

CONCOURS NATIONAL D'INGÉNIEURS DE MAURITANIE

(CNIM)



CONCOURS 2017

ÉPREUVE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR

Durée de l'épreuve : 3 heures

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

Le sujet comporte:

- 11 pages d'énoncé
- 12 pages de document réponse

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.

Tournez la page S.V.P

Sujet : Passerelle télescopique de l'aéroport international NOUAKCHOTT-OMTOUNSY

Présentation :

L'aéroport International Nouakchott-Omtounsy est mis en service depuis juin 2016. Il peut recevoir les grands avions tels que les Airbus 380 et les Boeing 780. Il comporte notamment un bâtiment principal et deux pistes d'atterrissage, longues de 4,3Km et 2,6Km, ainsi qu'un terminal passager de 30000m². **Il est équipé de 6 passerelles télescopiques** permettant aux passagers d'accéder dans les avions facilement à partir des salles d'embarquement.



Figure 1 : Aéroport International Nouakchott-Omtounsy

Le sujet porte sur l'étude de la passerelle télescopique de l'aéroport international Nouakchott-Omtounsy (figure 2).

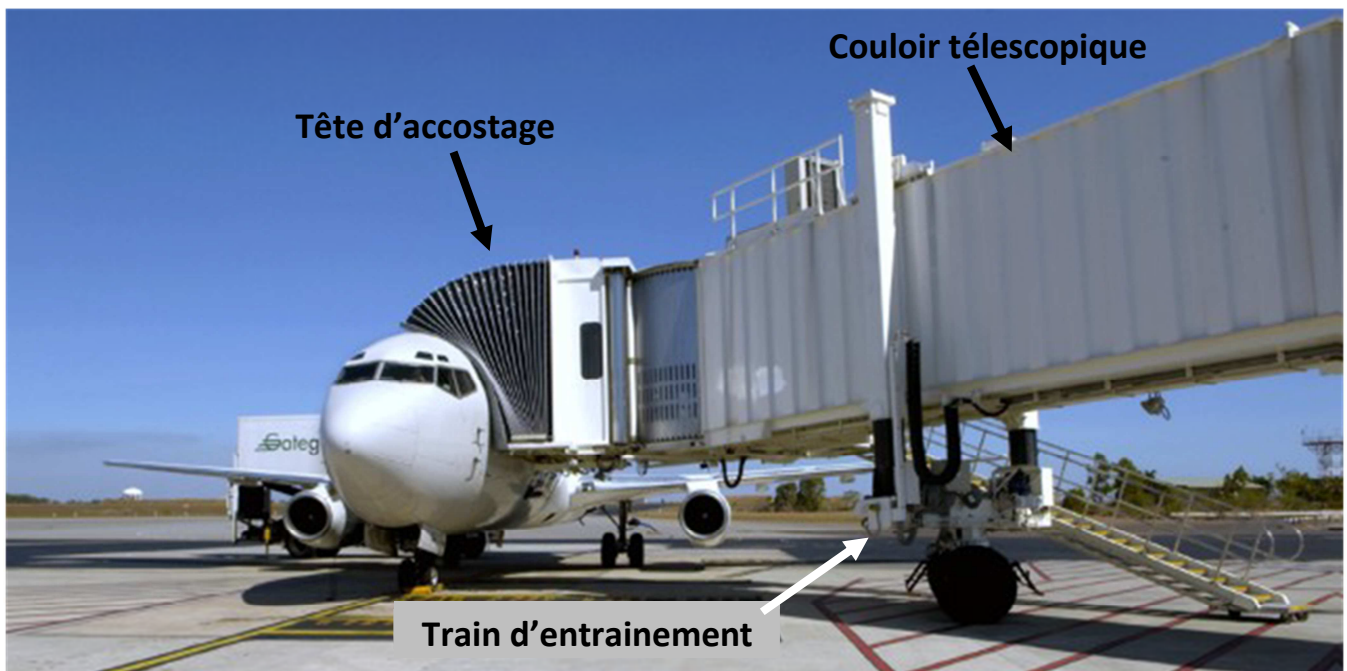


Figure 2 : Passerelle télescopique : Composition

La passerelle télescopique est composée principalement de:

- **Une rotonde :** Elle relie la passerelle à la salle d'embarquement et assure sa rotation autour d'un axe vertical.
- **Couloirs télescopiques :** Ils permettent l'acheminement des passagers de la salle d'embarquement vers l'avion.
- **Un train d'entraînement :** Il assure le déplacement horizontal, vertical et radial de la passerelle.
- **Tête d'accostage :** Elle assure la liaison entre les couloirs télescopiques et la porte de l'avion.

La **figure 3** correspond au train d'entraînement de la passerelle télescopique. Ce système assure trois types de mouvement :

- Mouvement horizontal : assuré à travers un motoréducteur *MR1* (Horizontal drive motor).
- Mouvement vertical : assuré par deux motoréducteurs *MR2* (Vertical motor)
- Mouvement radial : assuré par une butée à bille (Cross roller bearing).

