angle constant à déterminer dans la suite du sujet.
- $\theta_1, \theta_3, \theta_4, \theta_5$ et θ_{roue} sont des paramètres variables en fonction du temps.

Les valeurs numériques des paramètres constants sont résumées dans le tableau suivant :

a(mm)	b(mm)	c(mm)	d(mm)	l_3 (mm)	l_4 (mm)	l_5 (mm)	α (°)
430	700	430	1000	430	600	450	?

Tableau 1 : Données numériques du système d'orientation du portique.

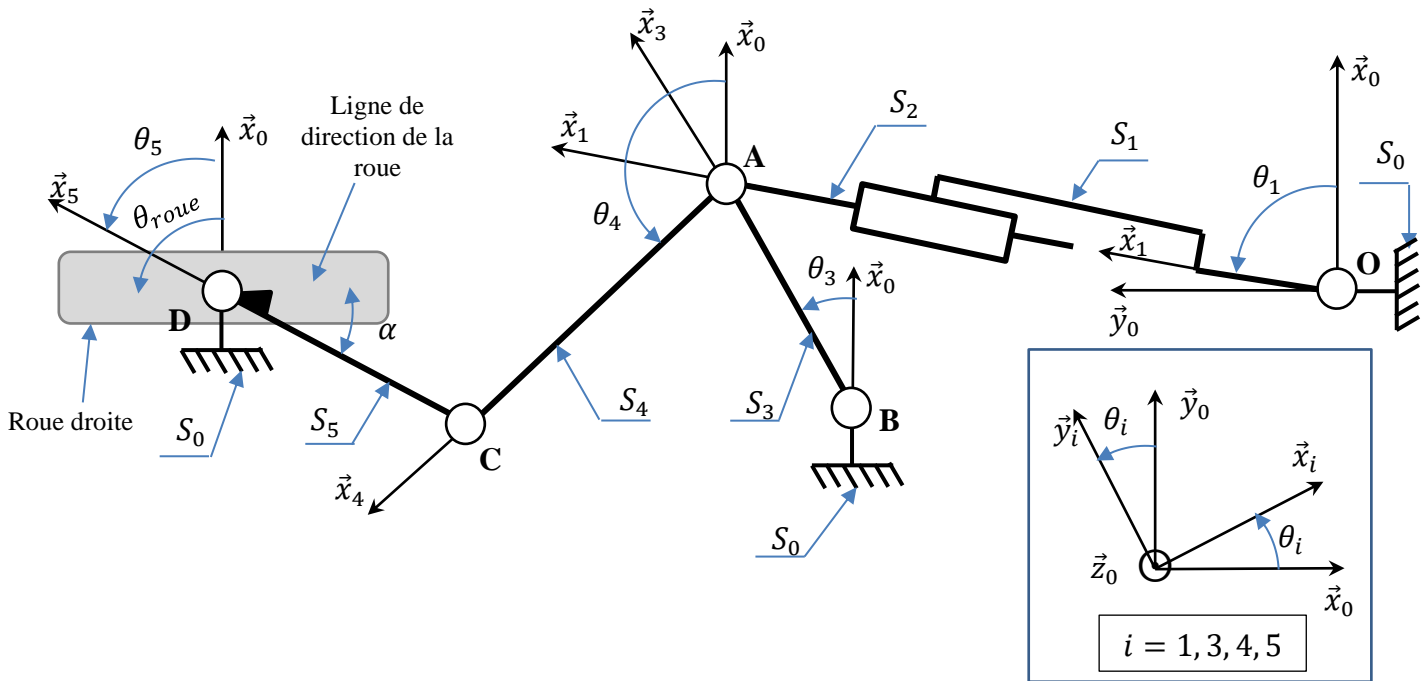


Figure 6. Schéma cinématique du système de direction des roues.

1. Compléter le graphe des liaisons donné par le document réponses.
2. Écrire, en projection dans la base du repère R_0 , les équations qui découlent de la fermeture de la chaîne des solides ($S_0 - S_1 - S_2 - S_3$).
3. Montrer que les équations, déterminées dans la question précédente, permettent d'exprimer θ_3 en fonction de $\lambda(t)$ de la manière suivante :

$$\sin(\theta_3 - \varphi) = \frac{\lambda(t)^2 - (l_3^2 + a^2 + b^2)}{2l_3\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (1)$$

Expliciter le paramètre φ en fonction de a et b.

4. Écrire, en projection dans la base du repère R_0 , les équations qui découlent de la fermeture de la chaîne des solides ($S_0 - S_3 - S_4 - S_5$).
5. Montrer que les équations, déterminées dans la question précédente, peuvent se ramener à l'équation de Freudenstein suivante :

$$\cos(\theta_5 - \theta_3) = k_1 \cos \theta_5 + k_2 \cos \theta_3 + k_3 \sin \theta_5 + k_4 \sin \theta_3 + k_5 \quad (2)$$

Expliciter, en fonction de $(c, d, l_3, l_4 \text{ et } l_5)$, les coefficients k_1, k_2, k_3, k_4 et k_5 .

Dans la suite du sujet, l'équation (2) est résolue numériquement en utilisant la méthode de Newton Raphson avec une précision $\geq 10^{-3}$. La [figure 7](#) représente l'évolution de $\theta_5(^{\circ})$ en fonction de $\lambda(\text{mm})$.

On rappelle que :

$$\theta_{roue} = \theta_5 + \alpha \quad (3)$$

- $\theta_{roue} = 90^{\circ}$ si la ligne de direction de la roue est portée par l'axe (D, \vec{y}_0) , ([figure 6](#))
- L'intervalle de fonctionnement du vérin est défini par $662\text{mm} \leq \lambda \leq 1160\text{mm}$.

6. En se basant sur la courbe de la [figure 7](#), déterminer :

- 6.1. La course totale C_t de la tige du vérin ;
- 6.2. La valeur de l'angle α permettant d'assurer un angle de rotation de la roue par rapport à l'axe (D, \vec{y}_0) de $\pm 40^{\circ}$;
- 6.3. La course maximale C_d^{max} de la tige du vérin correspondant au virage à droite du portique.

