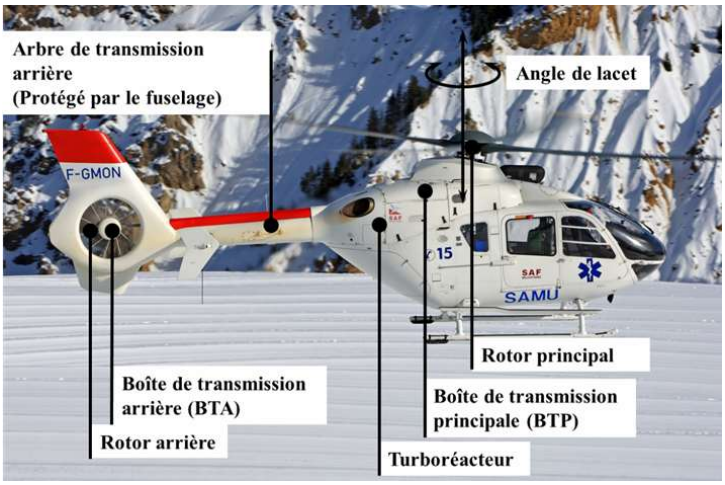
Durée de l'épreuve : 2h00
Aucun document autorisé - Calculatrice interdite

*Cet énoncé comporte **6** pages numérotées de **1 à 6**.*
Les réponses se feront exclusivement sur le document réponses – Aucun autre document ne sera corrigé.
La notation tiendra compte de la justesse des résultats ainsi que de la rédaction et du soin apporté à la composition.

Banc d'essai de boite de transmission principale d'hélicoptère

Sur les hélicoptères le déplacement est assuré par un rotor principal permettant la sustentation et la translation de l'appareil. Un rotor arrière permet de compenser le couple de réaction engendré par le rotor principal et de contrôler les mouvements de lacet de l'appareil.

Cette puissance utile au déplacement est au départ délivrée par deux turboréacteurs (parfois 1 suivant les modèles). Ces turboréacteurs entraînent en rotation une Boîte de Transmission Principale (BTP) qui elle-même entraîne, d'une part, le rotor principal et, d'autre part, le rotor arrière par l'intermédiaire d'un arbre de transmission et d'une Boîte de Transmission Arrière (BTA). La BTP assure aussi l'entraînement d'une série d'accessoires permettant le fonctionnement global de l'hélicoptère comme un alternateur, une pompe hydraulique, …



Airbus commercialise des hélicoptères civils et militaires et, pour chaque association hélicoptère-turboréacteur(s), Airbus conçoit, fabrique et assemble une BTP. Comme cette dernière est au cœur du fonctionnement et de la sûreté de l'appareil, elle nécessite une attention particulière ainsi que de nombreux tests expérimentaux afin de vérifier ses performances.

On s'intéresse par conséquent dans ce sujet à un banc d'essai permettant de tester les performances des BTP. Ce banc d'essai, dont on donne une description structurelle ainsi qu'un extrait de cahier des charges (**Figure 1**), doit notamment permettre de valider que :

- la puissance fournie par la BTP est bien celle requise pour garantir le fonctionnement de l'appareil ;
- la structure de la BTP résiste aux différentes sollicitations ;
- les durées de vie des éléments constitutifs de la BTP sont bien celles prévues par le bureau d'études.

Le banc d'essai (**Figure 2**) se présente sous la forme d'un châssis permettant d'accueillir et de connecter les rotors instrumentés du banc aux entrées/sorties mécaniques d'une BTP.
Ainsi, alors que sur l'hélicoptère la BTP est directement alimentée par les deux turbines, sur le banc d'essai, la motorisation est assurée par un moteur électrique qui entraîne une succession de réducteurs finalement reliés aux deux arbres d'entrée de la BTP. Le moteur utilisé sur le banc d'essai est un moteur électrique à courant continu piloté par un variateur lui-même alimenté par un transformateur.
Sur les arbres de sortie du banc d'essais qui doivent faire office de rotor principal et rotor arrière il n'y a pas de pales comme sur les rotors de l'hélicoptère. On utilise à la place un système de simulation des efforts. Ce système de simulation permet de générer des actions mécaniques sur le banc d'essai équivalentes à celles induites par les effets aérodynamiques sur les pales. Ce dispositif de simulation mécanique est notamment réalisé grâce à un accouplement spécial qui permet de fournir un couple résistant associé à des vérins hydrauliques permettant de générer un effort simulant l'effort de portance.