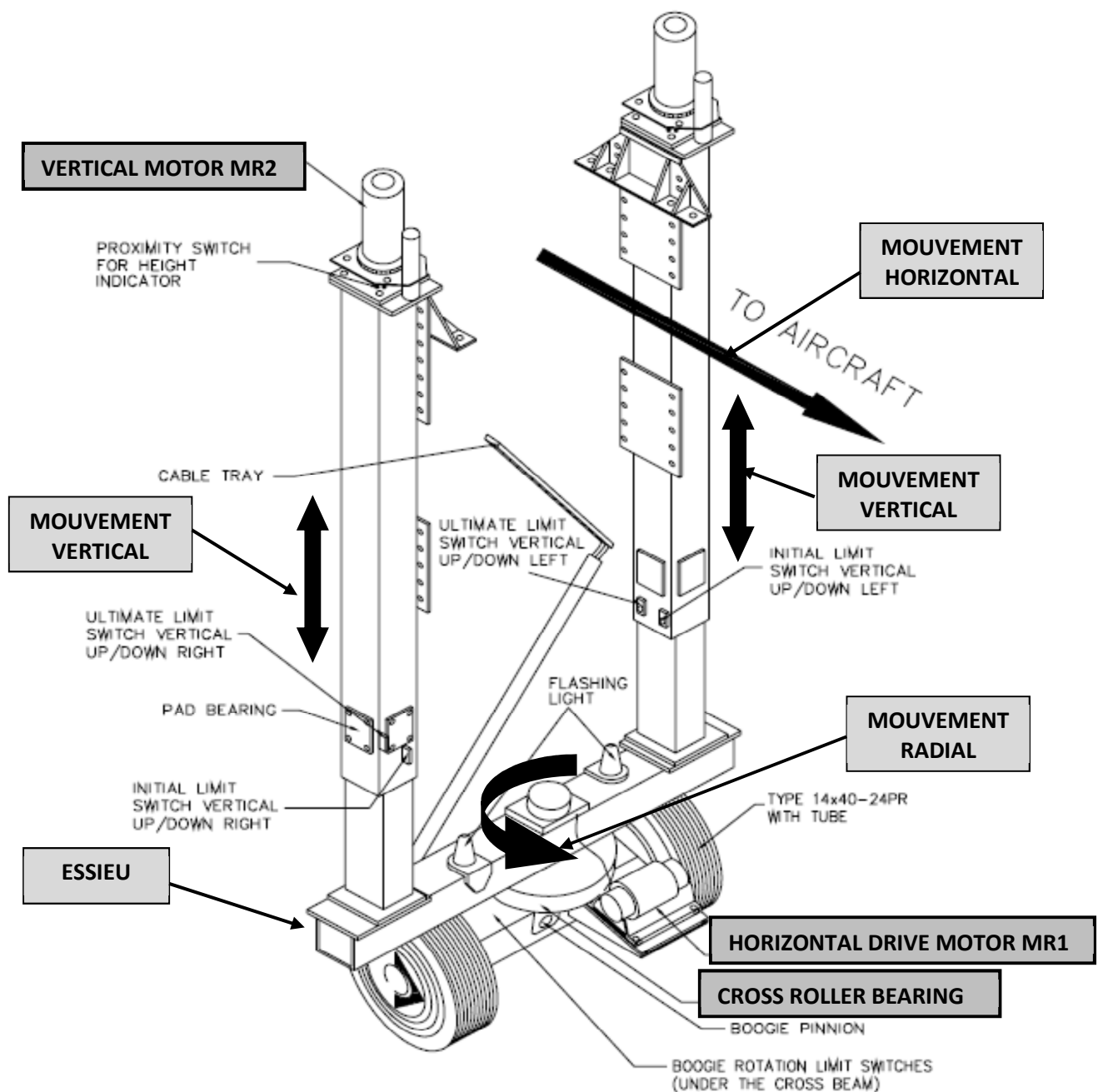


Figure 3 : Train d'entraînement de la passerelle

La **figure 4** correspond aux cas d'utilisations de la passerelle télescopique dans son environnement.

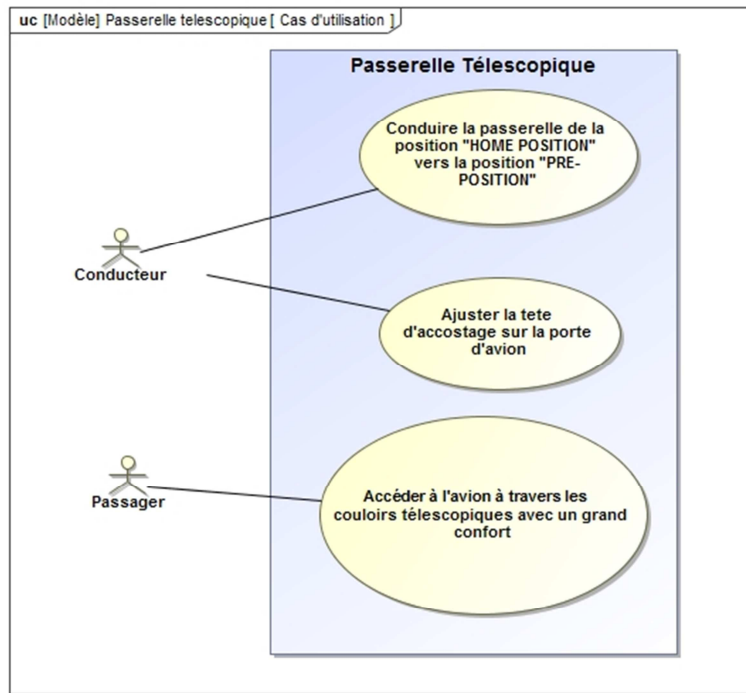


Figure 4 : Diagramme partiel des cas d'utilisation de la passerelle télescopique

La **figure 5** donne le diagramme partiel des exigences de la passerelle télescopique.

