

- Les réponses sont à donner **exclusivement** sur le document réponse
- Les parties du sujet sont indépendantes

ROBOT MIR : Machine d'inspection des réacteurs rapides

1. Présentation

Le robot MIR développé pour la vérification des cuves du réacteur nucléaire Superphenix doit être adapté pour le contrôle d'une nouvelle génération de réacteurs à neutrons rapides.

L'objectif du robot MIR est :

- d'assurer le contrôle surfacique télévisuel des soudures des deux cuves et des zones adjacentes ;
- d'assurer le contrôle volumique par ultrasons des soudures de la cuve principale et des zones adjacentes;
- de mesurer en permanence la distance entre les deux cuves.

Pour cela, le robot se déplace dans l'espace inter-cuve, entre la cuve principale et la cuve de sécurité.

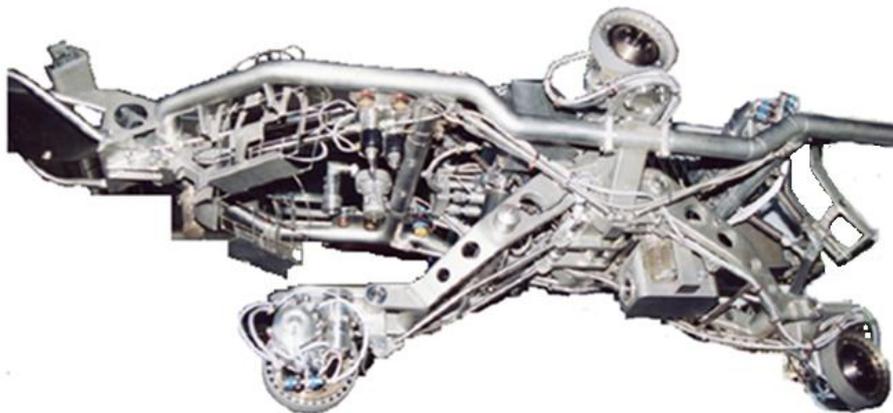
Compte-tenu de l'environnement complexe (gaz neutre, température élevée, exigüité), le robot est accompagné de plusieurs sous-ensembles nécessaires à son installation et à son fonctionnement.

Lorsque le robot évolue dans l'espace inter-cuve, il est en permanence relié à **un filin de traction** et à **un ombilical** par lequel transitent la puissance électrique, les signaux d'information et différents gaz dont celui nécessaire au refroidissement. Pour garantir un bon enroulement de l'ombilical, **un système de treuil** est installé au-dessus de la dalle du réacteur.

Pour assurer le refroidissement des composants du robot, il est aussi nécessaire de disposer d'un compresseur et d'un groupe frigorifique. Ces deux sous-ensembles sont alimentés en azote par le réseau de la centrale.

Enfin, le pilotage du robot s'effectue depuis l'extérieur du bâtiment réacteur à l'aide d'un pupitre de commande qui constitue l'interface homme-machine (IHM).

Les consignes sont traitées par l'automate programmable industriel qui réside lui aussi à l'extérieur du bâtiment et qui transmet les ordres au robot via l'ombilical.



