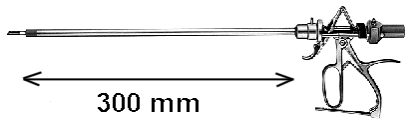


ROBOT POUR LA CHIRURGIE ENDOSCOPIQUE

I LA CHIRURGIE ENDOSCOPIQUE

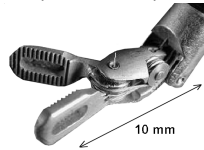


Il s'agit d'utiliser des outils chirurgicaux de très petite taille, placés à l'extrémité de tiges tubulaires tenues par le chirurgien ; la partie inférieure des tiges est insérée dans la zone à traiter, à travers trois petits orifices réalisés dans le corps du patient. Ces outils chirurgicaux sont actionnés par un système de câbles fins qui passent

à l'intérieur des tiges tubulaires et sont commandés par le chirurgien à l'aide de leviers placés sur la partie supérieure des tiges. Dans la suite du sujet, l'ensemble "outil chirurgical + tige + leviers de commande" sera nommé plus simplement "Instrument chirurgical". Les instruments sont en général au nombre de trois : une pince, un scalpel et un support de caméra miniature (instrument "endoscope") qui permet au chirurgien de visualiser la zone de travail à l'intérieur du corps du patient.

Le robot objet de cette étude est un prototype démonstrateur de la faisabilité des concepts.

Le sujet proposé reprend certaines des démarches des ingénieurs qui ont développé le prototype de robot appelé "Endoxirob" ou "robot pour la chirurgie endoscopique".



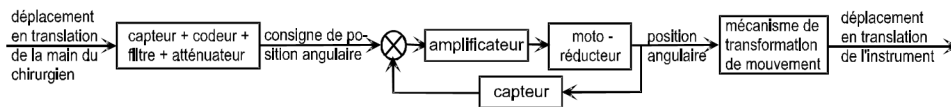
II RESPECT DES CRITERES ASSOCIES A "FS 3"

L'étude menée dans cette partie consiste à valider le choix des composants du robot qui permettent de respecter les niveaux des critères associés à la fonction de service FS3 "Permettre à l'instrument chirurgical de se mouvoir avec des performances dynamiques comparables ou meilleures que celles réalisées par un chirurgien humain" ; L'étude est effectuée uniquement pour l'axe « d'élévation » selon Z_1 .

Critères associés à la fonction FS 3 :	Niveaux
Vitesse de translation nominale :	> 0,1 m/s
Temps t_1 pour atteindre la vitesse nominale :	100 millisecondes maximum
Performances de l'asservissement :	
Précision :	Ecart statique < 0,2 mm. Retard de traînage < 0.1s pour une entrée rampe de 0,1 m/s.
Stabilité :	Marge de phase = 45° ; pas de « dépassement » en réponse temporelle.
Rapidité :	Bande passante à -3 dB pour la partie mécanique : 4 Hertz.

II.1 Description de la chaîne fonctionnelle de positionnement en translation.

Schéma-blocs

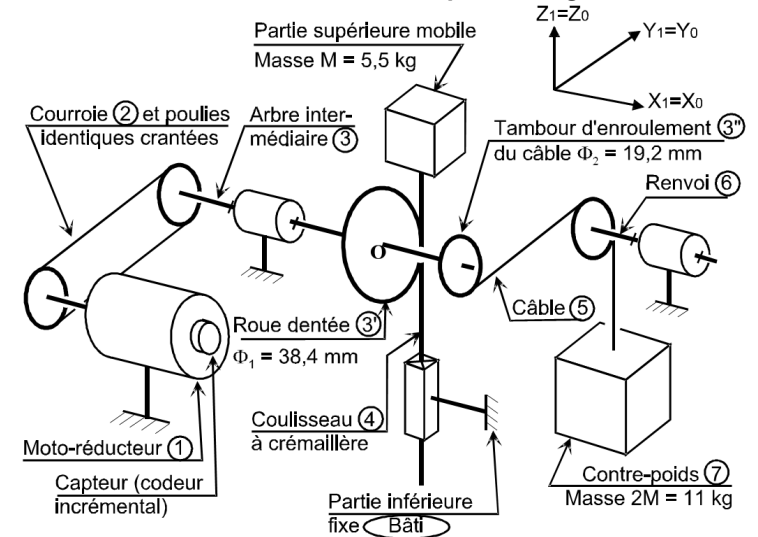


La figure précédente présente le schéma-bloc de l'axe d'élévation (selon Z_1) du dispositif de commande de l'instrument chirurgical :

- La console permet de capter le déplacement de la main, de le coder, de le corriger éventuellement afin d'élaborer la consigne de position angulaire du rotor moteur.

