



Proposition de corrigé

Concours : Concours Commun Mines-Ponts

Année : 2011

Filière : PSI

Épreuve : Sciences Industrielles pour l'Ingénieur

Ceci est une proposition de corrigé des concours de CPGE, réalisée bénévolement par des enseignants de Sciences Industrielles de l'Ingénieur et d'Informatique, membres de l'[UPSTI](http://www.upsti.fr) (Union des Professeurs de Sciences et Techniques Industrielles), et publiée sur le site de l'association :

<https://www.upsti.fr/espace-etudiants/annales-de-concours>

A l'attention des étudiants

Ce document vous apportera des éléments de corrections pour le sujet traité, mais n'est ni un corrigé officiel du concours, ni un corrigé détaillé ou exhaustif de l'épreuve en question.

L'UPSTI ne répondra pas directement aux questions que peuvent soulever ces corrigés : nous vous invitons à vous rapprocher de vos enseignants si vous souhaitez des compléments d'information, et à vous adresser à eux pour nous faire remonter vos éventuelles remarques.

Licence et Copyright

Toute représentation ou reproduction (même partielle) de ce document faite sans l'accord de l'UPSTI est **interdite**. Seuls le téléchargement et la copie privée à usage personnel sont autorisés (protection au titre des [droits d'auteur](#)).

En cas de doute, n'hésitez pas à nous contacter à : corrigesconcours@upsti.fr.

Informez-vous !

Retrouvez plus d'information sur les [Sciences de l'Ingénieur](#), l'[orientation](#), les [Grandes Ecoles](#) ainsi que sur les [Olympiades de Sciences de l'Ingénieur](#) et sur les [Sciences de l'Ingénieur au Féminin](#) sur notre site : www.upsti.fr

L'équipe UPSTI

ETUDE D'UN PROCÉDE ROBOTISE DE DEPOSE DE COMPOSITE EN FIBRES DE CARBONE

Question n°1

FT3 : Robot 6 axes FT44 : Lampe infrarouge FT45 : Rouleau d'application
 FT46 : lames perpendiculaires au sens de défilement FT5 : Magasin cantre & Multi winch

Question n°2

Pour le segment de bande dessiné sur la figure 2.1 :

- la longueur initiale (longueur extérieure par hypothèse) de la bande vaut $l = R \cdot \theta$ (avec θ) en radian) ;
- la longueur intérieure vaut $l_{int} = (R - e) \cdot \theta$

Nous avons donc : $\frac{\Delta l}{l} = \frac{l_{int} - l}{l} = \frac{-e}{R}$ Il est normal de trouver une valeur négative car la partie de bande qui va plisser est comprimée.

Mais en regardant la figure de la feuille réponse, je pense que les correcteurs attendaient une autre réponse : $\frac{\Delta l}{l} = \frac{l - l_{int}}{l} = \frac{e}{R}$.

Question n°3

Largeur e	5 mm	10 mm	25 mm	50 mm	150 mm
Rayon de Steering R	1 m	3 m	11 m	27 m	110 m
Taux de déformation dans la fibre	$5 \cdot 10^{-3}$	$3,33 \cdot 10^{-3}$	$2,27 \cdot 10^{-3}$	$1,85 \cdot 10^{-3}$	$1,36 \cdot 10^{-3}$

La courbe dessinée est conforme à nos calculs :

- le taux de déformation admissible par la bande diminue lorsque la largeur de la bande augmente,
- les valeurs de la courbe correspondent à celles calculées,
- la courbe semble être en $(1/X)$.
- si l'on peut déposer une fibre sur une courbe de faible rayon, il faudra que la bande soit très étroite.