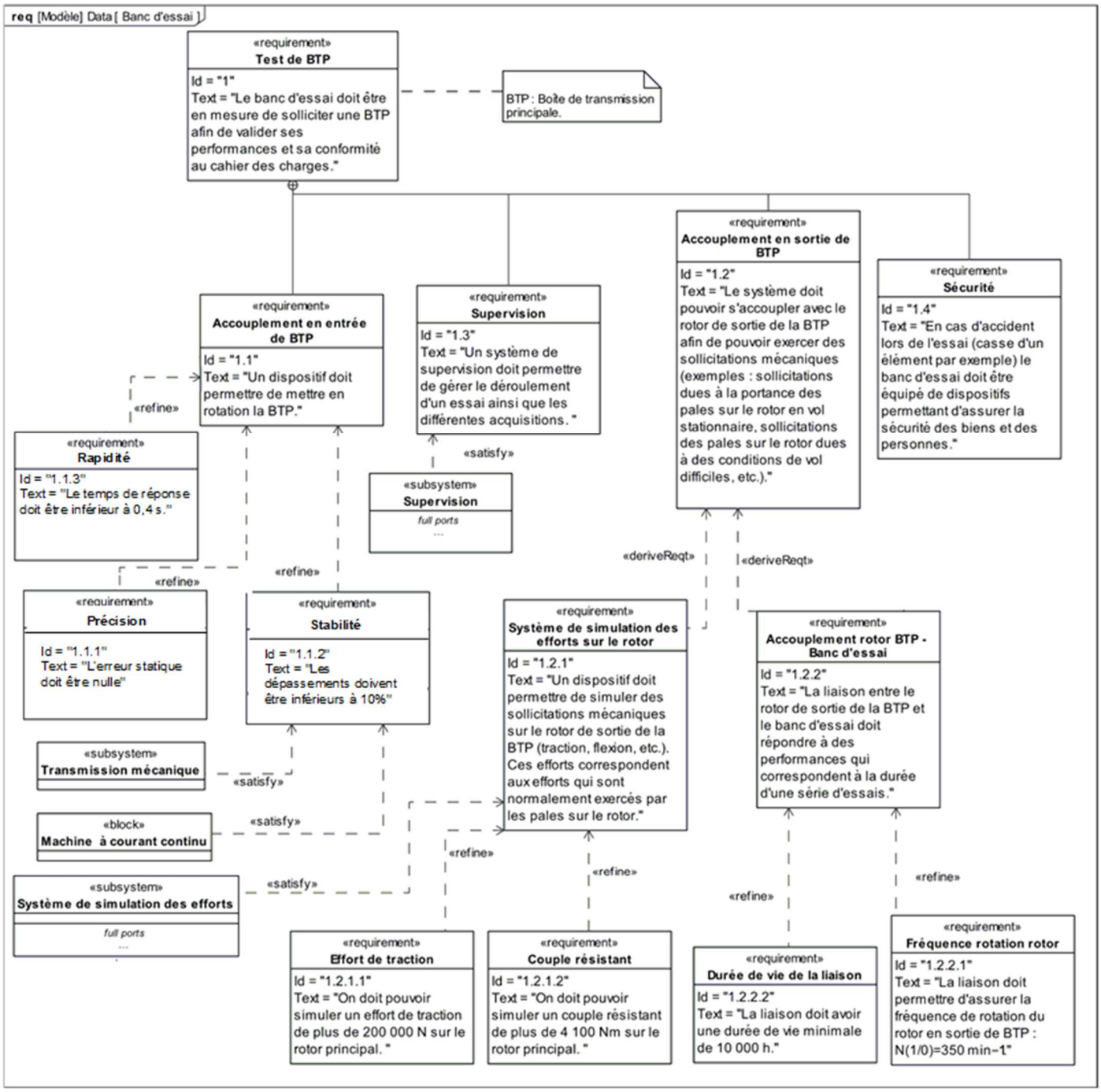


Figure 1 - Diagramme des exigences banc d'essai BTP



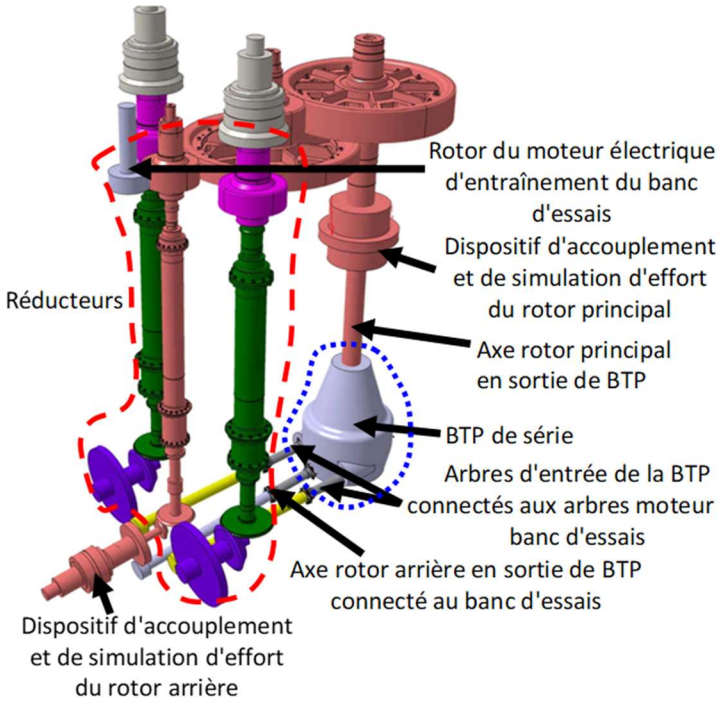


Figure 2 - Banc d'essai BTP + Chaîne cinématique

Le respect des caractéristiques des cycles d'essais est assuré par un asservissement en vitesse de rotation et en couple.
On s'intéresse par la suite à l'asservissement en vitesse de rotation du moteur de commande.

La **Figure 3** présente une description structurelle de la motorisation de la BTP :