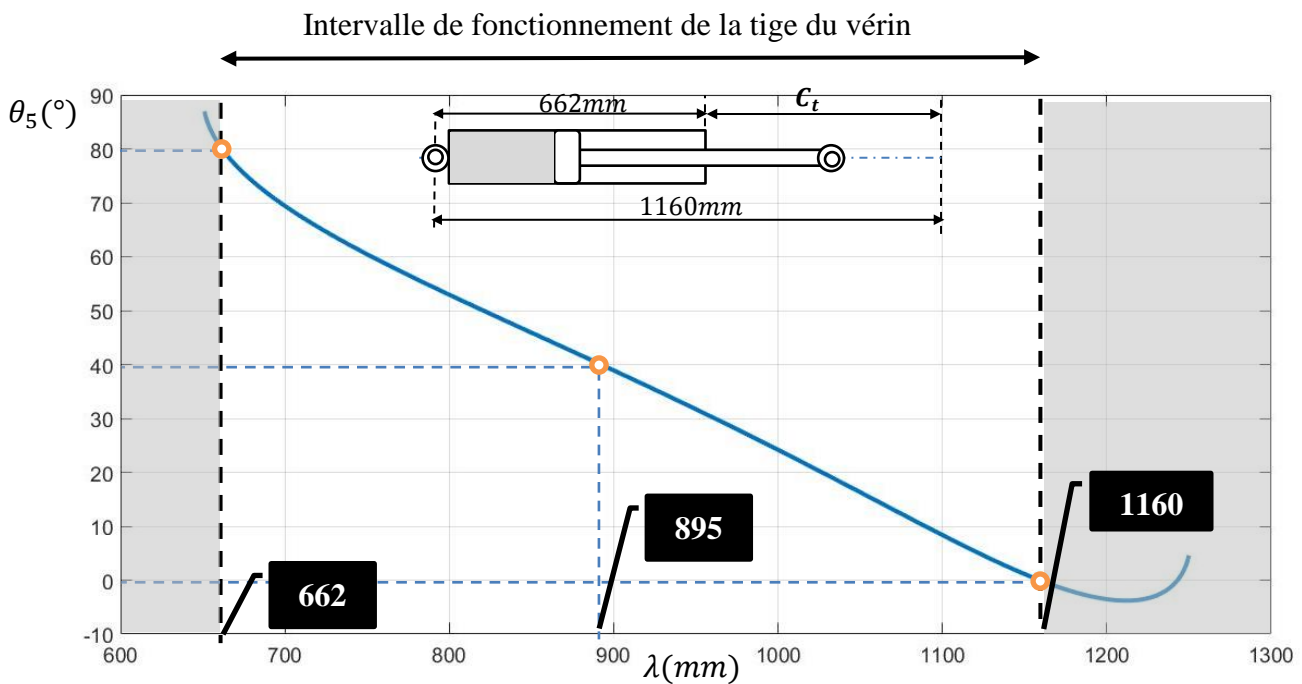


Figure 7. Évolution de $\theta_5(^{\circ})$ en fonction de l'allongement du vérin $\lambda(\text{mm})$

La [figure 8](#) présente le portique marin en vue de dessus dans un virage à droite. La cinématique du portique par rapport au sol est supposée plane dans le plan $(I, \vec{x}_0, \vec{y}_0)$. Le point I est le centre de virage (centre instantané de rotation) du portique. Il est déterminé par l'intersection des droites perpendiculaires aux vitesses de déplacement des 4 roues.