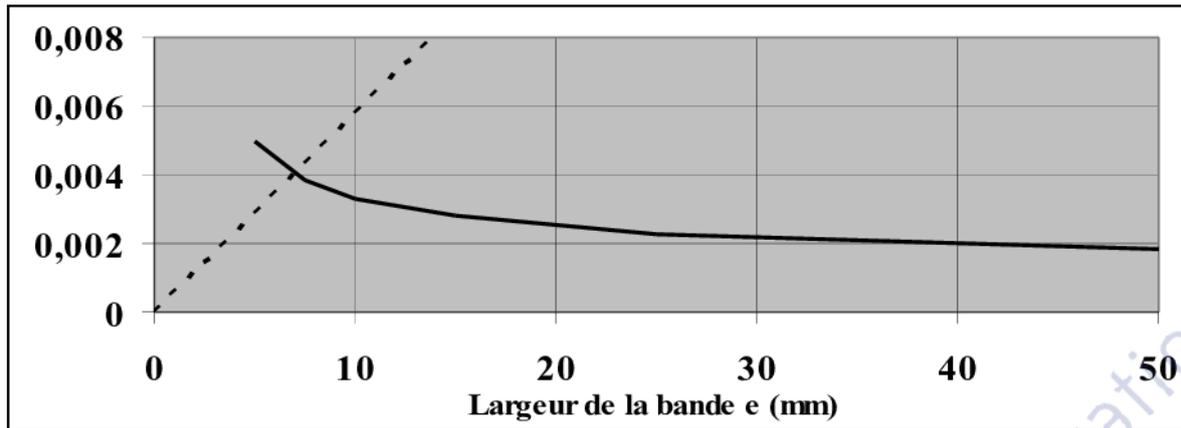
Question n°4

En reprenant l'hypothèse que la fibre extérieure ne subit pas de déformation (allongement nul) :

- la longueur de la bande déposée est de $l = \pi \cdot D_{ext}$
- la longueur du cotée intérieur est de $l = \pi \cdot D_{int} = \pi \cdot (D_{ext} - 2 \cdot \text{tg}(\alpha) \cdot e)$

La déformation vaut : $\frac{\Delta l}{l} = \frac{2 \cdot e \cdot \text{tg}(\alpha)}{D_{ext}}$

On en déduit donc $e = \frac{\Delta l}{l} \cdot \frac{D_{ext}}{2 \cdot \text{tg}(\alpha)}$ A.N. : $e = \frac{\Delta l}{l} \cdot \frac{2}{2 \cdot \text{tg}(30)} = \frac{\Delta l}{l} \cdot \sqrt{3}$



Le point d'intersection entre les deux courbes indique la valeur maximale de la bande. **On trouve une largeur maximale d'environ 7 mm ($e_{\max} = 7$ mm).**

Question n°5

a) Les inconnues cinématiques de ce problème sont au nombre de :

$$I_c = 2 * 1 + 2 * 1 + 2 + 4 = 10$$

(2 pivots, 2 glissières, 1 pivot glissant et une linéaire rectiligne)

b) la mobilité utile du mécanisme est de (1), et si on considère qu'il peut y avoir glissement au point de contact (I) entre le rouleau et le moule, il y a une mobilité interne ($m_i = 1$). La mobilité du mécanisme est donc de : $m_c = 2$

Le graphe de liaison comporte deux boucles cinématiques indépendantes : $v = 2$

Le degré d'hyperstaticité peut se calculer par la relation : $h = 6.v + m_c - I_c$

$$h = 6.2 + 2 - 10 ; h = 4$$

Question n°6

Si la surface est quelconque, il ne peut y avoir contact sur toute la largeur du rouleau d'application (si la surface de celui est rigide, et si le moule est rigide, il peut n'y avoir qu'un seul point de contact). Avec un rouleau en matière déformable, l'effort presseur provoquera la déformation du rouleau au contact en épousant la forme du moule et il sera peut-être possible d'assurer le contact de toute la bande qui doit être déposée sur le moule.

Que le rouleau soit déformable ou non, il faudrait libérer la rotation du rouleau selon l'axe (A, \vec{x}) si la normale au point de contact (I) n'est plus selon (\vec{y}) , on peut utiliser entre (1) et (2) une rotule à doigt de centre (A), axe du doigt (A, \vec{z}) et de normale (\vec{x}) .