- La position angulaire est ensuite transformée en position linéaire de l'instrument par un mécanisme de transformation de mouvement à crémaillère.

II.2 Etude de la boucle d'asservissement de la position angulaire du moteur



II.2.1 Evaluation de la fonction de transfert du moto-réducteur

Le constructeur donne les caractéristiques électro-mécaniques exprimées à la sortie du réducteur.

On rappelle les équations temporelles :

$$u(t) = R.i(t) + L.d i(t) / dt + e(t) ; \quad e(t) = k_e.\omega_{red}(t)$$

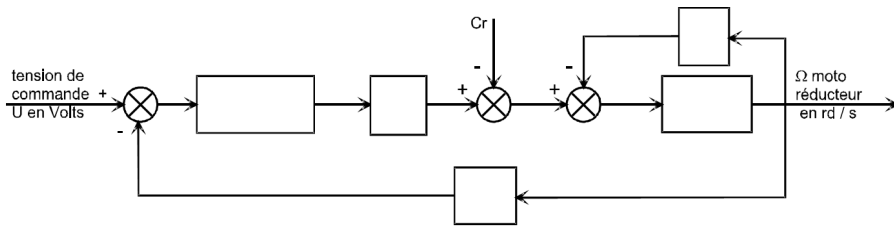
$$C_{red}(t) = k_c.i(t) ; \quad C_{red}(t) - C_r - f_v . \omega_{red}(t) = J_{equ} . d \omega_{red}(t) / dt$$

Avec :

$u(t)$ tension appliquée aux bornes de l'induit	$i(t)$ intensité du courant traversant l'induit
$\omega_{red}(t)$ vitesse de rotation à la sortie du réducteur	$e(t)$ force électromotrice induite par la rotation du moteur, évaluée à la sortie du réducteur
$C_{red}(t)$ couple moteur ramené à la sortie du réducteur	$L = 2,2$ mH inductance de l'induit
$R = 10 \Omega$ résistance de l'induit	$k_c = 2,1$ N.m/A constante de couple évaluée à la sortie du réducteur
$k_e = 2,1$ V.s/rad constante de f.e.m évaluée à la sortie du réducteur	$C_r = 0,2$ N.m couple résistant induit par les frottements secs, ramené à la sortie du réducteur
$J_{equ} = 7 \times 10^{-3}$ kg.m ² moment d'inertie équivalent à toutes les pièces en mouvement, ramené à la sortie du réducteur.	$f_v = 0,04$ Nm.s / rd coefficient de frottement visqueux équivalent à toutes les pièces en mouvement, ramené à la sortie du réducteur

Les transformées de Laplace des fonctions $u(t)$, $i(t)$, $e(t)$, $\omega_{red}(t)$, $C_{red}(t)$ sont respectivement $U(p)$, $I(p)$, $E(p)$, $\Omega_{red}(p)$ et $C_{red}(p)$. On considère toutes les conditions initiales nulles.

- Q1/ Transformer les équations temporelles ci-dessus. Remplir sous forme littérale les blocs du schéma suivant. Exprimer les grandeurs physiques entre chaque bloc.



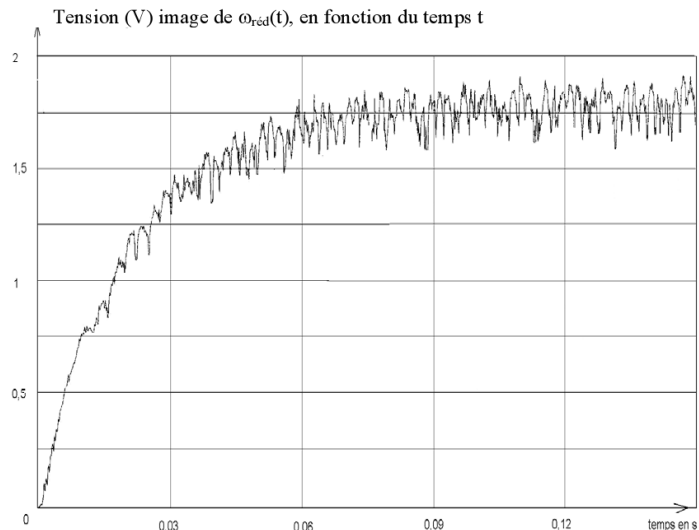
Q2/ Exprimer littéralement sous forme canonique la fonction de transfert du moto-réducteur