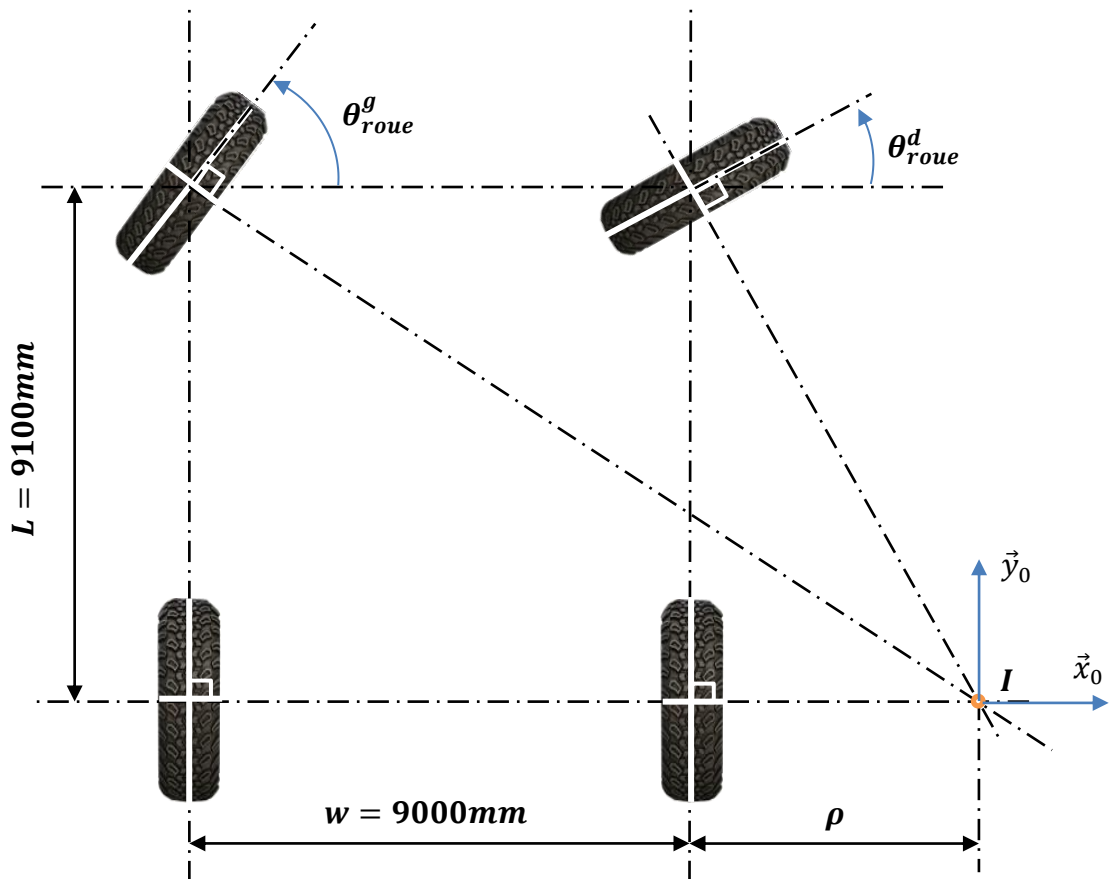


Figure 8. Portique en vue de dessus dans un virage

7. L'objectif de cette question est de trouver la relation entre les deux angles θ_{roue}^d et θ_{roue}^g lorsque le portique vire à droite. Cette relation est utile afin de synchroniser le fonctionnement des deux vérins gauche et droit (figures 4 et 5). En se basant sur la figure 8, on demande d'exprimer :
 - 7.1. Le rayon de virage ρ en fonction de L et θ_{roue}^d
 - 7.2. L'angle de rotation de la roue gauche θ_{roue}^g en fonction de L, w et θ_{roue}^d
8. Les figures 9-a et 9-b correspondent à l'évolution de $(\theta_{roue}^d, \theta_{roue}^g)$ et ρ en fonction de l'allongement du vérin droit (λ_d) lorsque le portique vire à droite. Sachant que l'allongement maximal $\lambda_d^{\max} = 1160\text{mm}$, on demande de :
 - 8.1. Déterminer le décalage maximal entre les deux roues $\Delta\theta^{\max}$;
 - 8.2. Déterminer le rayon de virage minimal ρ^{\min} .
 - 8.3. Conclure par rapport à l'exigence imposée par le cahier des charges.

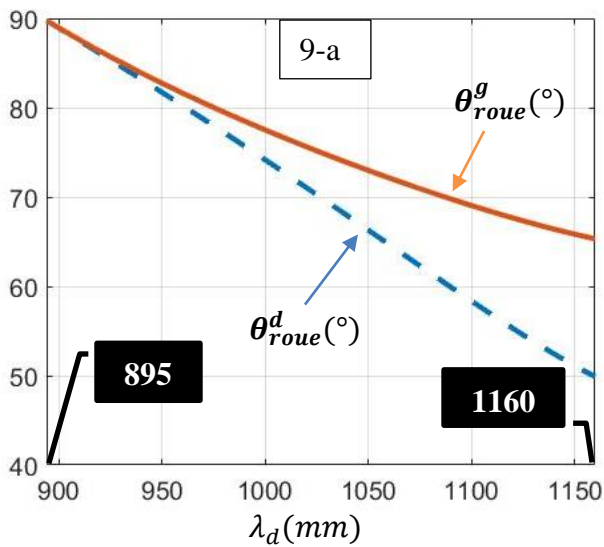


Figure 9-a : évolution de θ_{roue}^d et θ_{roue}^g

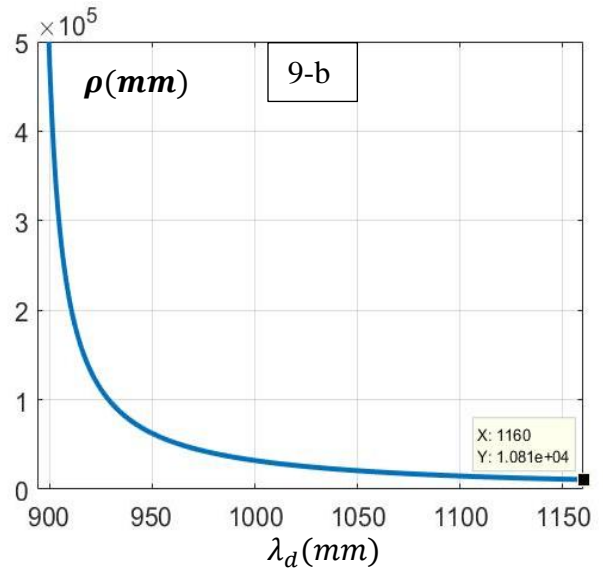


Figure 9-b évolution de ρ en fonction de λ_d

9. Compléter, en se basant sur les équations déterminées dans les questions précédentes, l'organigramme à suivre afin de déduire l'allongement λ_g du vérin gauche en fonction de l'allongement λ_d du vérin droit lorsque le portique vire à droite.
10. La [figure 10](#) présente à l'évolution de l'allongement du vérin gauche λ_g en fonction de l'allongement du vérin droit λ_d .
 - 10.1. À quoi correspond le point O_p de coordonnées (895mm, 895mm) indiqué sur la [figure 10](#) ;
 - 10.2. Déterminer la course du vérin gauche C_g permettant d'assurer un virage maximal à droite.

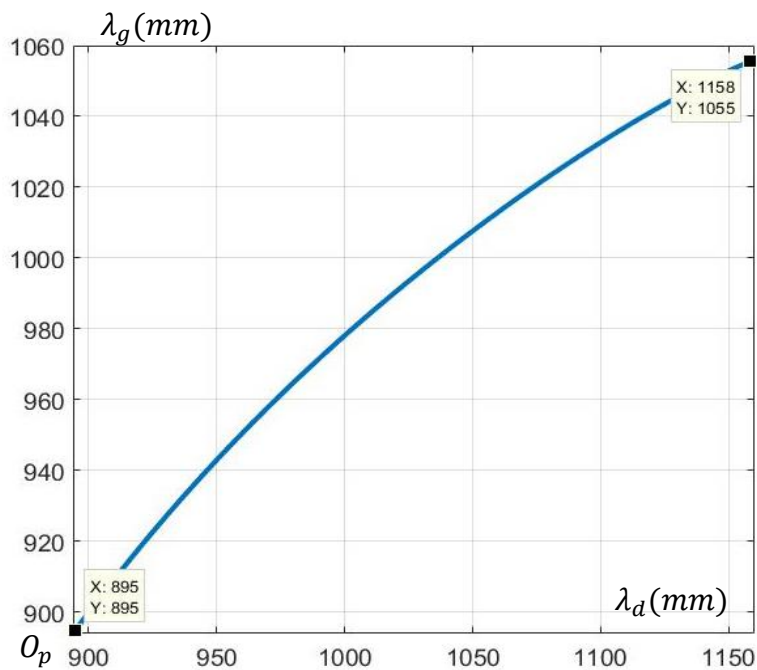


Figure 10. Évolution de l'allongement du vérin gauche λ_g en fonction de l'allongement du vérin droit λ_d

Fin de la partie 1

Vérification des performances des élingues de levage :

La [figure 11](#) correspond à un bateau maintenu par deux élingues. La charge supportée par une élingue et l'angle d'inclinaison α de celle-ci représentent deux paramètres importants dans l'opération de levage du bateau.



Figure 11. Maintien d'un bateau avec deux élingues.

11. L'objectif de cette question est de déterminer la charge supportée par chacune des deux élingues : avant et arrière. La [figure 12](#) montre la disposition des deux élingues par rapport au plan contenant le centre de gravité G du bateau ainsi le bilan des actions mécaniques appliquées sur le bateau.