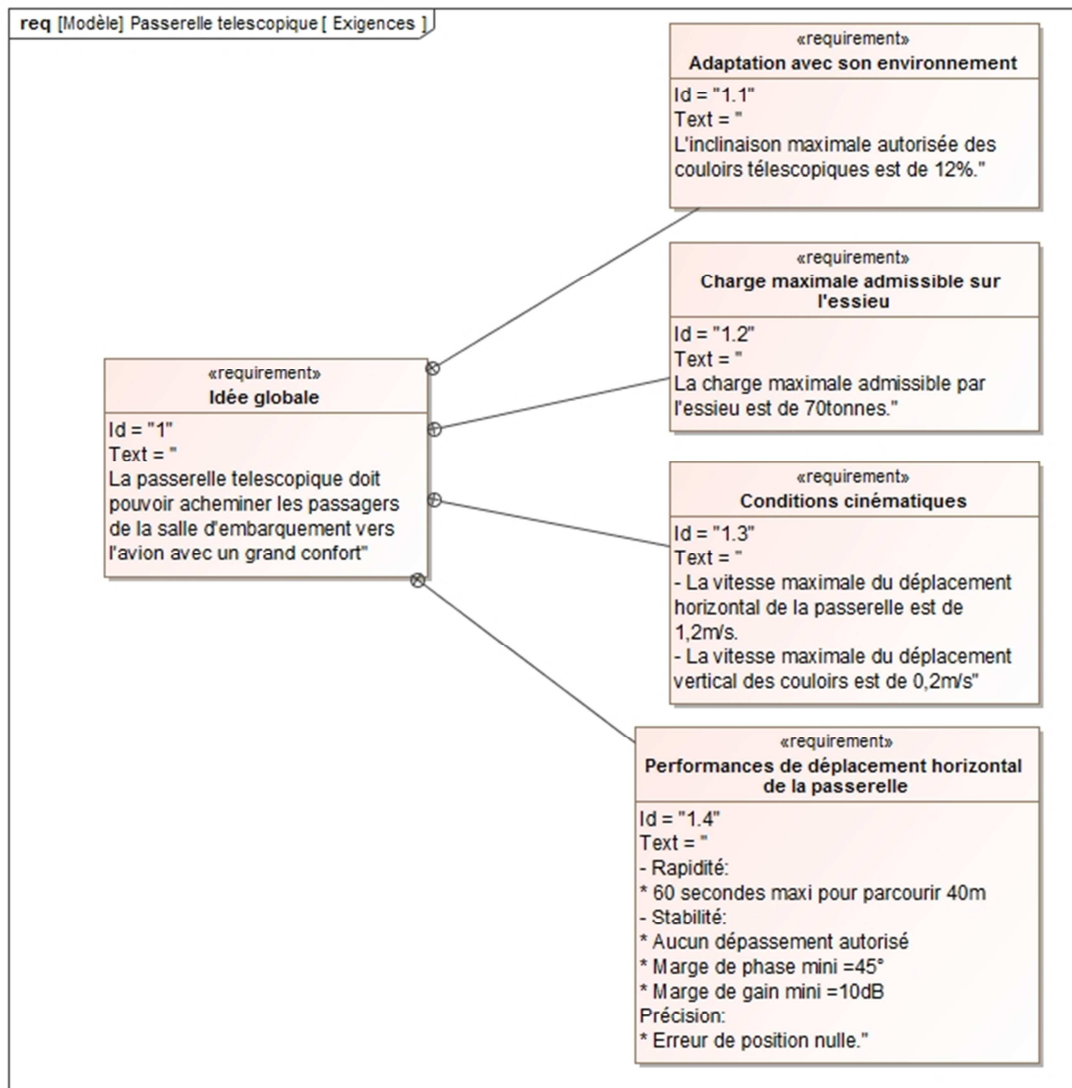


Figure 5 : Diagramme partiel des exigences

Partie 1. Validation des capacités d'adaptation de la passerelle à son environnement

La **figure 6** présente le schéma cinématique minimal de la passerelle télescopique. Elle est composée de :

- un bâti (0) lié au repère $R_0(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$;
- une rotonde (1) liée au repère $R_1(O, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$;
- un couloir (2) lié au repère $R_2(O, \vec{x}_1, \vec{y}_2, \vec{z}_2)$;
- un couloir (3) lié au repère $R_3(A, \vec{x}_1, \vec{y}_2, \vec{z}_2)$ en translation par rapport au couloir (2).
- un corps du portique (4) lié au repère $R_4(B, \vec{x}_1, \vec{y}_2, \vec{z}_2)$;
- un essieu (5) lié au repère $R_5(B, \vec{x}_5, \vec{y}_5, \vec{z}_2)$;
- une roue motrice (6) liée au repère $R_6(B, \vec{x}_5, \vec{y}_6, \vec{z}_6)$;

On donne :

$$\vec{OA} = \lambda(t)\vec{y}_2, \quad \vec{AB} = -\mu(t)\vec{z}_2, \quad \vec{BI} = -\frac{D}{2}\vec{z}_0, \quad \vec{OI} = x_I\vec{x}_0 + y_I\vec{y}_0 + z_I\vec{z}_0, \quad \vec{AD} = l\vec{y}_2, \quad \vec{ID} = x_D\vec{x}_0 + y_D\vec{y}_0 + z_D\vec{z}_0$$

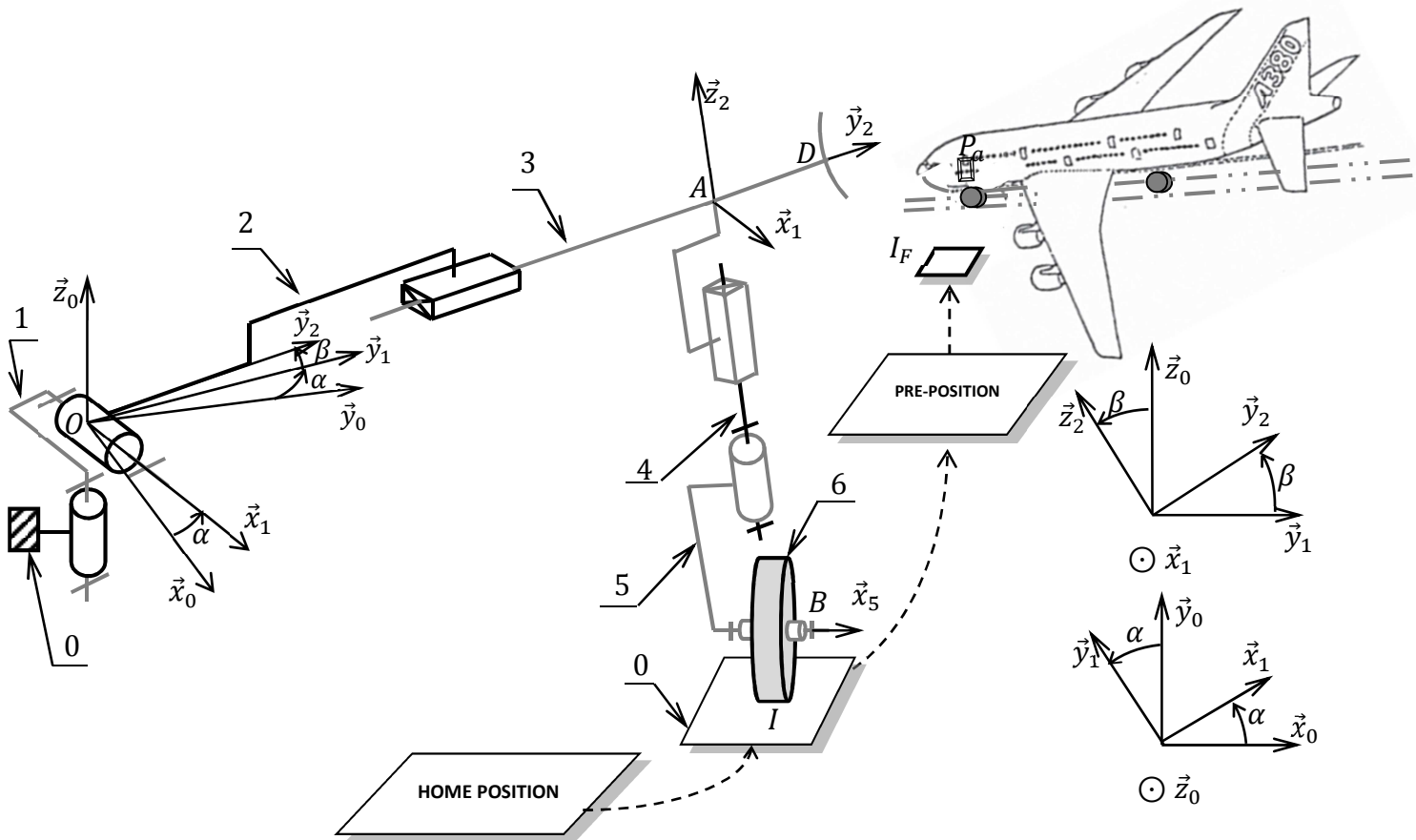


Figure 6 : Schéma cinématique minimal de la passerelle télescopique

Question 1. Compléter le graphe des liaisons et préciser les spécifications nécessaires pour chaque liaison.