$$M(p) = \frac{\Omega_{red}(p)}{U(p)}$$

Quel que soit le résultat obtenu à la question précédente, on utilisera l'expression de $M(p)$ suivante :

$$M_1(p) = \frac{0,436}{1 + 14,5 \cdot 10^{-3} \cdot p + 3,1 \cdot 10^{-6} \cdot p^2}$$

Sur le système de levage non asservi c'est à dire avec le capteur de position angulaire déconnecté, on a pratiqué, un essai en charge, en donnant au moteur un échelon de tension $u(t) = 24$ V. Avec une génératrice tachymétrique dont le gain est de $0,166$ V.s.rd⁻¹, on a tracé la courbe de tension image de $\omega_{red}(t)$.



Remarque : la partie supérieure du robot est supposée rigide pendant cet essai.

- Q3/ Après avoir analysé cette courbe, expliquer pourquoi on peut négliger l'inductance L.
 Q4/ Justifier analytiquement la réponse précédente à partir de l'expression de $M_1(p)$ lorsque l'on envisage une étude fréquentielle : on précisera la valeur du pôle dominant, l'autre (faisant intervenir la valeur de L) étant rejeté.

Dans la suite du problème, on néglige l'inductance L du moteur.

Q5/ Exprimer littéralement, sous forme canonique, la fonction de transfert du moto-réducteur

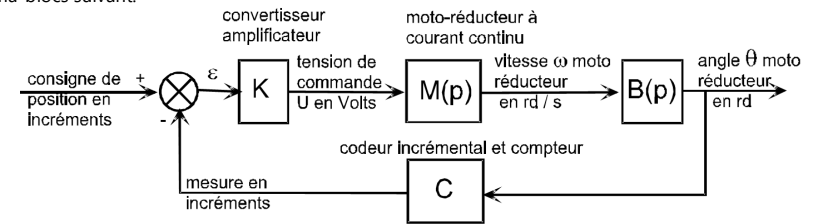
$$M_2(p) = \frac{\Omega_{red}(p)}{U(p)} = \frac{G_S}{1 + T \cdot p}$$

Donner les valeurs numériques de G_S et de T à partir de l'expression de $M_1(p)$ et des réponses apportées à la question précédente (3 chiffres significatifs sont attendus).

Q6/ Déterminer les valeurs de G_S et T , à partir de la courbe de tension image de $\omega_{red}(t)$ expliquer les démarches sous la figure et comparer avec les résultats de la question précédente).

II.2.2 Respect du critère de marge de phase

La boucle d'asservissement de la position angulaire de l'arbre de sortie du réducteur est définie par le schéma-blocs suivant.



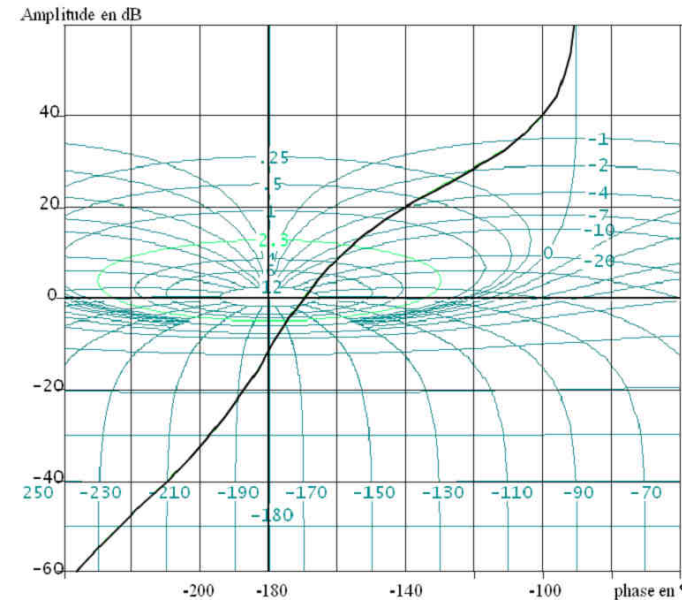
La consigne de position en incréments est élaborée par le calculateur, à partir des informations envoyées par la console. Le convertisseur-amplificateur K de gain k variable élabore la commande du moteur.