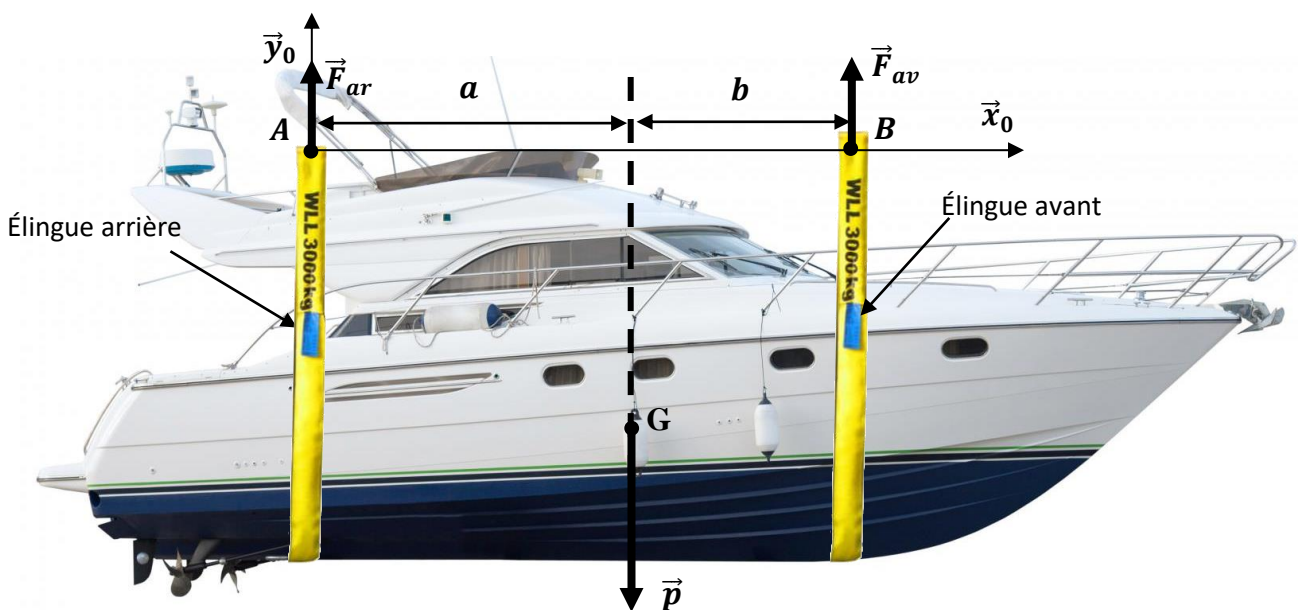


Figure 12. Disposition des élingues par rapport au centre de gravité du bateau

Les données numériques sont résumées dans le tableau suivant :

$a(mm)$	$b(mm)$	$\ \vec{p}\ (N)$	$\ \vec{g}\ (ms^{-2})$
4000	3500	75000	10

Sachant que le bateau est en équilibre, on demande de :

- 11.1. Exprimer $\|\vec{F}_{av}\|$ et $\|\vec{F}_{ar}\|$ en fonction de $(a, b$ et $\|\vec{p}\|)$;
 - 11.2. Faire l'application numérique, préciser laquelle des deux élingues est la plus chargée ;
 - 11.3. Conclure par rapport à l'exigence imposée par le cahier des charges.
12. Dans cette question, l'élingue avant est supposée la plus chargée. Elle est soumise à une charge de $\|\vec{p}_{av}\| = 40\,000\,N$. La figure 13 présente le bilan des actions mécaniques appliquées sur l'élingue avant. L'angle d'inclinaison de l'élingue par rapport à la verticale est noté par α . Sachant que la charge maximale admissible par l'élingue est $\|\vec{T}_{ad}\| = 30\,000\,N$, on demande de :
- 12.1. Déterminer l'angle limite α_{lim} permettant à l'élingue de supporter la charge $\|\vec{p}_{av}\|$; (on donne $\cos^{-1}\left(\frac{2}{3}\right) \approx 48^\circ$)
 - 12.2. Sachant que le cahier des charges exige que l'angle α ne doit pas dépasser 30° . Préciser si on pourra soulever le bateau en toute sécurité dans cette condition ($\alpha = 30^\circ$).

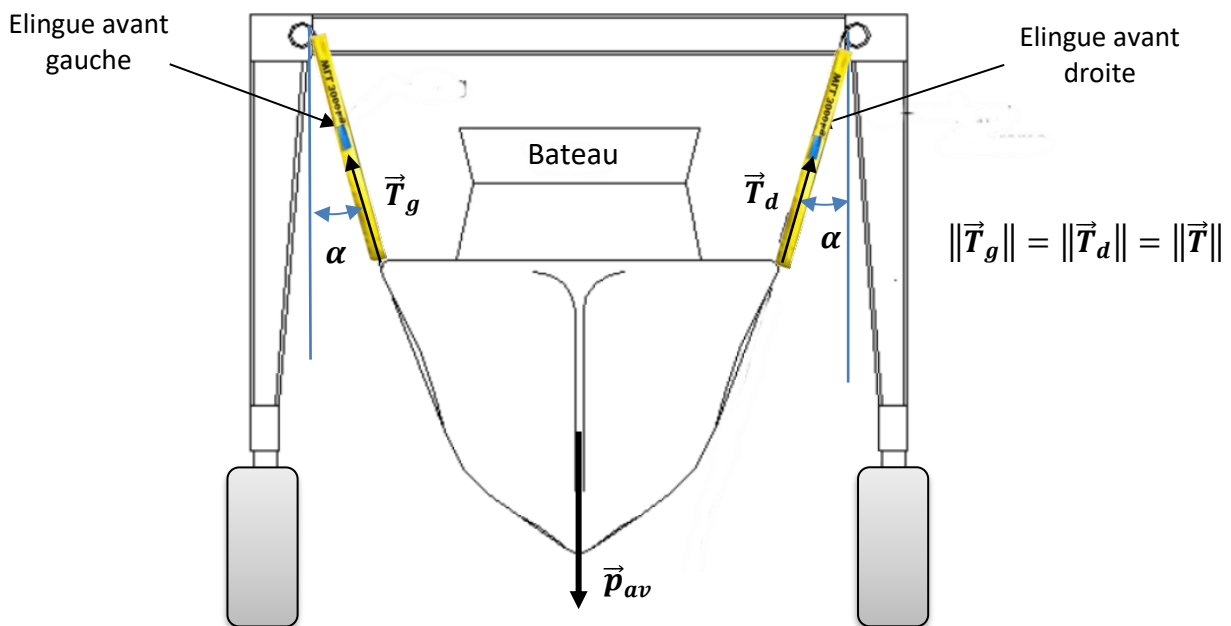


Figure 13. Modèle de calcul de l'angle d'inclinaison de l'élingue avant

Fin de la partie 2

Vérification des performances du treuil hydraulique :