Question n°7

L'effort dans la bande de carbone, du côté des bobines, peut être de 4 N, alors que l'effort dans la bande de carbone, du côté de la tête (pour la dépose) ne peut dépasser 0,4 N.

Il faut donc que (T_1) soit du côté tête et que (T_2) soit du côté bobine.

Question n°8

Il y a 7 rouleaux moteurs et deux poulies de renvoie montées folles.

L'angle d'enroulement sur les rouleaux moteurs est de : $\alpha = \frac{(6 * 90 + 45) * \pi}{180}$; $\alpha = 10,21 \text{ rad}$

Avec $T_2 = 4 \text{ N}$, on en déduit que T_1 (tension de placement de la fibre) vaut :

$$T_1 = \frac{T_2}{e^{f \cdot \alpha}} ; T_1 = \frac{4}{e^{(0,32 \cdot 10,21)}} = 0,15 \text{ N}$$

Le cahier des charges est respecté.

Le cahier des charges est respecté si il n'y a pas d'accélération trop brutale entre le point de dépose de la bande et le multiwinch. Le multiwinch limite l'effort à 0,15 N à son niveau, mais après on ne sait pas. Les fibres sont guidées dans une gaine de protection, elles peuvent être légèrement étirées et le critère de 0,4 N pourrait être dépassé.

Avec des efforts aussi faibles, le fait de négliger les actions de pesanteur peut certainement être remis en cause.

L'accélération centripète va certainement modifier la relation car l'effort normal au contact va changer.

Question n°9

En écrivant les différents roulements sans glissement entre les différentes roues dentées, nous obtenons :

$$\frac{\omega_{1/4}}{\omega_{2/4}} = - \frac{Z_2}{Z_1} \text{ et } \frac{\omega_{2/4}}{\omega_{3/4}} = + \frac{Z_3}{Z_2}$$

Ce qui donne

$$\frac{\omega_{1/4}}{\omega_{3/4}} = - \frac{Z_3}{Z_1} = \frac{\omega_{1/3} + \omega_{3/4}}{\omega_{3/4}} = 1 - \frac{\omega_{1/3}}{\omega_{4/3}}$$

$$\frac{\omega_{4/3}}{\omega_{1/3}} = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_3} = R_1 \quad \text{A. N. : } \frac{\omega_{4/3}}{\omega_{1/3}} = R_1 = 0,177$$

Le système est composé de (n) étages de réduction identiques. Le rapport global est donc $R_g = R_1^n$.

Pour avoir un rapport de 0,03, il faut deux trains épicycloïdaux $R_1^2 = 0,0313$. Ce rapport de réduction est voisin de celui mentionné dans le sujet (0,03).

Question n°10

Calculons l'énergie cinétique galiléenne du système :

$\Sigma = \text{moteur} + \text{réducteur} + \text{poulies} + \text{multiwinch}$.

$$Ec_{\Gamma/0} = \frac{1}{2} \cdot (J_m \cdot \omega_m^2 + J_{\text{réd}} \cdot \omega_m^2 + 2 \cdot J_p \cdot \omega_r^2 + 7 \cdot J_R \cdot \omega_w^2) = \frac{1}{2} \cdot J_{\text{eq}} \cdot \omega_m^2$$

$$J_{\text{eq}} \cdot \omega_m^2 = (J_m + J_{\text{réd}} + 2 \cdot J_p \cdot R_g^2 + 7 \cdot J_R \cdot R_g^2) \cdot \omega_m^2$$

$$J_{\text{eq}} = J_m + J_{\text{réd}} + (2 \cdot J_p + 7 \cdot J_R) \cdot R_g^2$$

A.N. : $J_{\text{eq}} = 2 \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 10^{-4} + (2 \cdot 1 \cdot 10^{-3} + 7 \cdot 5 \cdot 10^{-4}) \cdot 0,03^2$ $J_{\text{eq}} = 3,05 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m}^2$