Données : Le codeur incrémental C placé sur le rotor du moteur a une résolution de 360 incréments par tour. Il est associé à un compteur - décompteur qui élabore la mesure de position en incréments. Le système est discret (non continu) mais on l'assimile à un système continu car le comptage est très rapide. Le réducteur a un rapport de réduction de 50.

Q7/ Donner la fonction de transfert du bloc $B(p)$ et la valeur du coefficient du bloc C en incr./rad. Exprimer numériquement, en fonction de k , la fonction de transfert en boucle ouverte $H_0(p)$.

Q8/ Tracer le diagramme de Bode du système en boucle ouverte pour $k = 1$. Le système est-il stable en boucle fermée pour cette valeur de k ?

On a tracé sur le diagramme de Black du système en boucle ouverte pour $k = 1$ lorsque la valeur de L n'est pas négligée.

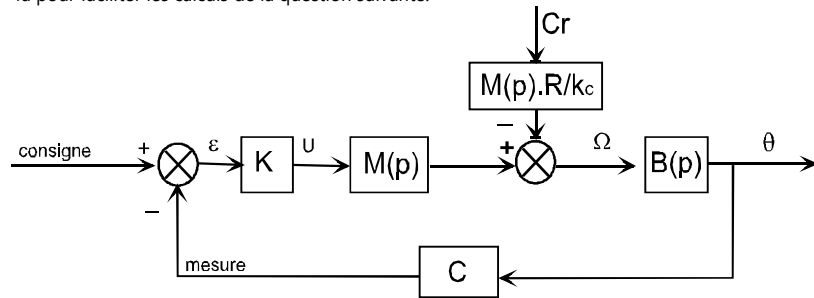


Q9/ Quelle est l'influence de la prise en compte de L sur la stabilité en boucle fermée ? L'hypothèse consistant à négliger L est-elle vérifiée ? Déterminer, et expliquer à partir de constructions faites sur le diagramme de Black, la valeur k_{45} de k qui permet d'obtenir la marge de phase de 45° spécifiée dans le cahier des charges.

II.2.3 Etude de la précision de la boucle d'asservissement de position angulaire

Q10/ Calculer, pour la valeur k_{45} de k établie précédemment, l'écart statique $\epsilon_{cons \infty}$ en incréments lorsque la consigne est un échelon de position : $Cons(t) = 1.u(t)$.

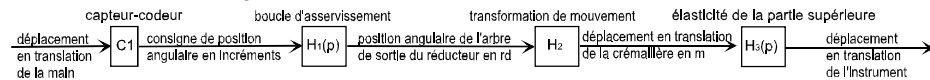
Etant donné que la perturbation Cr intervient entre deux blocs de $M(p)$, on adopte le schéma de la figure 4-4a pour faciliter les calculs de la question suivante.



Q11/ Calculer, pour la valeur k_{45} de k établie précédemment, l'écart statique $\epsilon_{pert \infty}$ en incréments entre la consigne et la mesure lorsque la perturbation est l'échelon de couple résistant $C_r.u(t)$ induit par les frottements secs. La chaîne cinématique de transmission est telle qu'il faut 150 incréments pour que la crémaillère se déplace de 1 mm, quelle est l'incidence de cet écart sur la position de l'instrument ? Conclure par rapport aux exigences du cahier des charges. Proposer une modification du bloc K qui annulerait cet écart.

III PERFORMANCES POSITIONNEMENT DE L'INSTRUMENT

III.1 Modélisation par schéma-blocs



III.2 Analyse du déplacement en translation de la crémaillère

Lorsque la boucle d'asservissement est bien réglée, la fonction de transfert est :

$$H(p) = \frac{\Theta(p)}{Cons(p)} = \frac{0,00035}{1 + 0,014p + 0,00017p^2}$$

On rappelle que la courroie s'enroule sur des poulies de même

diamètre et que la roue dentée qui engrène avec la crémaillère a un diamètre $\Phi_1 = 38,4$ mm.

Q12/ Exprimer le coefficient du bloc H_2 ; préciser l'unité.

En régime statique, la position de la crémaillère est l'image de la position de la main, aux écarts près.

Q13/ Quelle relation doit vérifier le produit P des gains des blocs C_1, H_1, H_2 ? Justifier. Exprimer le coefficient c_1 en incréments par mètre du bloc C_1 .