Couple moteur :

Le portique automoteur marin est équipé d'un système de levage qui comprend 4 treuils hydrauliques indépendants. La [figure 14](#) présente celui du côté avant à droite. Il est composé d'un treuil hydraulique (moteur hydraulique + tambour) et d'une moufle à 4 brins ((I_0I_1), (I'_1I_2), (I_2I_3) et (I'_3I_4)). Le système de moufle (poules P_1, P_2, P_3 et P_4) a pour rôle de soulever une charge importante par 4 brins de câble afin de démultiplier l'effort de traction.

L'étude porte sur un seul treuil lorsque le bateau est en phase de montée. Pour cela, la charge à soulever avec l'élingue avant droite est supposée égale à 1/4 du poids du bateau.

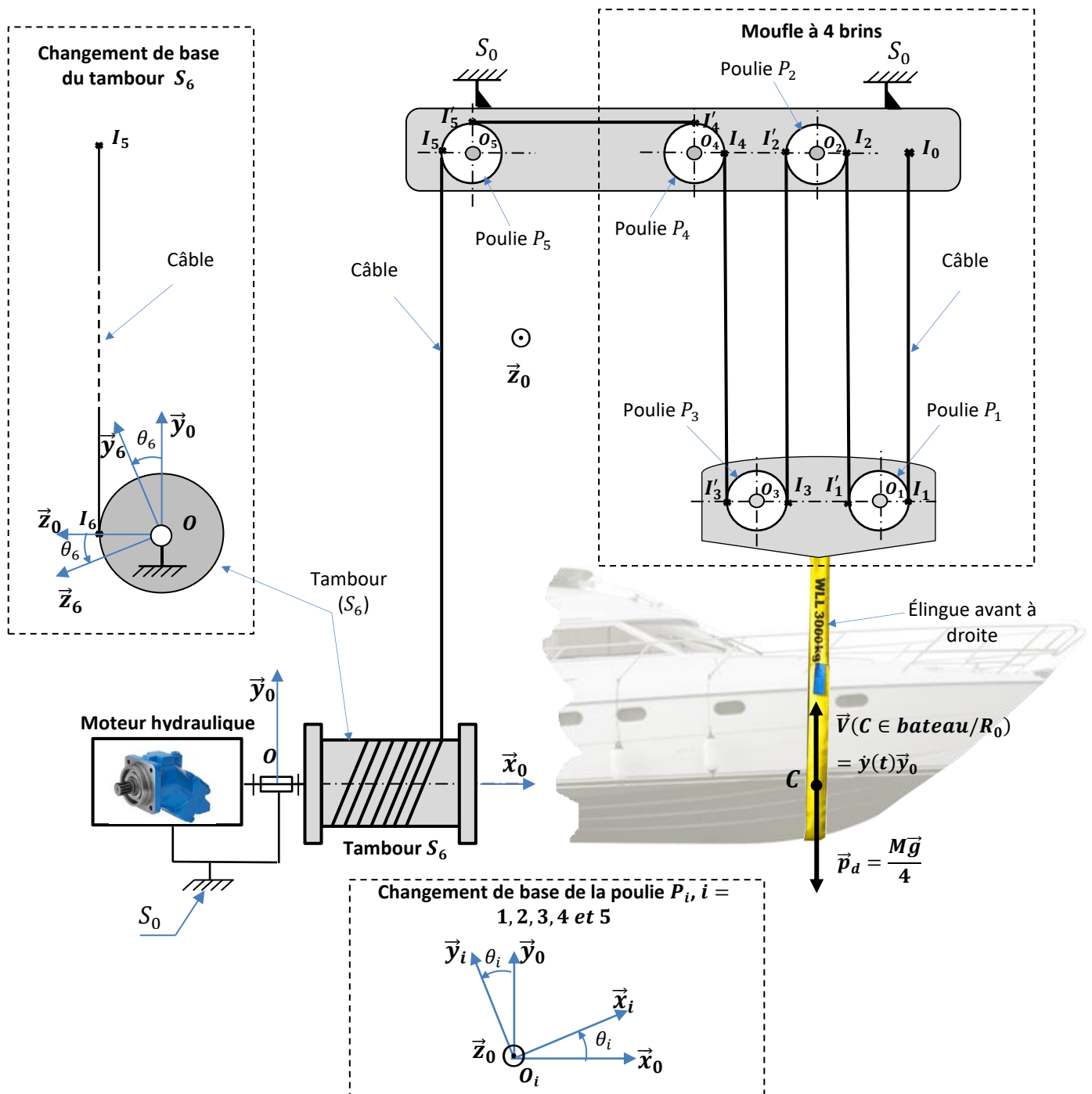


Figure 14. Système de levage du portique automoteur marin : treuil hydraulique + Moufle à 4 brins.

Hypothèses et données :

- Toutes les poulies sont de même rayon $R = 100mm$;
- Le tambour S_6 est un cylindre de diamètre $D = 400mm$;
- Le point I_0 est un point fixe dans S_0 ;
- Le câble ne glisse pas par rapport aux poulies P_i et au tambour S_6 ;
- $\vec{V}(O_1 \in P_1/R_0) = \vec{V}(O_3 \in P_3/R_0) = \vec{V}(C \in \text{bateau}/R_0) = \dot{y}(t)\vec{y}_0$;
- $\dot{\theta}_6(t) = \omega_m(t)$ avec $\omega_m(t)$ est la vitesse angulaire du moteur ;
- $\overrightarrow{I_5 O_5} = \overrightarrow{O_4 I_4} = \overrightarrow{I'_3 O_3} = \overrightarrow{O_3 I_3} = \overrightarrow{I'_2 O_2} = \overrightarrow{O_2 I_2} = \overrightarrow{I'_1 O_1} = \overrightarrow{O_1 I_1} = R\vec{x}_0$;
- $\overrightarrow{O I_6} = \frac{D}{2}\vec{z}_0$;
- Les inerties des éléments du moteur hydraulique sont négligées ;
- Le câble, l'élingue et toutes les poulies sont supposées de masses négligeables ;
- La masse du bateau à soulever est $M = 8\text{tonnes}$. Seul le $\frac{1}{4}$ de la masse sera considéré pour l'élingue avant du coté à droite ;
- Le tambour S_6 est d'axe principal d'inertie (O, \vec{x}_0) . Son moment d'inertie par rapport à (O, \vec{x}_0) est notée par A_6 ;
- Le système matériel $\Sigma = \{Tambour S_6, \text{câble}, Poulies P_i (i = 1,2,3,4,5), \frac{1}{4}\text{bateau}, \text{élingue}\}$;
- Toutes les liaisons sont supposées parfaites ;
- Le repère $R_0(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$, lié au bâti S_0 , est supposé galiléen ;
- L'accélération de la pesanteur est donnée par $\vec{g} = -g\vec{y}_0$;
- L'action du moteur hydraulique sur le tambour S_6 est donnée par : $\{F(MH \rightarrow S_6)\}_O = \left\{ \begin{matrix} \vec{0} \\ C_m \vec{x}_0 \end{matrix} \right\}$.