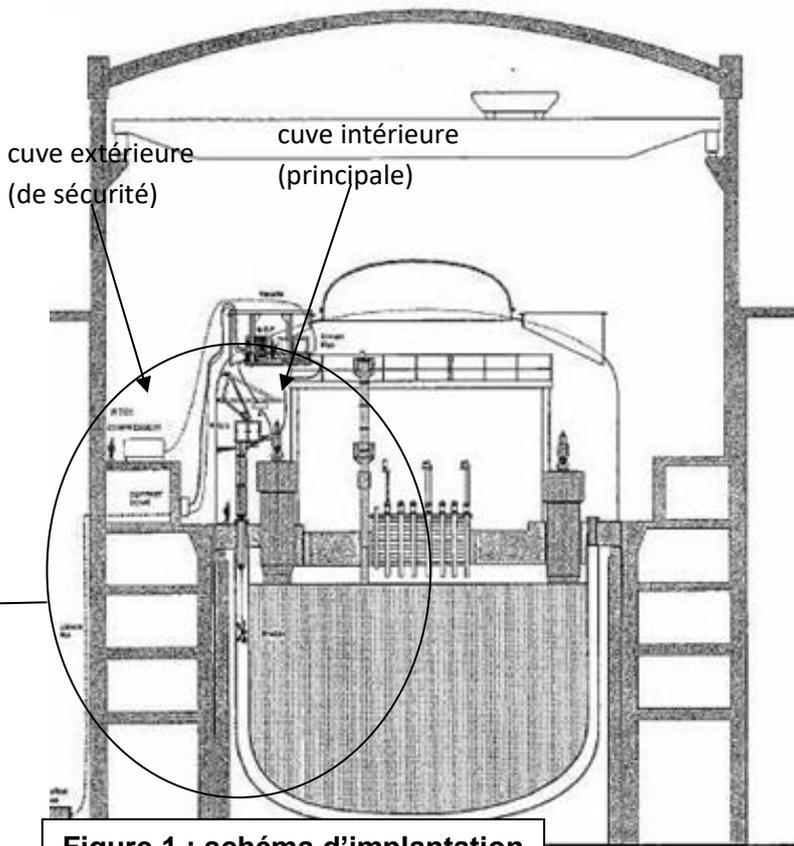


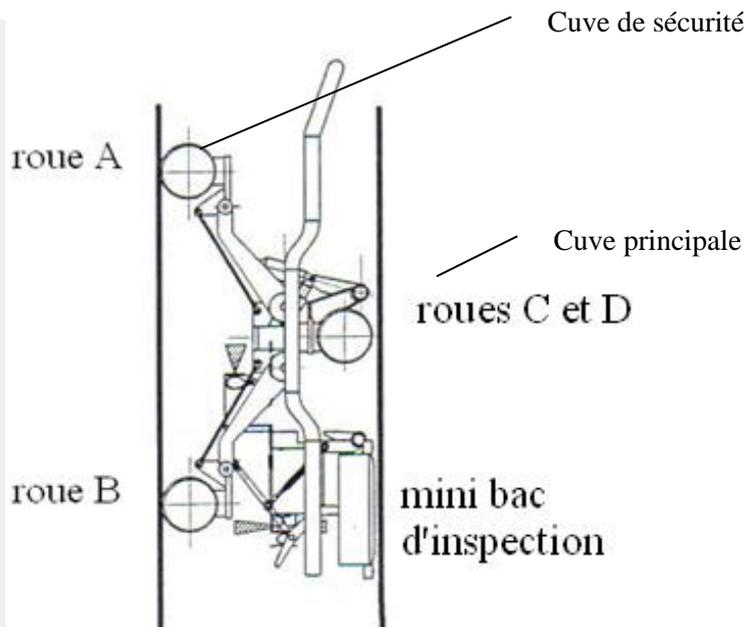
Figure 1 : schéma d'implantation des sous-ensembles du MIR lors d'une intervention

B. Description

Description structurelle

Le robot MIR est un véhicule motorisé composé d'un châssis tubulaire, de quatre bras articulés et des composants nécessaires à la mise en œuvre des contrôles et mesure. La structure est en acier inoxydable. La masse est d'environ 180 kg.

Les dimensions hors tout sont de 2000 x 800 x 700 mm.



Figures 2a et 2b : robot MIR en position déployée

A l'extrémité de chaque bras, se trouve une roue motorisée en rotation et en direction. Il y a donc au total 4 roues qui servent d'appui contre les parois de cuve (principale et de sécurité).

Sur la partie inférieure, sont situés le mini bac d'inspection et son système de plaquage. Ce sous-ensemble constitue le dispositif d'inspection proprement dit. Le rôle dévolu au reste du robot étant de positionner le mini bac d'inspection au droit de la soudure à contrôler.

La chaîne d'énergie associée au déplacement

Chaque roue utilise un module de déplacement. Il y a quatre modules de déplacement sur le robot MIR.

Chaque module est composé d'un corps, d'une roue, du motoréducteur de traction, du motoréducteur d'orientation et du potentiomètre d'orientation.

La roue est la pièce tournante en contact avec les parois de la cuve. La surface extérieure torique est revêtue d'une couche mince de carbure de tungstène. Ce revêtement est très tenace et présente l'avantage d'avoir un coefficient de frottement sur l'**acier inoxydable élevé ($f \geq 0,5$)**.



Figure 3 : vue générale d'un module de déplacement

Le motoréducteur de traction permet la rotation de la roue pour faire avancer le robot. Le motoréducteur est composé :

- d'un moteur à courant continu (puissance = 48 W ; tension = 60 V ; intensité maximale = 0,7 A) ;
- d'un réducteur Harmonic Drive extra-plat dont le rapport de réduction est de 1/160.