Pour augmenter la précision de l'opération chirurgicale, on désire que la crémaillère se déplace 10 fois moins que la main.

Q14/ Exprimer le nouveau coefficient c_2 du bloc C_1 ainsi que le nouveau produit P_1 .

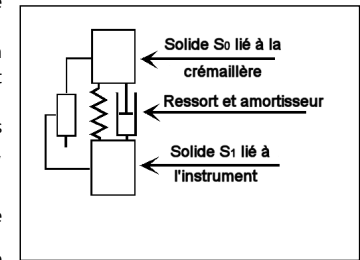
III.3 Analyse du déplacement de l'instrument chirurgical

III.3.1 Par rapport à la crémaillère

La partie supérieure du robot est constituée par assemblage de tubes minces en fibres de carbone.

On modélise cette partie par deux solides : S_0 représentant la crémaillère et les solides qui y sont liés ; et S_1 représentant l'instrument chirurgical.

Ces solides sont considérés en liaison glissière parfaite et reliés par un ressort de raideur k_0 et un amortisseur de coefficient f_0 , montés en parallèle comme le montre le schéma.

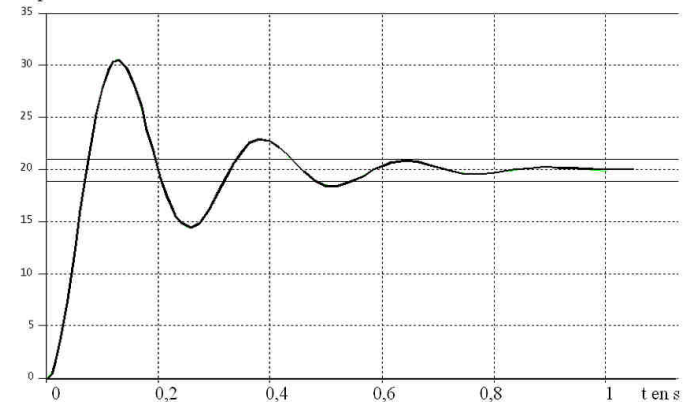


Pour identifier la fonction de transfert $H_3(p) = \frac{D_{instrum}(p)}{D_{crem}(p)}$ de

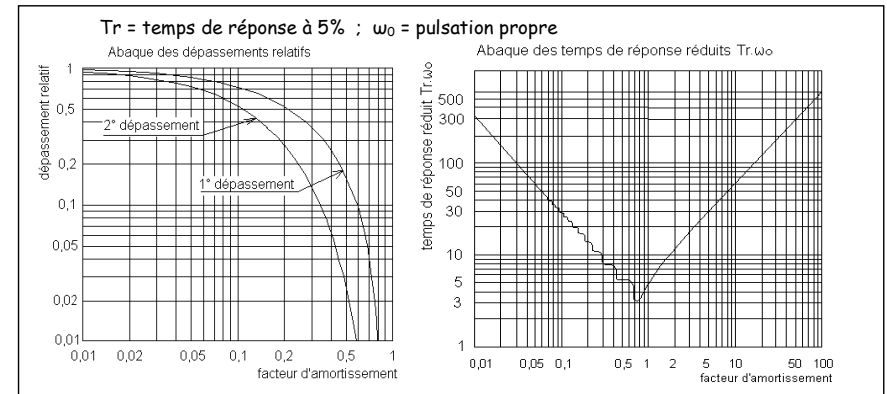
cette partie, on a imposé à la crémaillère un échelon de déplacement $d_{crem}(t) = 20.10^{-3}$ m à partir de la position d'équilibre.

On a tracé la courbe de déplacement $d_{instrum}(t)$ de l'instrument.

déplacement de l'instrument en mm



On donne les abaques des dépassements relatifs et des temps de réponse réduits d'un système du second ordre.



Q15/ Etablir l'expression de la fonction de transfert $H_3(p)$; déterminer les valeurs caractéristiques : Gain statique, coefficient d'amortissement et pulsation propre.

Q16/ Le critère de la bande passante de 4 Hz à -3 dB est-il satisfait ? répondre et justifier sur le document réponse.

Les questions suivantes vont permettre de déterminer l'expression analytique de $H_3(p)$, de façon à analyser l'influence du paramètre de raideur, pour respecter le critère de bande passante du cahier des charges.