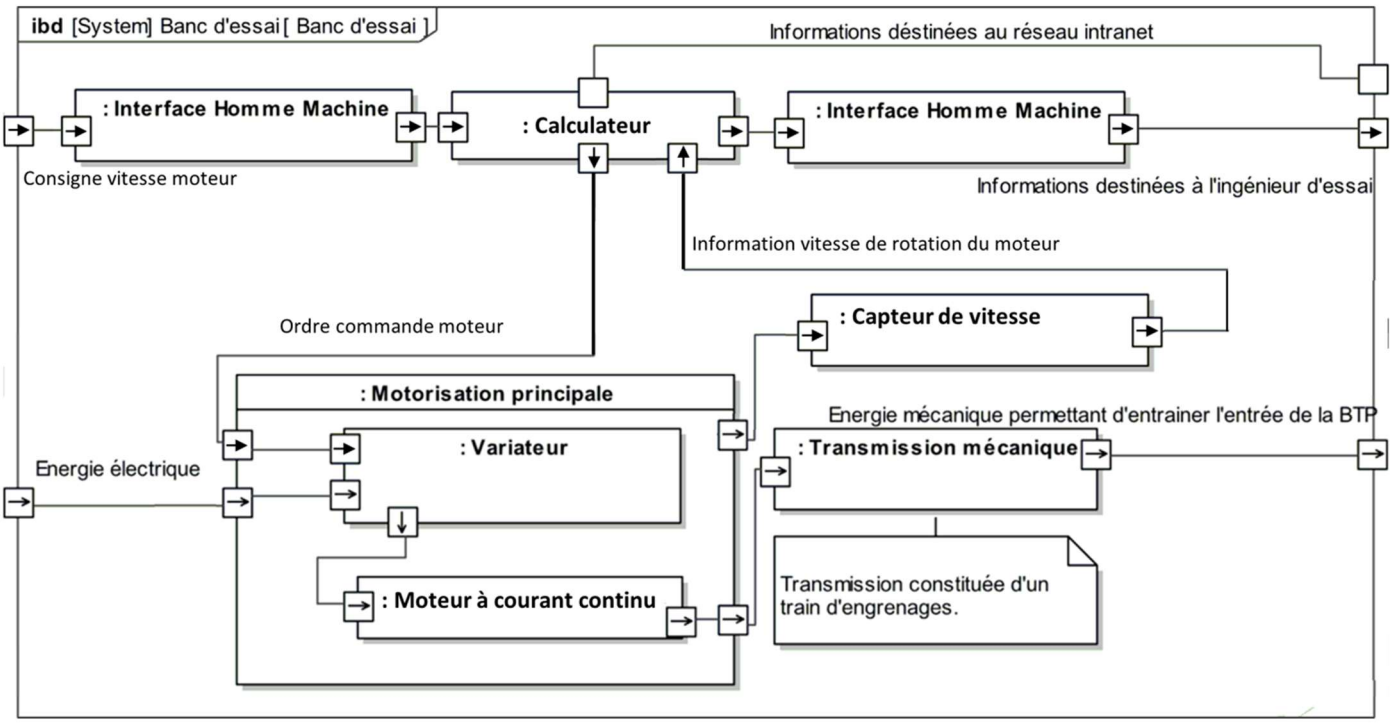


Figure 3 - IBD banc d'essai BTP

Q.1. Compléter sur le document réponses, le diagramme chaîne d'énergie - chaîne d'information partiel correspondant à la chaîne fonctionnelle d'entraînement en rotation de la BTP en indiquant le nom des composants réalisant chacune des fonctions.

Q.2. Repasser en bleu sur le document réponses, les flèches correspondant à de l'énergie électrique de puissance et en vert les flèches correspondant à de l'énergie mécanique. Préciser s'il s'agit d'énergie mécanique de rotation ou d'énergie mécanique de translation. Ajouter et/ou repasser en rouge les flèches permettant de connecter la chaîne d'énergie à la chaîne d'information du système.

La modélisation simplifiée en schéma bloc fonctionnel correspondant à la structure de l'asservissement en vitesse de rotation du moteur est donnée **figure 4**.

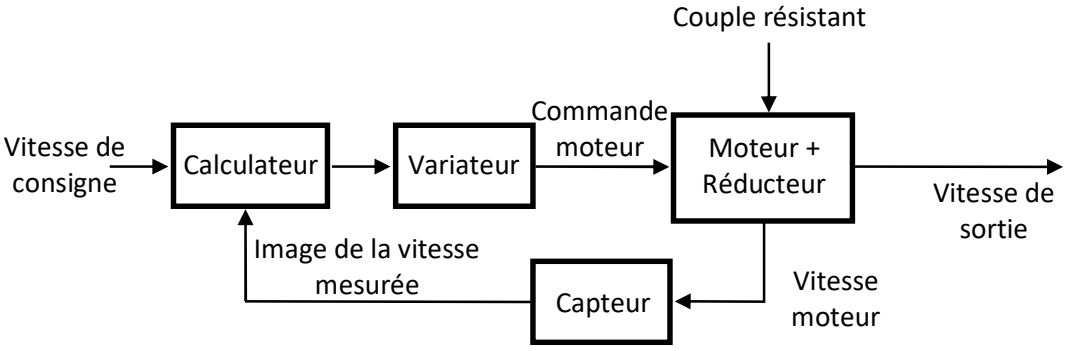


Figure 4 : Schéma bloc fonctionnel simplifié du modèle de la commande en vitesse de rotation.