13. L'objectif de cette question est d'exprimer la vitesse angulaire du moteur $\omega_m(t)$ en fonction de la vitesse de montée du bateau $\dot{y}(t)$. Pour cela, on demande de :

13.1. Écrire la condition de non glissement au point I_1 et au point I'_1 entre le câble et la poulie P_1 et déduire que :

$$\vec{V}(I'_1 \in \text{câble}/R_0) = 2\dot{y}(t)\vec{y}_0 \quad (4)$$

13.2. Indiquer la démarche à suivre, sans donner les détails de calcul, afin de montrer que :

$$\vec{V}(I_5 \in \text{câble}/R_0) = -4\dot{y}(t)\vec{y}_0 \quad (5)$$

13.3. Écrire la condition de non glissement au point I_6 entre le câble et le tambour S_6 et déduire que :

$$\omega_m(t) = \frac{8}{D}\dot{y}(t) \quad (6)$$

13.4. Sachant que la vitesse de montée maximale du bateau est de $\dot{y}^{\max} = 0,2\text{m/s}$, déterminer la vitesse angulaire maximale du moteur ω_m^{\max} .

14. Déterminer l'énergie cinétique du système Σ dans son mouvement par rapport à R_0 , en déduire l'inertie équivalente J_{eq} ramenée sur l'axe moteur.

15. Déterminer la puissance développée par les actions mécaniques intérieures au système Σ .

16. Déterminer la puissance développée par les actions mécaniques extérieures à Σ .

17. En appliquant le théorème de l'énergie cinétique sur le système Σ dans son mouvement par rapport à R_0 , déterminer l'équation suivante :

$$C_m(t) = J_{eq} \frac{d\omega_m(t)}{dt} + \frac{MgD}{32} \quad (7)$$

18. L'objectif de cette question est de justifier l'intérêt d'asservir la vitesse de levage du bateau. Pour cela, on demande de :

18.1. Montrer que le couple moteur $C_m(t)$ on peut l'écrire sous cette forme :

$$C_m(t) = \frac{8}{D} J_{eq} \ddot{y}(t) + \frac{MgD}{32} \quad (8)$$

18.2. Déterminer, pour les deux phases de travail ($t < t_1$ et $t > t_1$), l'expression du couple moteur en se basant sur la loi de commande de levage du bateau donnée par la figure 15 ;

18.3. Préciser la phase pour laquelle le moteur fournit un couple maximal ;

18.4. Justifier alors l'intérêt d'asservir la vitesse de levage du bateau sur les performances du moteur.

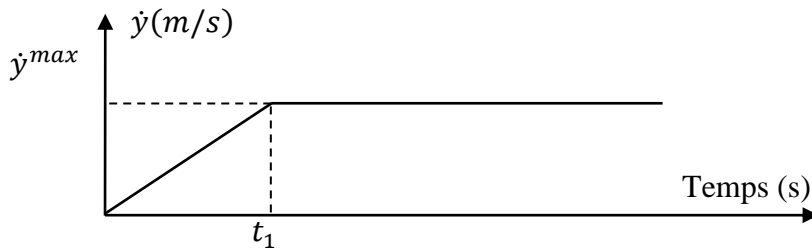


Figure 15. Loi de commande de levage du bateau.

Asservissement de la vitesse de levage du bateau :

L'objectif de cette partie consiste à modéliser et étudier l'asservissement de la vitesse de levage du bateau. La chaîne d'énergie utilisée est présentée par les figures 16 et 17. Le système est composé de :

- Une pompe hydraulique (2) à cylindrée variable $cyl_p(t)$ entraînée en rotation à vitesse constante ω_p grâce au moteur diesel (1) ;
- Un moteur hydraulique (5) à cylindrée fixe cyl_m qui entraîne en rotation le tambour S_6 sur lequel est enroulé le câble ;
- Un limiteur de pression (3) qui permet de limiter la pression $P(t)$ dans le circuit principal à une valeur maximale ;
- Un distributeur (4) qui permet de distribuer l'énergie selon le sens de rotation $\omega_m(t)$ du tambour S_6 ;
- Un vérin de réglage (7) qui agit sur la cylindrée de la pompe $cyl_p(t)$ en fonction de la charge à soulever et la consigne de la vitesse de montée V_c imposée par le conducteur du portique ;
- Une valve Hawe (8) qui gère le débit dans le vérin de réglage (7) en fonction de la pression dans le circuit principal $P(t)$ et la tension $u_h(t)$.

Dans cette partie du sujet, les hypothèses suivantes sont adoptées :

- Les rendements de la pompe et du moteur valent 1 ;
- Les pertes de charges sont négligées ;
- Le débit prélevé du circuit principal par la valve Hawe est négligeable.