Soit m_1 la masse du solide S_1 ; L'axe du mouvement est vertical ascendant et noté Z . L'origine O du mouvement de S_1 correspond à la position pour laquelle le ressort est à sa longueur libre (voir aussi la figure 4-6).

Soit a_0 (voir figure 4-8) l'allongement du ressort dans la position d'équilibre qui prend en compte l'action de la pesanteur.

Nota : a_0 est négatif car on considère qu'il y a allongement du ressort.

Q17/ Le solide S_1 est dans la position d'équilibre ; écrire l'équation d'équilibre.

Q18/ Le solide S_1 est déplacé de sa position d'équilibre puis abandonné à son propre poids. Déterminer l'équation différentielle du mouvement autour de la position d'équilibre.

Après avoir mis l'équation différentielle du mouvement sous forme canonique : $A \cdot \ddot{z}(t) + B \cdot \dot{z}(t) + z(t) = 0$, exprimer le coefficient d'amortissement ζ_3 et la pulsation propre ω_{03} du mouvement en fonction de k_0 , f_0 , m_1 . On donne la valeur numérique de la masse de l'instrument chirurgical et de la plaque d'interface : $m_1 = 1,6$ Kg ;

Q19/ Pour la valeur de ω_{03} calculée précédemment, déterminer la valeur minimale de la raideur k_0 (en N/m) qui permettrait de respecter le critère de la bande passante à -3 dB de 4 Hz.

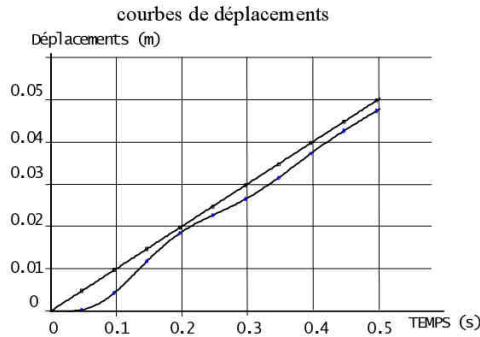
(On notera que $\omega_{-3dB} > \omega_{03}$).

III.4 Par rapport au déplacement de la main.

On conserve la valeur c_1 du bloc C_1 . La fonction de transfert du système est :

$$H(p) = \frac{D_{instrum}(p)}{D_{main}(p)} = \frac{1}{(1+0,014p+0,00017p^2)(1+0,015p+0,0014p^2)}$$

Le chirurgien impose avec sa main une rampe de déplacement de 100 mm / s. On a tracé les courbes de déplacement de la main et de l'instrument.



Q20/ Mettre en évidence sur le document réponses et donner les valeurs numériques : de l'écart dynamique maximal ; de l'écart de traînage (ou de vitesse) ε_v en régime établi, du retard de traînage. Le cahier des charges est-il satisfait pour ce dernier critère ?

On donne sur le **document réponses figure R41**, la courbe d'amplitude (gain) de $H(p)$ pour $p = j\omega$ dans le plan de Bode. La main du chirurgien est prise d'un tremblement sensiblement sinusoïdal dont la période est de 0,25 s et l'amplitude 1 mm.

Q21/ Déterminer à partir de cette courbe, l'amplitude du mouvement pris par l'instrument. Quelle est la conséquence de ce mouvement sur la plaie chirurgicale ?

III.5 Amélioration des performances dynamiques.

On souhaite limiter l'amplitude du mouvement de l'outil lors du tremblement de la main en filtrant le signal traité par le capteur-codeur C_1 de sorte que les tremblements n'apparaissent plus sur le soustracteur. On propose trois filtres du premier ordre, de gains statiques égaux à 1 et de constantes de temps : $T_1 = 0,04s$;

$$T_2 = 0,1s ; \quad T_3 = 0,5s.$$

Q22/ Tracer sur le diagramme suivant les trois courbes asymptotiques d'amplitude de ces filtres avec des couleurs différentes. Sachant que les mouvements dont la période est inférieure à 1 s ne doivent pas être atténués de plus de 1 dB, choisir le numéro 1, 2 ou 3 du filtre qui atténue de 8 à 10 dB le tremblement de la main de période 0,25s. Tracer sur cette figure, dans une autre couleur, l'allure de la courbe d'amplitude corrigée par ce filtre. Le niveau de 4 Hz, de la bande passante à -3dB du critère de rapidité est-il toujours respecté ?