Question n°11

$$(U(p) - K \cdot \Omega_m(p)) \cdot \frac{K}{(R + L \cdot p) \cdot (a + J_{\text{eq}} \cdot p)} = \Omega_m(p)$$

$$U(p) \cdot \frac{K}{(R + L \cdot p) \cdot (a + J_{\text{eq}} \cdot p)} = \Omega_m(p) \cdot \left(1 + \frac{K^2}{(R + L \cdot p) \cdot (a + J_{\text{eq}} \cdot p)} \right)$$

$$M(p) = \frac{\Omega_m(p)}{U(p)} = \frac{K}{K^2 + (R + L \cdot p) \cdot (a + J_{\text{eq}} \cdot p)}$$

$$M(p) = \frac{\Omega_m(p)}{U(p)} = \frac{\frac{K}{K^2 + R \cdot a}}{1 + \frac{L \cdot a + J_{\text{eq}} \cdot R}{K^2 + R \cdot a} \cdot p + \frac{L \cdot J_{\text{eq}}}{K^2 + R \cdot a} \cdot p^2}$$

$$M(p) = \frac{\Omega_m(p)}{U(p)} = \frac{3,77}{1 + 1,31 \cdot 10^{-2} \cdot p + 1,75 \cdot 10^{-5} \cdot p^2}$$

Le discriminant du dénominateur est positif, il existe donc deux racines réelles différentes. La fonction de transfert peut s'écrire sous la forme :

$$M(p) = \frac{\Omega_m(p)}{U(p)} = \frac{K_m}{(1 + T_e \cdot p) \cdot (1 + T_m \cdot p)}$$

Avec : $K_m = \frac{K}{K^2 + R \cdot a}$ A. N. : $K_m = \frac{0,22}{0,22^2 + 2,5 \cdot 4 \cdot 10^{-3}} = 3,77 \text{ rad.s}^{-1}/V$

Le dénominateur peut s'écrire :

$$1 + 1,31 \cdot 10^{-2} \cdot p + 1,75 \cdot 10^{-5} \cdot p^2 = (1 + 1,15 \cdot 10^{-2} \cdot p) \cdot (1 + 1,51 \cdot 10^{-3} \cdot p)$$

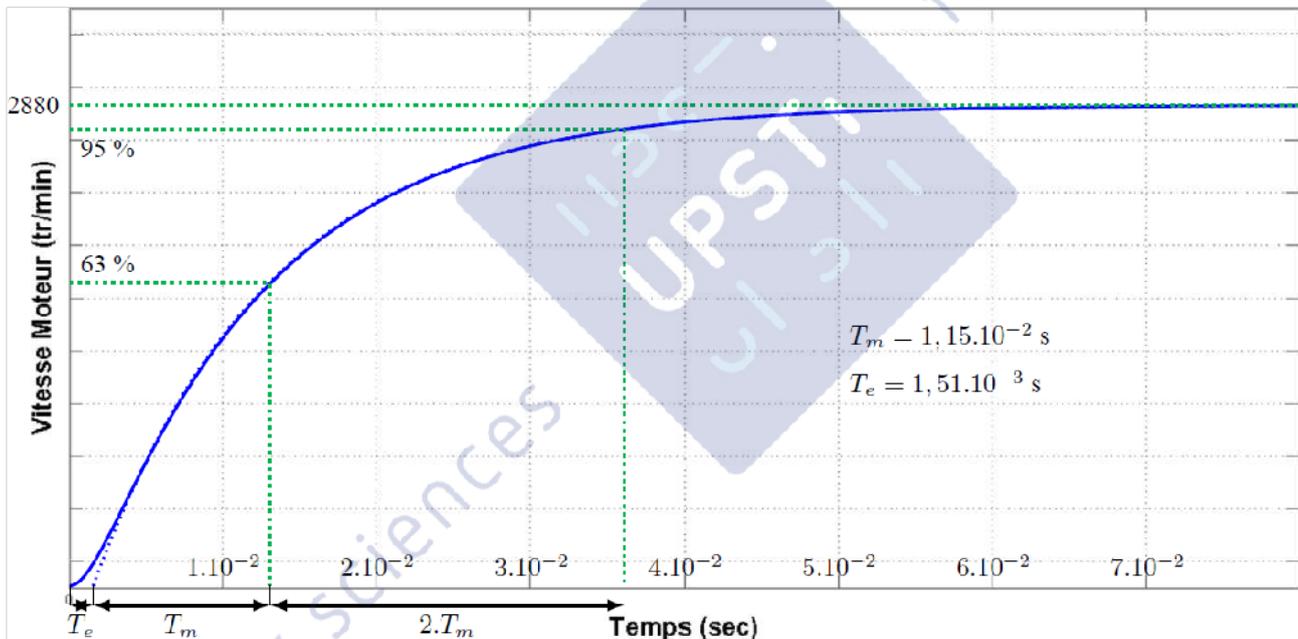
Nous avons donc : $T_e = 1,51 \cdot 10^{-3} \text{ s}$ et $T_m = 1,15 \cdot 10^{-2} \text{ s}$