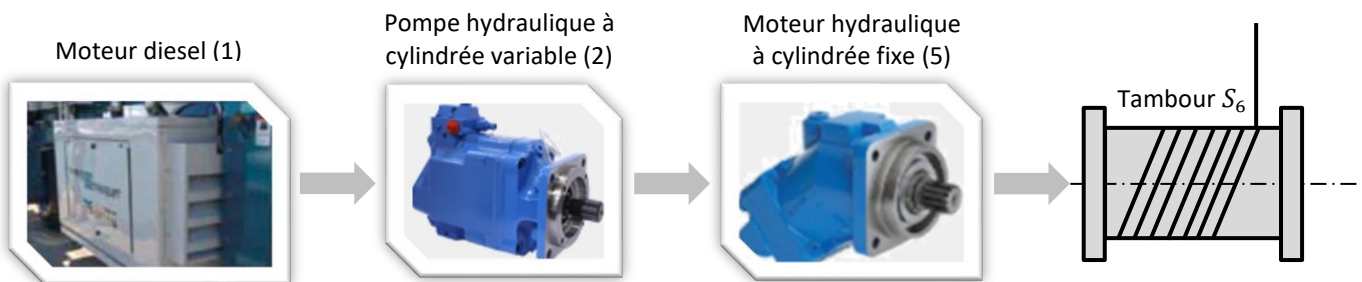


Figure 16. Chaîne d'énergie du treuil hydraulique

La figure 17 correspond au schéma hydraulique de la commande du système (moteur + pompe + valve + vérin).

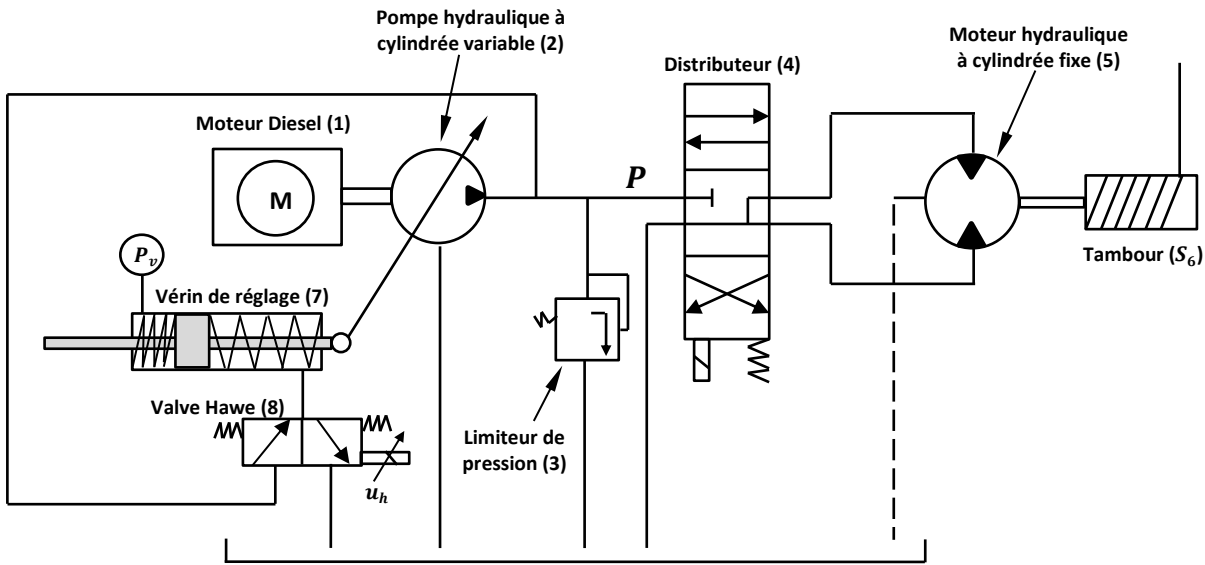


Figure 17. Circuit hydraulique de la commande du treuil hydraulique

Modélisation du système (Pompe + Vérin + Valve) :

Les équations qui régissent le fonctionnement du système (pompe hydraulique + vérin + valve Hawe) sont les suivantes :

$$F_m(t) = -k_m u_h(t) \quad (9)$$

$$q_v(t) = -k_h (k_m u_h(t) - S_v P(t)) \quad (10)$$

$$q_v(t) = S_v \frac{dx_v(t)}{dt} \quad (11)$$

$$cyl_p(t) = -k_v x_v(t) \quad (12)$$

$$q_p(t) = \omega_p \times cyl_p(t) \quad (13)$$

$$P(t) = k_0 q_p(t) \quad (14)$$

Avec :

- $F_m(t)$: effort appliqué par le bobinage sur le piston du vérin (7) (en N) ;
- $u_h(t)$: tension d'alimentation de la valve Hawe (en V) ;
- k_m : facteur de proportionnalité entre $F_m(t)$ et $u_h(t)$;
- $q_v(t)$: débit dans la chambre droite du vérin de réglage (7) (en m^3/s) ;
- $P(t)$: pression dans le circuit principal, dans la pompe et dans le moteur (en Pa) ;
- S_v : section effective du vérin (en m^2) ;
- k_h : facteur de proportionnalité entre le débit et l'effort résultant sur le piston du vérin ;
- $x_v(t)$: position de la tige du vérin par rapport à sa position neutre (en m) ;
- $cyl_p(t)$: cylindrée de la pompe hydraulique (en m^3/rad) ;
- k_v : facteur de proportionnalité entre la position du piston du vérin et la cylindrée de la pompe ;
- k_0 : facteur de proportionnalité entre le débit de la pompe et la pression dans le circuit principal ;
- $q_p(t)$: débit dans la pompe hydraulique (en m^3/s) ;
- ω_p : vitesse de rotation de la pompe (en rad/s).

19. Dans cette question, on demande de :

- 19.1. Traduire les équations 9, 10, 11, 12, 13 et 14 dans le domaine de Laplace sachant que les conditions initiales sont nulles ;
- 19.2. Compléter le schéma bloc (figure 18) qui modélise le système (pompe hydraulique à cylindrée variable, vérin de réglage et valve Hawe) ;

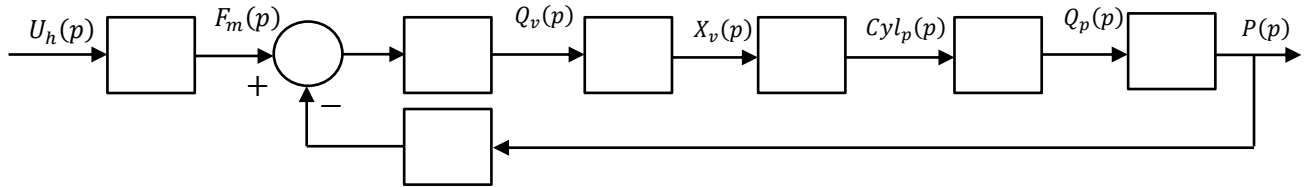


Figure 18. Schéma bloc du (pompe hydraulique à cylindrée variable, vérin de réglage et valve Hawe)