On donne dans le tableau ci-dessous le modèle de connaissance associé à cet asservissement. Pour les équations des différents modèles de connaissance on supposera que toutes les conditions initiales sont nulles et que J_{eq}, R_m, K_t, K_e, K_{capt}, K_a, K_c, K_V, L_m, K_{aero} et K_{red} sont des coefficients constants.

	Modèle de connaissance
La loi entrée/sortie cinématique du **réducteur** en sortie de moteur est modélisable par un gain K_{red} liant la vitesse angulaire de sortie $\omega_s(t)$ à la vitesse angulaire du moteur $\omega_m(t)$	$\omega_s(t) = K_{red} \cdot \omega_m(t)$
La force électromotrice $e_m(t)$ du **moteur** est couplée à la vitesse de rotation de l'arbre moteur $\omega_m(t)$ grâce à la constante de force électromotrice K_e	$e_m(t) = K_e \cdot \omega_m(t)$
L'équation mécanique du **moteur** tournant à la vitesse angulaire $\omega_m(t)$ permet de lier l'inertie J_{eq} de l'arbre en rotation au couple moteur $C_m(t)$ et au couple résistant $C_r(t)$	$J_{eq} \cdot \frac{d\omega_m(t)}{dt} = C_m(t) - C_r(t)$
L'équation électrique au niveau de l'induit du **moteur** permet de lier la tension $u_m(t)$, le courant $i_m(t)$, la résistance de l'induit R_m et l'inductance de la bobine L_m	$u_m(t) = R_m \cdot i_m(t) + L_m \cdot \frac{di_m(t)}{dt} + e_m(t)$
Le couple **moteur** $C_m(t)$ est couplé à l'intensité $i_m(t)$ dans la bobine du moteur grâce à la constante de couple K_t	$C_m(t) = K_t \cdot i_m(t)$
Le **capteur de vitesse**, modélisé par un gain K_{capt}, délivre une tension $u_{mes}(t)$ proportionnelle à la vitesse angulaire du moteur $\omega_m(t)$	$u_{mes}(t) = K_{capt} \cdot \omega_m(t)$
L'**interface homme-machine** permet d'acquérir la vitesse de consigne noté $\omega_c(t)$ et de délivrer une tension image $u_c(t)$	$u_c(t) = K_a \cdot \omega_c(t)$
Le **calculateur** (comparateur+correcteur) permet : - de comparer (comparateur) la tension de consigne $u_c(t)$ à la tension de mesure $u_{mes}(t)$ et d'en déduire une tension $\varepsilon(t)$, image de l'erreur - d'amplifier (correcteur) cette tension $\varepsilon(t)$ en une tension de commande pour le variateur u(t)	$\varepsilon(t) = u_c(t) - u_{mes}(t)$ $u(t) = K_c \cdot \varepsilon(t)$
Le **variateur** délivre au moteur une tension $u_m(t)$ proportionnelle à la tension de commande u(t)	$u_m(t) = K_V \cdot u(t)$

Q.3. Appliquer la transformée de Laplace sur les différentes équations du modèle de connaissance. Compléter la 2^{éme} colonne du document réponses.

Q.4. Déduire de la question précédente les schémas blocs élémentaires correspondant à chacune des équations du modèle de connaissance. Compléter la 3ème colonne du document réponses en dessinant chacun des schémas blocs élémentaires (bloc avec variable d'entrée + variable de sortie + fonction de transfert) correspondant à chaque équation.

Q.5. Donner les variables d'entrée et de sortie de l'asservissement du système.

Q.6. Compléter le schéma bloc complet du système étudié. Indiquer toutes les variables entre blocs et le nom des constituants sous les blocs.

Q.7. Comment choisir le gain de l'interface homme-machine K_a pour que la vitesse angulaire de sortie soit correctement asservie sur la vitesse angulaire de consigne.
On considèrera cette condition remplie pour la suite.

Q.8. Reproduire le schéma bloc correspondant au moteur seul.