Question n°12

En constatant que ($T_e \ll T_m$), on peut approximer le tracé de la réponse indicielle de $(M(p))$ par celui de la fonction $M'(p) = \frac{K_m}{(1 + T_m \cdot p)}$. Mais il faudra tout de même dessiner une tangente horizontale car $(M(p))$ est une fonction du deuxième ordre. Si on veut encore affiner le tracé, il est possible d'introduire un « décalage à l'origine » de T_e seconde.

On peut mentionner ;

- la valeur asymptotique : $K_m \cdot U_0 = 80 \cdot 3,77 = 301,6 \text{ rad.s}^{-1}$ $K_m \cdot U_0 = 2880 \text{ tr/min}$
- 63 % de la valeur finale pour ($t = T_m + T_e$)
- 95 % de la valeur finale pour ($t = 3.T_m + T_e$)
- décalage de T_e à l'origine



Question n°13

$$I(p) = \frac{\Omega_m(p)}{K} \Rightarrow I(p) = M(p) \cdot U(p) \cdot \frac{a + J_{eq} \cdot p}{K}$$

$$G(p) = \frac{I(p)}{U(p)} = \frac{K_m}{(1 + T_e \cdot p) \cdot (1 + T_m \cdot p)} \cdot \frac{a + J_{eq} \cdot p}{K}$$

$$G(p) = \frac{I(p)}{U(p)} = \frac{\frac{K_m \cdot a}{K} \cdot \left(1 + \frac{J_{eq}}{a} \cdot p\right)}{(1 + T_e \cdot p) \cdot (1 + T_m \cdot p)} = \frac{a}{K^2 + R \cdot a} \cdot \left(1 + \frac{J_{eq}}{a} \cdot p\right)$$

$G(p)$ est bien de la forme :

$$G(p) = \frac{K_G \cdot (1 + T_G \cdot p)}{(1 + T_e \cdot p) \cdot (1 + T_m \cdot p)} \quad \text{avec} \quad K_G = \frac{K_m \cdot a}{K} = \frac{a}{K^2 + R \cdot a} \quad \text{et} \quad T_G = \frac{J_{eq}}{a}$$

A.N. : $K_G = \frac{3,77 \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{0,22} = 6,8 \cdot 10^{-2} \text{ A} \cdot \text{V}^{-1}$; $T_G = \frac{3 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 10^{-3}} = \frac{3 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 10^{-3}} = 7,5 \cdot 10^{-2} \text{ s}$

Question n°14

Au démarrage du moteur, il existe un pic de courant dont l'amplitude est importante (25 A) et supérieure à l'intensité maximale que peut supporter le moteur (20 A) (tableau page 9).