Question 2. Exprimer les vecteurs \vec{y}_2 et \vec{z}_2 dans la base du repère $R_0(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$.

Question 3. Ecrire les équations scalaires qui découlent de la fermeture de la chaîne des solides 0-1-2-3-4-5-6-0 en projection dans la base du repère $R_0(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$.

Question 4. Exprimer le vecteur $\vec{ID} = \vec{IB} + \vec{BA} + \vec{AD}$ dans la base du repère $R_0(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$, en déduire les expressions de x_D, y_D et z_D .

Tournez la page S.V.P

Question 5. Il est à noter qu'à la position finale (le point de contact I devient confondu avec le point I_F), le point D , centre de la tête d'accostage, devient confondu avec le point P_a , centre de la porte de l'avion. L'objectif de cette question est de déterminer un modèle de l'angle d'inclinaison β de la passerelle en fonction de la hauteur de la porte de l'avion par rapport au sol. Pour simplifier les calculs, on suppose que :

- L'angle $\alpha = \text{constante} = 0$;
- $\overrightarrow{OI_F} = y_F \vec{y}_0 - h \vec{z}_0$
- $\overrightarrow{I_F P_a} = y_a \vec{y}_0 + z_a \vec{z}_0$

En se basant sur ces conditions et les questions 3 et 4, montrer que l'angle d'inclinaison β est donné par :

$$\tan \beta = \frac{z_a - h}{y_F + y_a}$$

Avec : h est la hauteur de la rotonde, z_a la hauteur de la porte de l'avion par rapport au sol et y_F et y_a sont des cotes connues lors du positionnement de l'avion et de la passerelle.

Question 6. Pour $h = 4m$, $z_a = 2m$, $y_a = 2m$ et $y_F = 38m$, est ce que l'exigence imposée par le cahier des charges est respectée ? On rappelle que l'inclinaison maximale de la passerelle autorisée est de 12%.

Partie 2. Validation de la charge maximale admissible par l'essieu de la passerelle

La **figure 7** correspond au modèle statique de la passerelle dans le cas le plus défavorable (le point de contact I est confondu avec I_F). Dans cette partie, on adopte les hypothèses suivantes :

- L'angle $\alpha = \text{constante} = 0^\circ$.
- La passerelle est supposée en équilibre.
- Dans cette configuration, l'ensemble des deux couloirs (2) et (3) forment un seul solide S de masse M et de centre d'inertie G tel que $\overrightarrow{OG} = y_G \vec{y}_2$. Le couloir (2) est supposé de masse m_2 et de centre d'inertie G_2 tel que $\overrightarrow{OG_2} = y_2 \vec{y}_2$ alors que le couloir (3) est supposé de masse m_3 et de centre d'inertie G_3 tel que $\overrightarrow{OG_3} = y_3 \vec{y}_2$.
- La liaison pivot d'axe (O, \vec{x}_0) entre l'ensemble S et le bâti (0) est supposée parfaite.
- Le système du pont élévateur (4) exerce sur l'ensemble S une action mécanique représentée par le torseur suivant : $\{F(4 \rightarrow S)\} = \left\{ \begin{array}{c} F \vec{z}_2 \\ \vec{0} \end{array} \right\}_B$
- L'accélération de la pesanteur est donnée par $\vec{g} = -g \vec{z}_0$
- On donne : $\overrightarrow{OB} = b \vec{y}_2 - a \vec{z}_2$

Question 7. Exprimer y_G , position du centre d'inertie de l'ensemble S formé par les couloirs (2) et (3), en fonction de m_2 , m_3 , y_2 et y_3 .

Dans la suite de cette partie, on termine les calculs avec y_G .

Question 8. Déterminer, au point O et dans la base du repère R_0 , le torseur d'actions mécaniques extérieures à l'ensemble S .

Question 9. En appliquant le théorème du moment statique au point O en projection sur l'axe \vec{x}_0 , Montrer que l'effort F qu'exerce (4) sur S est donné par : $F = \frac{Mgy_G \cos \beta}{b}$.

Question 10. D'après le cahier des charges, la charge maximale admissible par l'essieu de la passerelle est de 70 tonnes. Est-ce que cette condition est respectée sachant que $M = 60 \cdot 10^3 Kg$, $g = 10 ms^{-2}$, $y_G = 10m$, $b = 15m$ et $\cos \beta \approx 1$.