Q.9. Déterminer l'expression de la fonction de transfert boucle fermée **en poursuite** du moteur :
$H_{m1}(p) = \left.\frac{\Omega_m(p)}{U_m(p)}\right|_{C_r(p)=0}$ en fonction de K_t, K_e, J_{eq}, L_m et R_m.

Q.10. Montrer que cette fonction de transfert peut se mettre sous la forme d'un système du deuxième ordre $H_{m1}(p)=\frac{K_1}{1+\frac{2\xi_1}{\omega_1}\cdot p+\frac{1}{\omega_1^2}\cdot p^2}$ où K_1, ξ_1 et ω_1 sont 3 constantes à déterminer. Donner les unités de K_1, ξ_1 et ω_1.

On néglige pour toute la suite du problème la constante de temps électrique du moteur (→ cela revient à considérer L_m=0).

Q.11. Déterminer l'expression de la fonction de transfert boucle fermée **en poursuite** du moteur :
$H_{m2}(p) = \left.\frac{\Omega_m(p)}{U_m(p)}\right|_{C_r(p)=0}$ en fonction de K_t, K_e, J_{eq} et R_m.

Q.12. Montrer que cette fonction de transfert peut se mettre sous la forme d'un système du premier ordre
$H_{m2}(p) = \frac{K_2}{1+\tau_2\cdot p}$ où K_2 et τ_2 sont 2 constantes à déterminer. Donner les unités de K_2 et τ_2.

Q.13. Déterminer l'expression de la fonction de transfert boucle fermée **en régulation** du moteur :
$H_{m3}(p) = \left.\frac{\Omega_m(p)}{C_r(p)}\right|_{U_m(p)=0}$ en fonction de K_t, K_e, J_{eq} et R_m.

Q.14. Montrer que cette fonction de transfert peut se mettre sous la forme d'un système du premier ordre
$H_{m3}(p) = \frac{K_3}{1+\tau_3\cdot p}$ où K_3 et τ_3 sont 2 constantes à déterminer. Donner les unités de K_3 et τ_3.
<u>NB</u> : on fera apparaître sur la copie les manipulations/simplifications du schéma bloc afin d'exprimer cette fonction de transfert.

Q.15. Exprimer alors $\Omega_m(p)$ en fonction de $H_{m2}(p)$, $H_{m3}(p)$, $U_m(p)$ et $C_r(p)$.

Q.16. Déterminer et quantifier l'effet d'un échelon de couple résistant d'amplitude C_{r0} sur la vitesse angulaire du moteur en régime permanent.

On souhaite maintenant analyser les performances simulées de cet asservissement en vitesse de rotation.
On considère ici $\underline{C_r(p) = 0}$.

Q.17. À partir du schéma bloc élaboré à la question 6, déterminer l'expression de la fonction de transfert globale $H_g(p) = \frac{\Omega_s(p)}{\Omega_c(p)}$ en fonction de K_{capt}, K_c, K_v, K_2 et τ_2.

Q.18. Montrer que cette fonction de transfert peut se mettre sous la forme d'un système du premier ordre $H_g(p) = \frac{K_g}{1+\tau_g \cdot p}$ où K_g et τ_g sont 2 constantes à déterminer. Donner les unités de K_g et τ_g.

Q.19. Pour un échelon de consigne $\omega_c(t)$ = constante = ω_0 et en absence de couple résistant, déterminer l'expression de la vitesse de rotation $\omega_s(t)$ en régime permanent.
Conclure sur l'exigence de précision Id 1.1.1 du diagramme des exigences.

Q.20. Proposer une solution afin d'améliorer la précision de cet asservissement.

On donne sur le document réponses la réponse du système complet (sans négliger L_m) en boucle fermée pour une consigne échelon de vitesse angulaire de 5000 tour/min et pour un premier réglage grossier du gain K_c du correcteur.

Q.21. Analyser cette courbe vis-à-vis des critères de performances de l'exigence 1.1 du cahier des charges. Conclure quant à ce 1er réglage de correcteur vis-à-vis du cahier des charges. Laisser apparaître sur le document réponse les constructions graphiques permettant de justifier l'analyse des critères de performance.