20. Dans cette question, on demande de :

- 20.1. Simplifier le schéma bloc de la figure 18 et déterminer la fonction de transfert $H_1(p) = \frac{P(p)}{U_h(p)}$;
- 20.2. Mettre la fonction de transfert $H_1(p)$ sous la forme canonique d'un système de premier ordre $H_1(p) = \frac{K_1}{1+\tau_1 p}$; expliciter K_1 et τ_1 en fonction des données du sujet.
- 20.3. Déterminer le temps de réponse à 5% et vérifier qu'il est inversement proportionnel à la vitesse de rotation de la pompe ω_p ;

Chaîne d'asservissement de la vitesse de levage du bateau :

Les équations qui régissent le fonctionnement du système (moteur hydraulique + tambour + la charge) sont les suivantes :

$$c_m(t) = \left(A_6 + \frac{MD^2}{256} \right) \frac{d\omega_m(t)}{dt} + C_{r0} \text{ avec } C_{r0} = \frac{MgD}{32} \quad (15)$$

$$v_b(t) = \frac{D}{8} \omega_m(t) \quad (16)$$

$$c_m(t) = cyl_m \times P(t) \quad (17)$$

Avec :

- $c_m(t)$: couple moteur (en Nm) ;
- A_6 : moment d'inertie du tambour S_6 (en Kgm^2) ;
- M : masse du bateau (en Kg) ;
- D : diamètre du tambour (en m) ;
- g : l'accélération de la pesanteur (en ms^{-2}) ;
- $\omega_m(t)$: vitesse de rotation du moteur hydraulique (en rad/s) ;
- $v_b(t)$: vitesse de levage du bateau (en m/s) ;
- cyl_m : cylindrée du moteur hydraulique (en m^3/rad) ;
- $P(t)$: pression dans le circuit principal, dans la pompe et dans le moteur (en Pa).

21. Dans cette question, on demande de :

- 21.1. Traduire les équations 15, 16 et 17 dans le domaine de Laplace sachant que les conditions initiales sont nulles ;
- 21.2. Compléter le schéma bloc (figure 19) qui modélise la chaîne d'asservissement de la vitesse de montée du bateau.

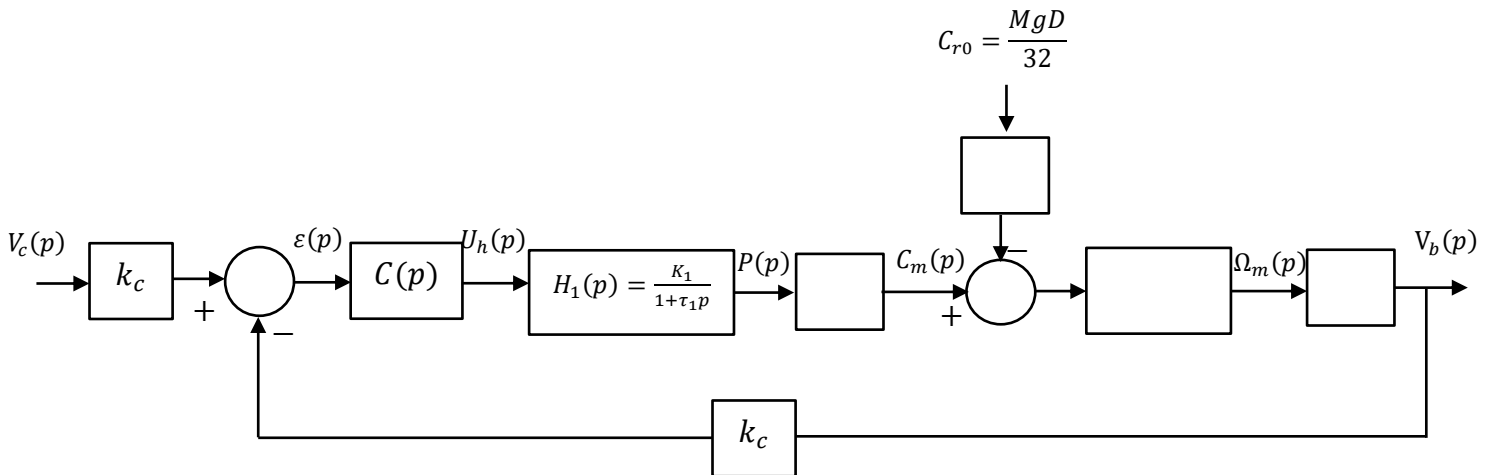


Figure 19. Schéma bloc d'asservissement de la vitesse de montée du bateau

Pour les questions 22, 23 et 24, on suppose que $C(p) = 1$ et que le système du treuil hydraulique fonctionne à vide ($M = 0$).

22. Dans cette question, on demande de :

22.1. Déterminer la fonction de transfert $H_2(p) = \frac{V_b(p)}{V_c(p)}$;

22.2. Mettre $H_2(p)$ sous la forme canonique d'un système de second ordre : $H_2(p) = \frac{K_2}{1 + \frac{2m}{\omega_0}p + \frac{p^2}{\omega_0^2}}$

Expliciter les paramètres (K_2 , m et ω_0) en fonction des données du problème ;

23. Dans cette question, on prend $m = \sqrt{\frac{2A_6}{Dk_1k_c\tau_1cyl_m}}$ et on demande de :

23.1. Déterminer l'expression de τ_1 en fonction des paramètres du problème, permettant d'avoir la réponse à vide la plus rapide sans avoir de dépassement ;

23.2. Déduire dans ce cas, l'expression de la vitesse de rotation de la pompe ω_p en fonction de ($k_1, k_c, cyl_m, D, A_6, k_0, k_h, k_v$).

24. Dans cette question on demande de :

24.1. Déterminer la fonction de transfert en boucle ouverte $FTBO(p)$;

24.2. Déterminer la classe du système ;

24.3. Conclure par rapport au critère de précision imposé par le cahier des charges.

25. Dans cette question, on prendra $C(p) = \frac{k_i}{p}$ et le système est en charge ($M = \text{masse du bateau}$), on demande de :

25.1. Exprimer $\varepsilon(p)$ en fonction de $V_c(p)$, C_{r0} et d'autres paramètres du système ;

25.2. Calculer l'erreur de position ε_p pour un échelon de consigne d'amplitude V_{c0} ;

25.3. Conclure par rapport au critère de précision imposé par le cahier des charges.

Fin de la partie 3

FIN DE L'ÉPREUVE