Pour connaître la vitesse de déplacement du robot, on utilise une génératrice tachymétrique : cet instrument permet de mesurer la vitesse de la roue en générant une tension proportionnelle à la vitesse de rotation ;

Les ordres issus de l'automate sont reçus par la carte électronique de pilotage qui délivre la puissance nécessaire au moteur électrique. Cette carte est intégrée au module de déplacement.

Ces composants sont montés dans un carter spécifique dont la conception permet un débrayage éventuel après action sur un boulon fusible. Cette action permet, exceptionnellement, de rendre la roue folle (libre en rotation) en cas de grippage (blocage) d'un composant.

On donne sur le document-réponse la description incomplète par chaîne d'information / chaîne d'énergie du déplacement du robot.

D'autres éléments construits autour d'actionneurs permettent entre autres de plaquer les roues sur la cuve, d'imposer un déplacement du transducteur (dispositif convertissant une information sur l'état des soudures à inspecter en un signal électrique) du mini bac d'inspection.

Question 1.

A partir des informations données dans le texte de description précédent, compléter les informations manquantes de la description par chaîne d'information / chaîne d'énergie du module de déplacement présenté sur le document-réponse.

Question 2.

Compléter les liens de contenance manquant du diagramme bdd du document-réponse

Cahier des charges et diagramme des exigences

Un extrait du cahier des charges est donné ci-dessous :

Exigence	Enoncé	Critères	Niveaux	Flexibilité
1.2	Faire avancer le robot entre les cuves à vitesse déterminée	Vitesse de déplacement.	6 mm.s^{-1}	$\pm 1 \text{ mm.s}^{-1}$
1.1.1.1	Limiter la vitesse d'impact du mini bac d'inspection sur la paroi	Vitesse de contact	$0,2 \text{ m.s}^{-1}$	$\pm 10 \text{ mm.s}^{-1}$
1.1.1.2	Maintenir un effort presseur suffisant sur le mini bac	Effort normal	400 N	$\pm 10 \%$
1.1.1.3	Déplacer le transducteur à vitesse constante	Vitesse d'inspection	5 mm.s^{-1}	$\pm 0.5 \text{ mm.s}^{-1}$
1.2.2.1	Exercer un couple suffisant sur les roues	Couple moteur	mini $0,35 \text{ N.m}$	$\pm 10 \%$

Figure 5

On donne le diagramme des exigences (incomplet) sur le document-réponse.

Question 3.

Relier les 3 blocs (sous-systèmes) du bas du diagramme aux exigences auxquels ils sont liés par le lien « satisfy ».

2. Etude du moteur seul

Chaque roue est équipée d'un moteur identique dont on étudie les caractéristiques.

On notera :

$\omega_{mA}(t)$: vitesse angulaire de rotation à la sortie du moteur en rad.s^{-1} ,

U : tension de commande du moteur en V

J : moment d'inertie équivalent en kg.m^2

R : résistance électrique du moteur en Ohms

K_A : constante du moteur en N.m.A^{-1}

Notations : les transformées de Laplace des fonctions $x(t)$ en minuscule sont notées $X(p)$ en majuscule.

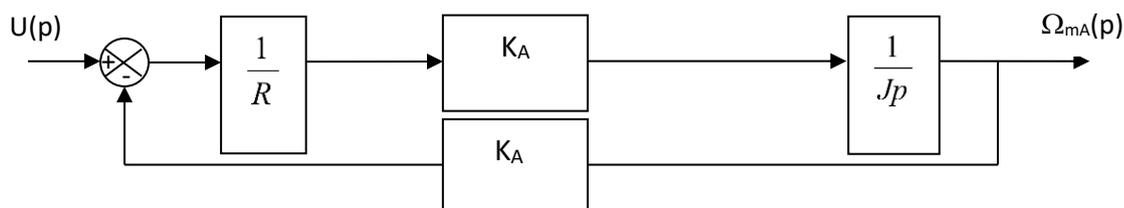


Figure 10b : schéma bloc d'un actionneur sans résistance

Question 4.

Exprimer la fonction de transfert $H_A(p) = \frac{\Omega m_A(p)}{U(p)}$.

La mettre sous forme canonique du premier ordre $H_A(p) = \frac{K_1}{1 + \tau_1 \cdot p}$.

Exprimer les gain statique K_1 et constante de temps T_1 correspondants, en fonction de K_A , R et J .

Question 5.

Exprimer alors $\Omega m_A(p)$ pour une entrée échelon d'amplitude u_0 telle que $U(p) = \frac{u_0}{p}$ en fonction de K_1 , T_1 , u_0 et de la variable de Laplace p .