Ce pic d'intensité est normale, car au début, la sortie du comparateur est de 80 V (la vitesse de rotation du moteur est nulle) et comme le système électrique est très rapide par rapport au système mécanique, l'intensité monte très rapidement (en valeur asymptotique, elle serait de: $\frac{80}{2,5} = 32 \text{ A}$).

Question n°15

$$H_{IBO}(p) = C_I(p) \cdot h \cdot G(p) = K_I \cdot h \cdot \left(\frac{1 + T_I \cdot p}{T_I \cdot p} \right) \cdot \frac{K_G \cdot (1 + T_G \cdot p)}{(1 + T_e \cdot p) \cdot (1 + T_m \cdot p)}$$

$$H_{IBO}(p) = \frac{K_I \cdot K_G \cdot h}{T_I \cdot p} \cdot \frac{(1 + T_G \cdot p) \cdot (1 + T_I \cdot p)}{(1 + T_e \cdot p) \cdot (1 + T_m \cdot p)}$$

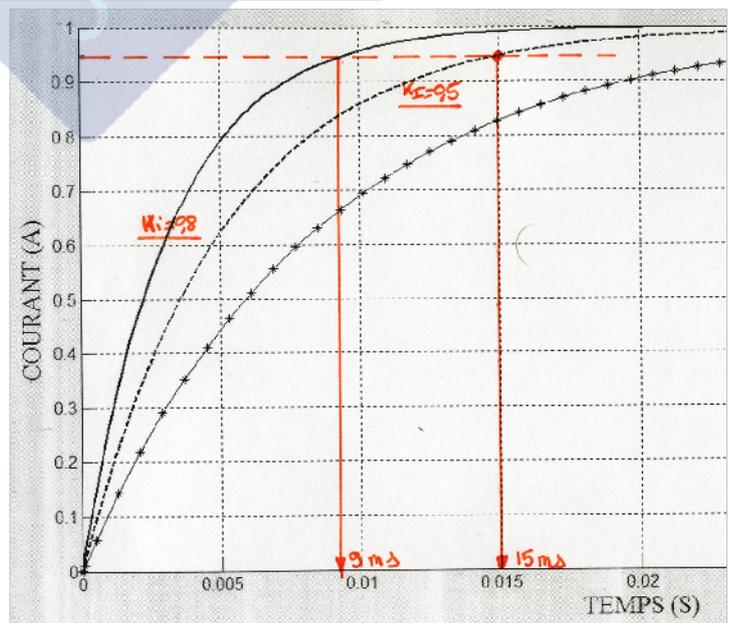
Question n°16

En théorie, il est possible de compenser la constante de temps du moteur en choisissant :

$$T_I = T_e = 1,51 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

La fonction de transfert en boucle ouverte devient donc :

$$H_{IBO}(p) = \frac{K_I \cdot K_G \cdot h}{T_e \cdot p} \cdot \frac{1 + T_G \cdot p}{1 + T_m \cdot p}$$



Question n°17

Le temps de réponse à 5% est égale à 15 ms pour $K_I = 0,5$ et il est d'environ 9 ms pour $K_I = 0,8$. Ces deux valeurs sont acceptables pour le critère de temps de réponse. Il faut donc choisir un $K_I \geq 0,5$.

Le sujet demande de choisir un K_I . La valeur de $K_I = 0,5$ est retenue.

Le système en boucle fermée est assimilé à un système du 1^{er} ordre. Le temps de réponse à 5% est donc obtenu pour $t = 3 \cdot \tau$. Ceci nous conduit à : $T_{IBF} = 5 \text{ ms}$

Pour les trois courbes $K_{IBF} = 1$. Ceci est normal puisque la fonction de transfert en boucle ouverte possède un intégrateur dans la chaîne directe.