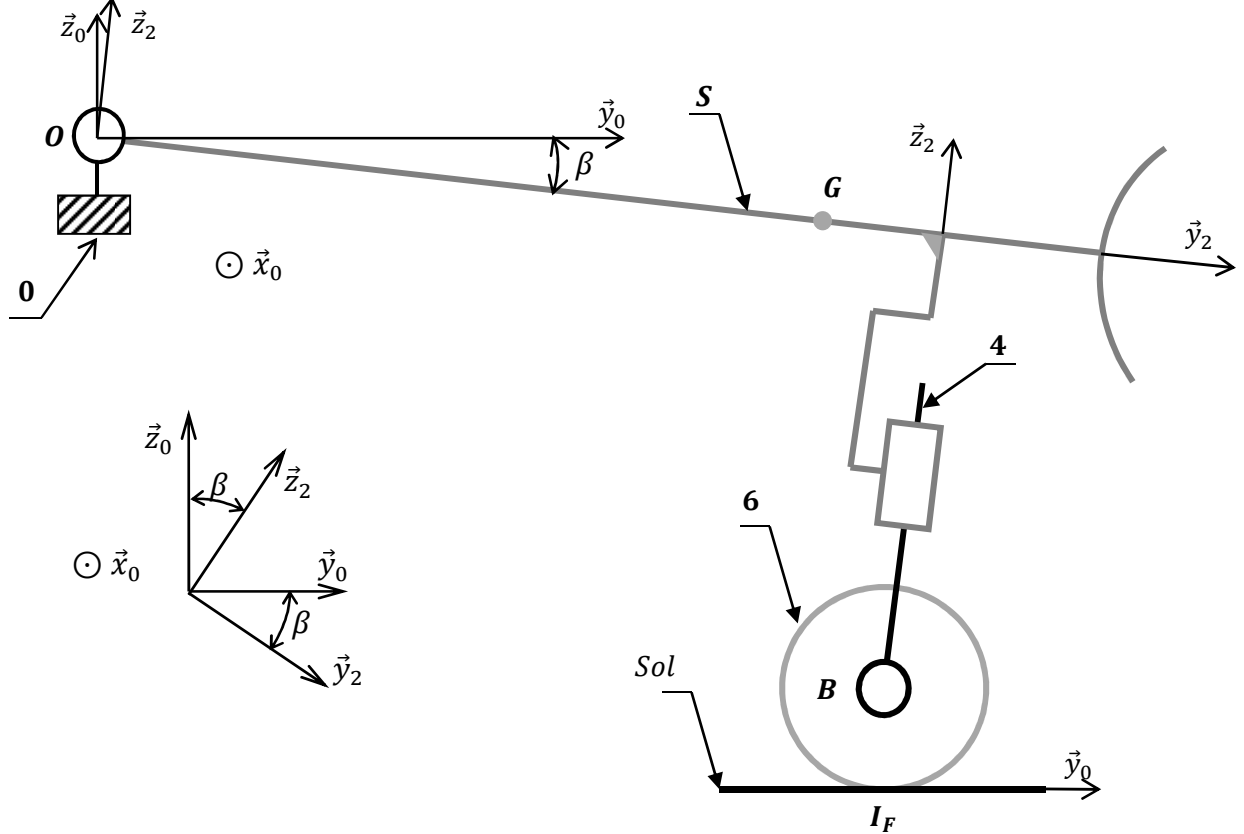


Figure 7 : Modèle statique de la passerelle

Partie 3. Validation de l'aptitude de la passerelle au déplacement horizontal

Dans cette partie, l'étude porte sur le déplacement horizontal de la passerelle de la position « **HOME POSITION** » à la position « **PRE-POSITION** ». L'effet de l'inclinaison des couloirs est négligé ($\beta = 0^\circ$) et on se place dans le cas où l'angle α est nul. Le couloir (2) est supposé immobile par rapport au bâti (0). Pour cela, le couloir (3) est supposé en liaison glissière d'axe (O, \vec{y}_0) avec le bâti (0) et de paramètre de translation $y(t)$ (voir figure 8). On adopte également les hypothèses suivantes :

- Le repère $R_0(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ est supposé galiléen.
- La roue (6) est supposée en liaison pivot parfaite d'axe (B, \vec{x}_0) avec le couloir (3) et en liaison ponctuelle de normale (I, \vec{z}_0) avec le sol de coefficient de frottement f_0 . Elle est supposée de masse m_6 , de centre d'inertie B , d'axe principal d'inertie (B, \vec{x}_0) et de moment principal d'inertie A_6 par rapport à (B, \vec{x}_0) . On donne $\vec{BI} = -\frac{D}{2}\vec{z}_0$ avec $D = 1m$.
- Le couloir (3) est supposé de masse m_3 et de centre d'inertie G_3 avec $\vec{OG}_3 = y(t)\vec{y}_0$.
- L'accélération de la pesanteur est donnée par $\vec{g} = -g\vec{z}_0$.
- La liaison glissière entre le bâti (0) et le couloir (3) est supposée avec frottement dont le torseur

d'actions mécaniques est donné par le torseur suivant : $\{F(0 \rightarrow 3)\} = \begin{Bmatrix} X & L \\ -f_R(t) & M \\ Z & N \end{Bmatrix}_{(x_0, y_0, z_0)}$.

- Les masses et les inerties des éléments du motoréducteur sont négligées.
- Le rapport de réduction du réducteur est $K_r = 2000$.
- Le motoréducteur MR1 exerce un couple sur la roue (6) donné par le torseur suivant :

$\{F(MR1 \rightarrow 6)\} = \begin{Bmatrix} \vec{0} \\ -\eta K_r c_m \vec{x}_0 \end{Bmatrix}_B$ avec K_r est le rapport de réduction du réducteur et η son rendement.

- On donne : $\vec{\Omega}(6/0) = \dot{\theta}\vec{x}_0 = -\frac{\omega_m(t)}{K_r}\vec{x}_0$ avec $\omega_m(t)$ est la vitesse angulaire de l'arbre moteur et K_r le rapport de réduction du réducteur.