Question n°18

a) La fonction de transfert en boucle ouverte du nouveau système est :

$$H_{\Omega BOCor}(p) = C_{\Omega} \cdot H_{IBF}(p) \cdot \frac{K}{a + J_{eq} \cdot p} \cdot K_{\Omega}$$

$$H_{\Omega BOCor}(p) = K_{PI} \cdot \frac{1 + T_{PI} \cdot p}{T_{PI} \cdot p} \cdot \frac{K_{IBF}}{1 + T_{IBF} \cdot p} \cdot \frac{K}{a + J_{eq} \cdot p} \cdot K_{\Omega}$$

$$H_{\Omega BOCor}(p) = \frac{K_{PI} \cdot K_{IBF} \cdot K \cdot K_{\Omega}}{a \cdot T_{PI} \cdot p} \cdot \frac{1 + T_{PI} \cdot p}{(1 + T_{IBF} \cdot p) \cdot \left(1 + \frac{J_{eq}}{a} \cdot p\right)}$$

b) Cette fonction de transfert possède deux pôles réels non nuls : $p_1 = -\frac{1}{T_{IBF}} = -200 \text{ s}^{-1}$ et $p_2 = -\frac{a}{J_{eq}} = -13,33 \text{ s}^{-1}$. Le pôle dominant est donc $p_2 = -\frac{a}{J_{eq}}$.

En théorie, il est possible de faire disparaître ce pôle en choisissant :

$$T_{PI} = \frac{J_{eq}}{a}$$

c) la fonction de transfert, corrigée de cette façon, devient donc :

$$H^1_{\Omega BOCor}(p) = \frac{K_{PI} \cdot K_{IBF} \cdot K \cdot K_{\Omega}}{J_{eq}} \cdot \frac{1}{p \cdot (1 + T_{IBF} \cdot p)}$$

Il s'agit d'une fonction du 2eme ordre et de classe 1.

d) Le système est stable car la FTBO est du 2eme degré (à coefficients positifs), la phase est donc toujours supérieure à -180° . La marge de phase est donc positive et la marge de gain est infinie (car $\omega = -180^\circ$) n'existe pas.

Pour le cahier des charges, nous ne pouvons, à ce stade, que vérifier le critère de précision (le système est stable). Soit ε_S le signal de sortie du comparateur du schéma de la page 13 du sujet (ce que ne dit pas le sujet). Le système est de classe (1), l'entrée est un échelon, donc l'écart (sortie du comparateur) est nul. **Le cahier des charges est donc vérifié aussi pour le critère de précision.**

Question n°19

Sur le graphe de la feuille réponse, nous pouvons lire :

- marge de phase : 84°
- marge de gain : infinie (ou non définie) car ω_{-180° n'existe pas.

Question n°20

Pour avoir une marge de phase de 45° , il faut remonter la courbe de FTBO de 22 dB. En effet, le gain de $H_{\Omega BFCor}^1(j.\omega)$ est de -22 dB (lecture graphique) lorsque la phase est à -135° .

Si l'on veut remonter la courbe de 22 dB, il faut vérifier : $20 \cdot \log(K_{PI}) = 22$ soit $K_{PI} = 10^{\frac{22}{20}}$. Ceci est une valeur maximale. $K_{PI} \leq 12,58$.

Question n°21

Pour mesure l'écart statique (sortie du comparateur) sur la courbe, il faut calculer la tension stabilisée envoyée par la chaîne de retour : Tension de retour stabilisée = $\omega_{m\text{ stabilisée}} \cdot K_{\Omega}$.

Tension de retour stabilisée = $\frac{3000 \cdot 2 \cdot \pi}{60} \cdot 0,0318 = 9,990 \text{ V}$. Il y aurait donc une erreur de 0,01 V.

Cette valeur dépend de la qualité de la lecture de la valeur asymptotique. ϵ_s devrait être nulle car la FTBO possède un intégrateur dans la chaîne directe. Il faudrait lire 3003 tr/min pour trouver $\epsilon_s = 0$

Par calcul (résultat de cours), et non par mesure, nous obtenons : $\epsilon_s = 0$.

En mesurant le temps de réponse à 5% sur le graphe, nous relevons un temps de 52 ms. Ce qui est légèrement supérieur au cahier des charges (sur ce critère).