Tournez la page S.V.P

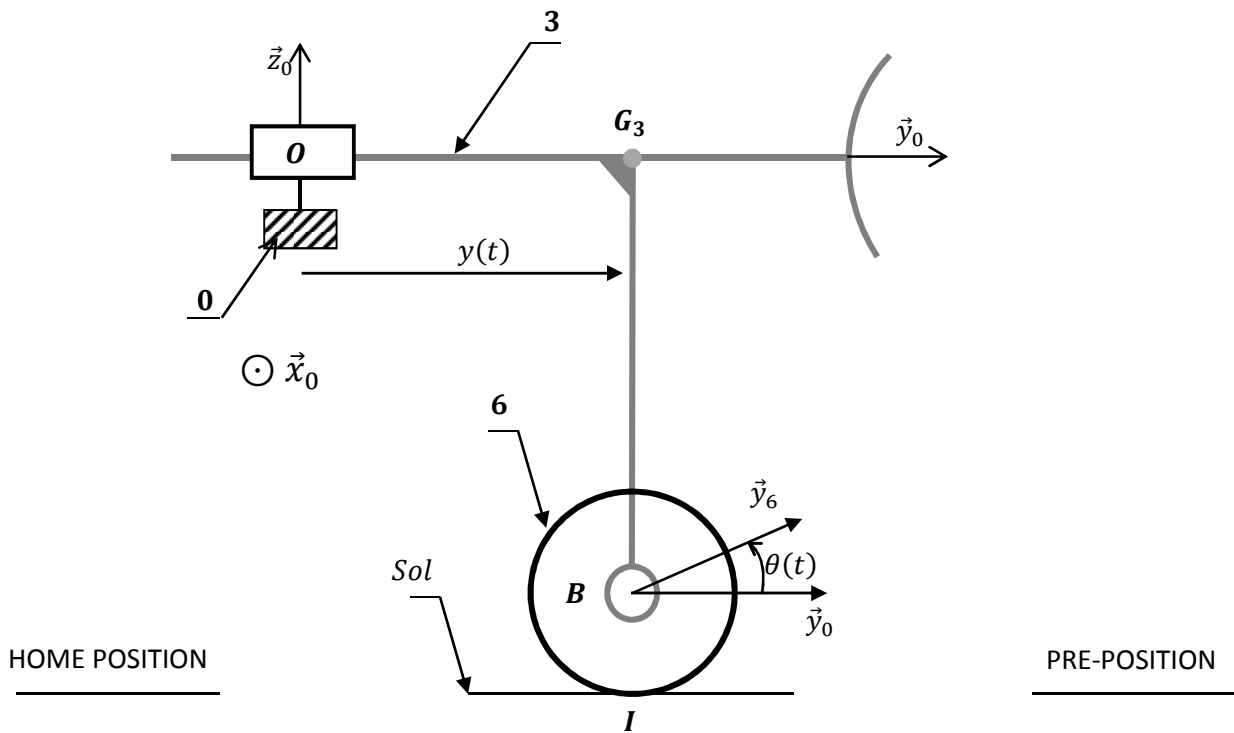


Figure 8 : Modèle dynamique de la passerelle

Question 11. A partir de la condition de roulement sans glissement au point I entre la roue (6) et le sol, montrer que $\dot{y}(t) = \frac{D}{2K_r} \omega_m(t)$. Déduire la vitesse angulaire maximale du moteur ω_{max} permettant de répondre au critère imposé par le cahier des charges. On rappelle que la vitesse maximale de déplacement horizontal autorisée pour la passerelle est de 1,2m/s.

Question 12. Déterminer l'énergie cinétique du système matériel Σ formé par le couloir (3) et la roue (6) dans son mouvement par rapport à R_0 . Déduire le moment d'inertie équivalente J_{eq} du système Σ , ramenée sur l'arbre moteur, en fonction de m_3 , m_6 , D , A_6 et K_r .

Question 13. Déterminer la puissance développée par les actions mécaniques intérieures au système matériel Σ .

Question 14. Déterminer la puissance développée par les actions mécaniques extérieures au système matériel Σ .

Question 15. En appliquant le théorème de l'énergie cinétique (Energie-Puissance), exprimer le couple moteur $c_m(t)$ en fonction de J_{eq} , $f_R(t)$, D , K_r , η et $\frac{d\omega_m(t)}{dt}$.

La courbe donnée par la figure 9 correspond à la loi de commande du moteur (**HORIZONTAL DRIVE MOTOR**) en fonction du temps lorsque la passerelle passe de la position (**HOME POSITION**) à la position (**PRE-POSITION**).

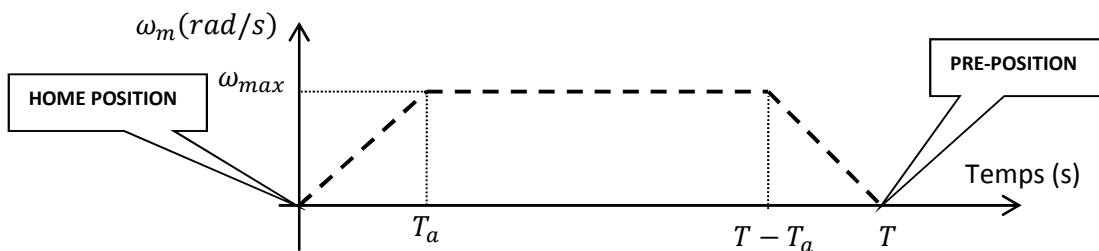


Figure 9 : Loi de commande de la vitesse angulaire du moteur

Question 16. En se basant sur la courbe donnée par la **figure 9**, compléter le tableau suivant et indiquer dans quelle période, le moteur fournit un couple maximal. On donne : $c_m(t) = \frac{1}{\eta} \left[\frac{D}{2K_r} f_R(t) + J_{eq} \frac{d\omega_m(t)}{dt} \right]$.

Période	$[0, T_a]$	$]T_a, T - T_a[$	$[T - T_a, T]$
$\frac{d\omega_m(t)}{dt}$ en $(rads^{-2})$			
Couple moteur $c_m(Nm)$ Expression analytique			

Partie 4. Validation des performances de déplacement horizontal de la passerelle

La modélisation et la commande des moteurs asynchrones étant très complexes, on travaillera dans la suite du problème sur un modèle de moteur équivalent à un moteur à courant continu. On suppose aussi un comportement linéaire du moteur dans les différents régimes de fonctionnement. Le comportement électromécanique de ce type de moteur est donné par les équations suivantes :

$$u(t) = Ri(t) + e(t) \tag{1}$$

$$e(t) = k_e \omega_m(t) \tag{2}$$

$$c_m(t) = K_t i(t) \tag{3}$$

$$c_m(t) - \frac{D}{2\eta K_r} f_R(t) = \frac{J_{eq}}{\eta} \frac{d\omega_m(t)}{dt} \tag{4}$$

Avec $u(t)$ la tension appliquée aux bornes du moteur, $i(t)$ le courant d'induit, $e(t)$ la force contre électromotrice, $\omega_m(t)$ la vitesse de rotation du moteur, $c_m(t)$ le couple délivré par le moteur, $f_R(t)$ l'effort résistant généré par frottement au niveau de la liaison glissière entre les deux couloirs, J_{eq} l'inertie équivalente ramenée sur l'arbre moteur, D le diamètre de la roue, η le rendement du réducteur et K_r son rapport de réduction.

Question 17. Traduire les équations (1 à 4) qui régissent le fonctionnement du moteur dans le domaine de Laplace sachant que les conditions initiales sont nulles.

Question 18. Compléter le schéma bloc ci-dessous (**figure 10**) :

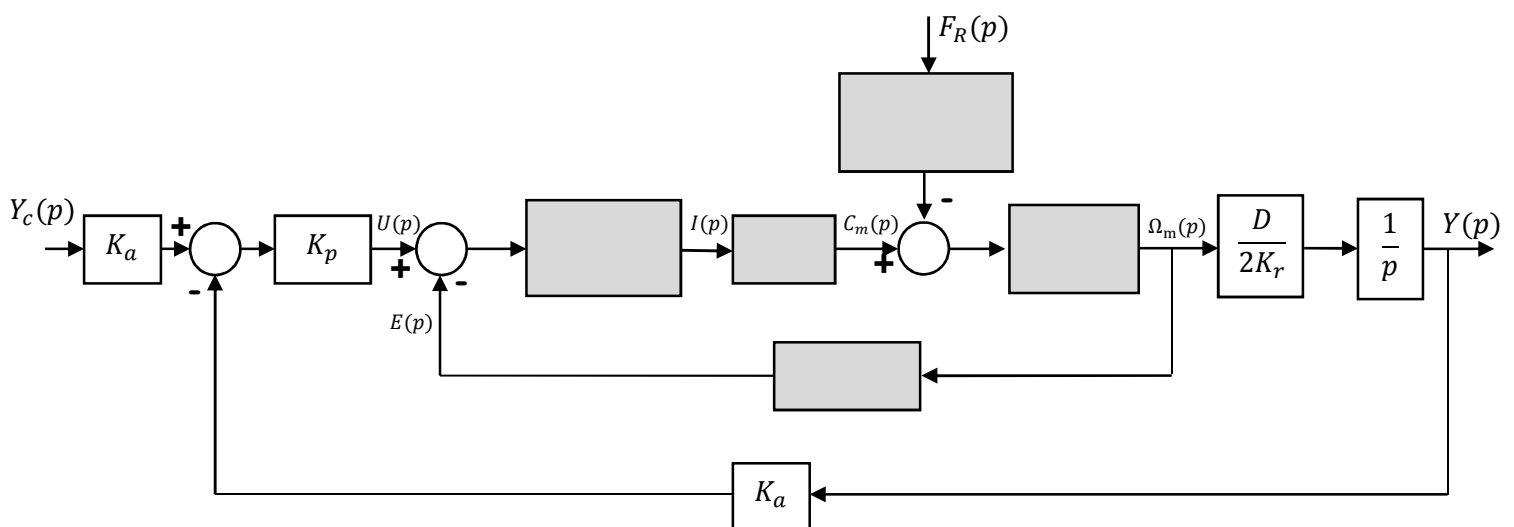


Figure 10 : Schéma bloc d'asservissement du déplacement horizontal

Question 19. Déterminer $H_1(p) = \frac{Y(p)}{Y_c(p)}$ pour $f_R(t) = 0N$ ($F_R(p) = 0$)

Tournez la page S.V.P

Question 20. Mettre $H_1(p)$ sous la forme canonique d'un système de second ordre $\frac{K_S}{1 + \frac{2m}{\omega_0}p + \frac{p^2}{\omega_0^2}}$. Donner alors

les expressions du gain statique K_S , du coefficient d'amortissement m et de la pulsation propre non amortie ω_0 en fonction des données du problème ($K_r, D, R, K_a, K_e, K_t, J_{eq}, \eta$ et K_p).

Question 21. Déterminer, en fonction de ($K_r, D, R, K_a, K_e, K_t, J_{eq}$ et η), l'expression de K_p permettant d'avoir la réponse la plus rapide sans avoir de dépassement.

Question 22. Sachant que le rendement du réducteur est $\eta = 0,5$, déterminer, à partir du diagramme donné par la **figure 11**, la valeur du correcteur proportionnel K_p permettant d'avoir un coefficient d'amortissement $m = 1$.

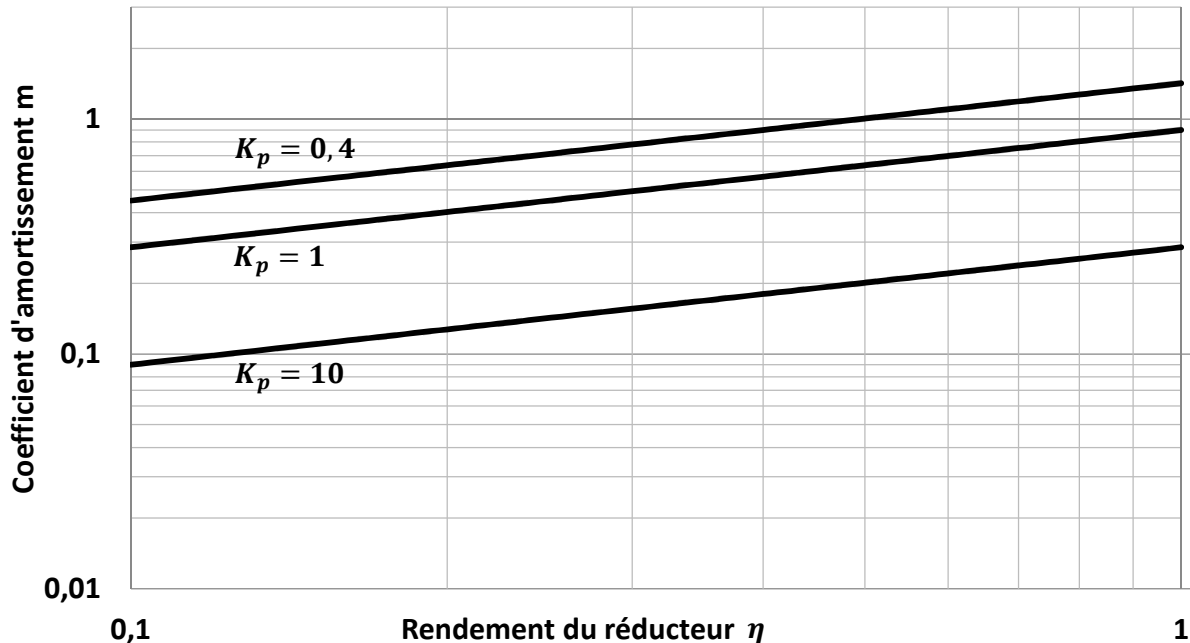


Figure 11 : Evolution du coefficient d'amortissement m en fonction du rendement du réducteur pour différentes valeurs du correcteur proportionnel.

Dans la suite du problème, l'effort due au frottement est négligé ($f_R(t) = 0N$). Le schéma bloc d'asservissement de la position horizontale de la passerelle est donné par la figure suivante (**figure 12**) :

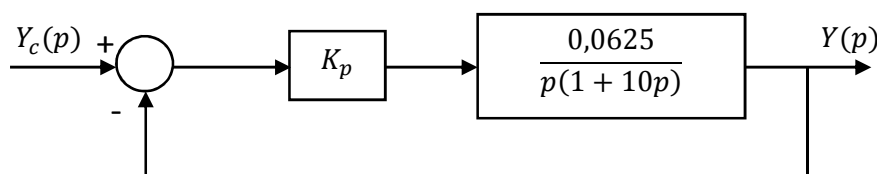


Figure 12 : Schéma bloc d'asservissement

Question 23. Déterminer la fonction de transfert en boucle fermée $FTBF(p)$ et étudier la stabilité en fonction de K_p .