Pour conclure. Les marges de stabilité sont respectées, l'erreur statique est respectée, le critère ne temps de réponse n'est pas respectée, mais nous n'en sommes pas très loin.

Question n°22

a) On isole (3) + un bout de fibre. Les actions mécaniques sont les tensions dans la fibre, et le torseur des actions transmissibles dans la liaison pivot entre (2) et (3) le poids de (3).

Les effets dynamiques sur la pièce (3) sont négligés (hypothèse du texte) et la liaison pivot est parfaite, l'action du poids passe par (A).

Le théorème du moment dynamique en (A) en projection sur (\vec{Z}_0) donne :

$0 = 0 - F_{t5} \cdot R_3 + F_{t4} \cdot R_3 \Rightarrow F_{t5} = F_{t4} = F_{t\text{pose}}$ La tension est la même dans le brun qui va vers la poulie (5) que dans le brun qui va vers la poulie (4).

b) On isole (2) + (3) + un bout de fibre. Les actions mécaniques sont les tensions dans la fibre, le torseur des actions transmissibles dans la liaison pivot entre (0) et (2), le poids de (2+3) et l'effort du ressort.

Les effets dynamiques sur les pièces (2+3) sont négligés (hypothèse du texte) et la liaison pivot est parfaite.

Le théorème du moment dynamique en (O_2) en projection sur (\vec{Z}_0) donne :

$$0 = 0 - Ft_{pose} \cdot (R_3 - a) - Ft_{pose} \cdot (-R_3 - a) - x_G \cdot m_{2+3} \cdot g + F_r \cdot b$$

$$Ft_{pose} = \frac{F_r \cdot b - x_G \cdot m_{2+3} \cdot g - F_r \cdot b}{-2 \cdot a}$$

A. N. : $Ft_{pose} = \frac{10 \cdot (-0,06) - (-0,1) \cdot 1,2 \cdot 9,81}{-2 \cdot (-0,15)}$; $Ft_{pose} = 1,92 \text{ N}$

Si le régime est permanent, la pièce (2) ne change pas d'orientation, la pièce (3) tourne toujours à la même vitesse par rapport à (2). **La tension reste donc la même.**

Question n°23

a) Si la fibre en contact avec le rouleau (1) est soumise à une accélération, le rouleau (1) va subir une accélération angulaire.

Isolons (1) + la fibre qui est enroulée dessus. Les actions mécaniques appliquées sont : le poids de (1) qui passe par (O_1) , l'action (Ft_{acc}) de la fibre que l'on a coupée et les actions transmissibles dans la liaison pivot entre (0) et (1). On supposera que la liaison est parfaite.

Théorème du moment dynamique en (0) en projection sur (\vec{Z}_0) :

Le centre d'inertie de (1) étant un point fixe (O) par rapport à (0), l'équation est simple.

$$I_1 \cdot \frac{d\omega_{1/0}}{dt} = 0 + 0 - Ft_{acc} \cdot R_1$$

L'accélération de la fibre fixe l'accélération angulaire de (1) : $\Gamma = R_1 \cdot \frac{d\omega_{1/0}}{dt}$

Nous obtenons donc : $I_1 \cdot \frac{\Gamma}{R_1} = Ft_{acc} \cdot R_1 \Rightarrow Ft_{acc} = I_1 \cdot \frac{\Gamma}{R_1^2}$

A. N. : $Ft_{acc} = 0,0135 \cdot \frac{1}{0,082^2} = 2,0 \text{ N}$

b) en fonctionnement normal, les des efforts peuvent s'additionner, l'effort maximal dans la fibre peut donc être de 3,92 N. Cet effort respecte le cahier des charges.

c) lors de la rupture de la fibre cet effort devient nul à l'endroit de la rupture, et elle devient plus faible, qu'au moment de la rupture, dans le reste de la fibre (côté vers la pose et côté vers le rouleau 1)