La **figure 13** correspond à la réponse temporelle du système de déplacement horizontal pour une consigne de position $y_c(t) = 40m$.

Question 24. Déterminer le temps de réponse à 5% ($t_{r5\%}$) et l'erreur de position. Conclure quant aux critères de rapidité et de précision imposés par le cahier des charges.

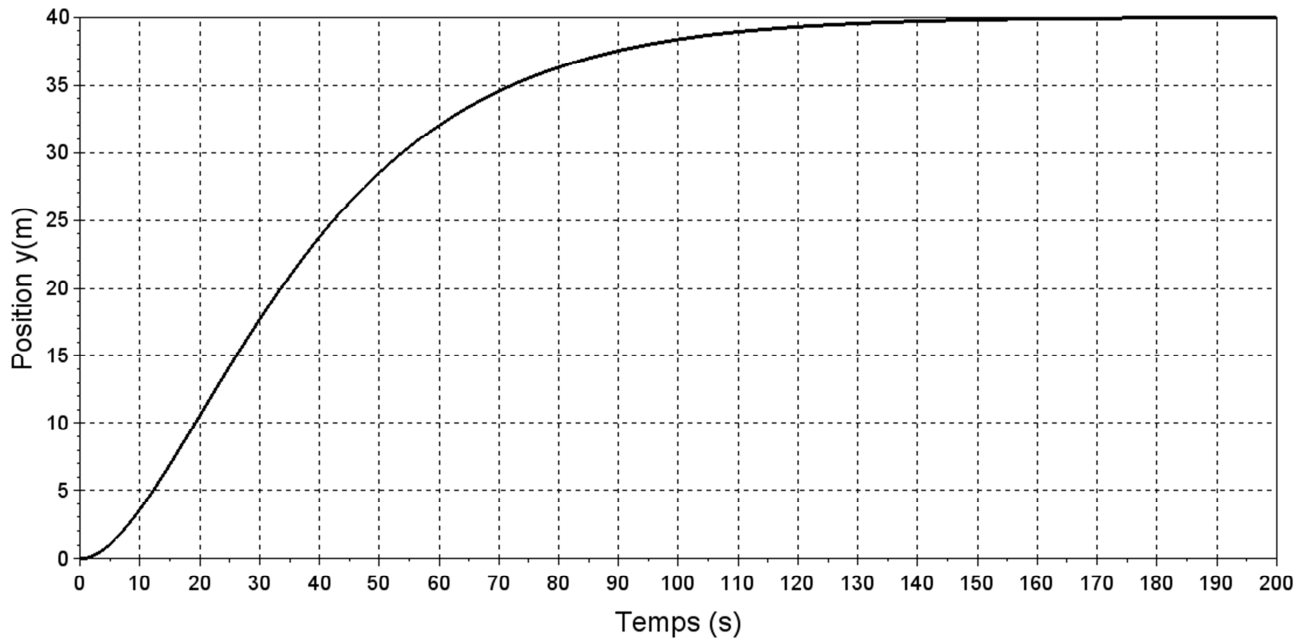


Figure 13 : Réponse temporelle du système de déplacement horizontal de la passerelle pour une consigne $y_c(t) = 40m$ et pour $K_p = 0,4$

La figure 14 correspond au diagramme de Bode de la fonction de transfert en boucle ouverte $FTBO(p)$.

Question 25. Représenter sur la courbe la marge de phase. Conclure quant au critère de stabilité imposé par le cahier des charges.

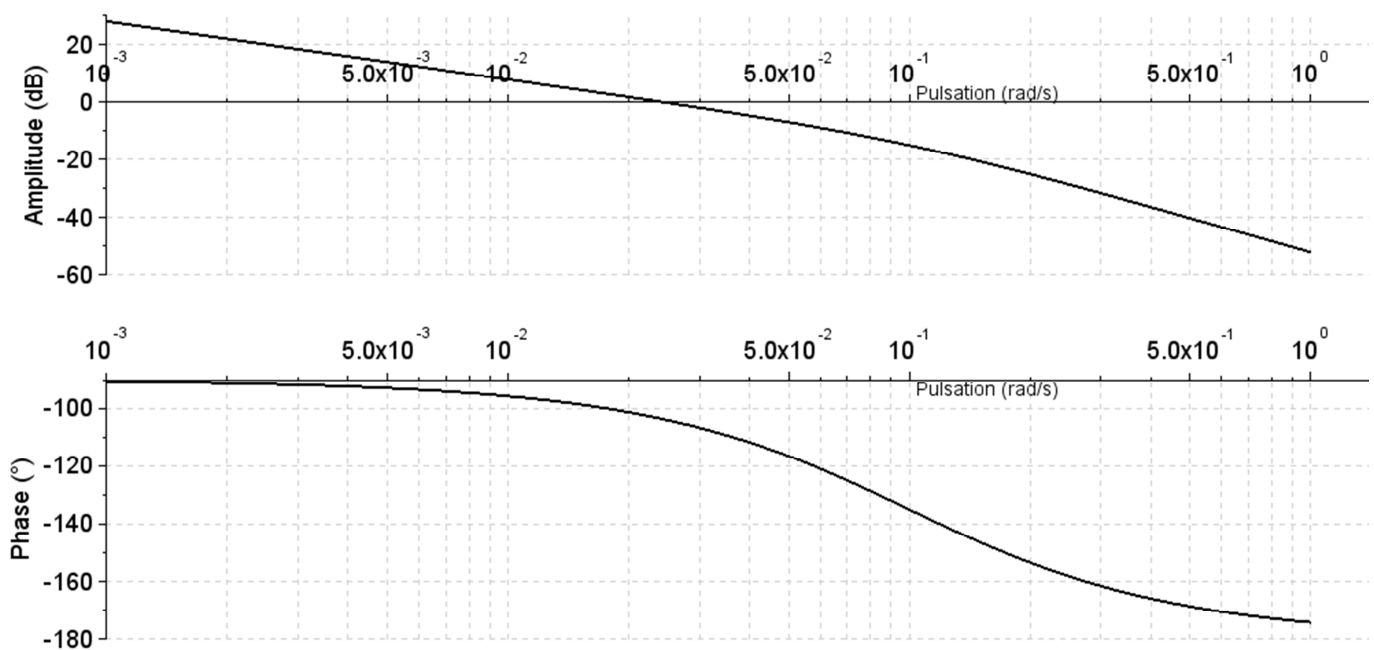


Figure 14 : Diagramme de bode de la fonction de transfert en boucle ouverte pour $K_p = 0,4$

*** FIN ***