Identifier en fonction de K_1 et T_1 les constantes a et b telles que : $\Omega m_A(p) = \frac{a}{1 + T_1 p} + \frac{b}{p}$.

Exprimer alors la réponse indicielle $\omega_{mA}(t)$ du moteur (ou pourra utiliser le tableau des transformées de Laplace usuelles).

x(t)	X(p)
$\delta(t)$: fonction de DIRAC	1
a.u(t) (échelon)	$\frac{a}{p}$
a.t	$\frac{a}{p^2}$
e^{-at}	$\frac{1}{p + a}$

Tableau des transformées de Laplace des fonctions usuelles

Question 6.

Représenter la réponse indicielle $\omega_{mA}(t)$ du moteur. Donnez les caractéristiques de cette courbe (tangente à l'origine, valeurs particulières, temps de réponse à 5%). Précisez les axes.

3. Etude de la synchronisation de la vitesse des roues.

Si les deux roues fonctionnent à la même vitesse, on a la structure du schéma bloc de la figure 10a (voir Doc réponse) pour chacune des deux roues.

Mais si les moteurs ont une légère différence, les 2 roues prendraient des vitesses différentes. Mais contraintes par le châssis et l'adhérence aux parois à tourner à la même vitesse (en ligne droite), elles exercent l'une sur l'autre un effort qu'on peut ramener à l'arbre moteur sous forme d'un couple supplémentaire c_{mB} sur la roue SA, et c_{mA} sur la roue SB. On a alors, pour la roue SA, les 4 équations de fonctionnement suivantes :

- Equations électriques (en négligeant l'effet de l'inductance) : $u(t) = R.i_A(t) + e_A(t)$ (1)

- Equation mécanique, ramenée à l'arbre moteur de la roue S_A : $c_{mA}(t) + c_{mB}(t) = J \frac{d\omega_{mA}(t)}{dt}$ (2)

- Equations électromécaniques : $e_A(t) = K_A \cdot \omega_{mA}(t)$ (3)

$c_{mA}(t) = K_A \cdot i_A(t)$ (4)

Où l'on note :

$\omega_{mA}(t)$: vitesse angulaire de rotation à la sortie du moteur, avant réduction rad.s^{-1}

$c_{mA}(t)$: couple exercé par le moteur de la roue S_A sur l'arbre moteur en N.m

$c_{mB}(t)$: couple exercé par le moteur de la roue S_B sur l'arbre moteur en N.m

U : tension de commande du moteur en V

J : moment d'inertie équivalent en kg.m^2

R : résistance électrique du moteur en Ohms

K_A : constante du moteur en N.m.A^{-1}

Notations : les transformées de Laplace des fonctions $x(t)$ en minuscule sont notées $X(p)$ en majuscule. On considère les conditions initiales nulles.

Question 7.

Appliquer la transformée de Laplace aux équations (1) à (4). Préciser les théorèmes utilisés.

La consigne du système est la tension de commande $u(t)$ appliquée aux bornes du moteur, la sortie est la vitesse de rotation du moteur $\omega_{mA}(t)$ de la roue S_A .

Question 8.

Compléter alors les zones grisées du schéma bloc du moteur. Comment peut-on qualifier la grandeur c_{mB} sur ce schéma ?

4. Etude de la régulation

On étudie le moteur en régulation, c'est-à-dire lorsque la consigne est nulle, conformément au schéma-bloc ci-après :

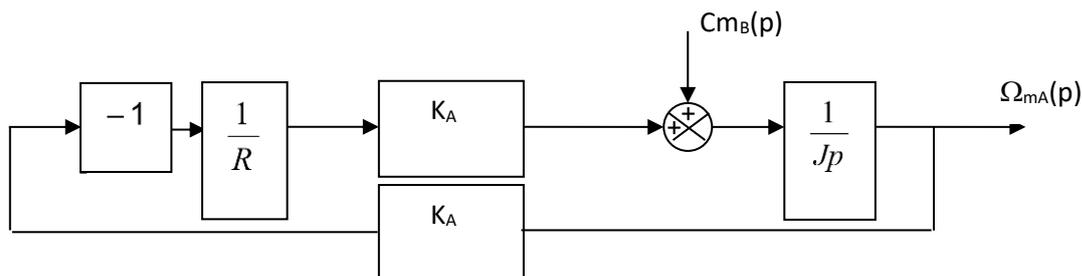
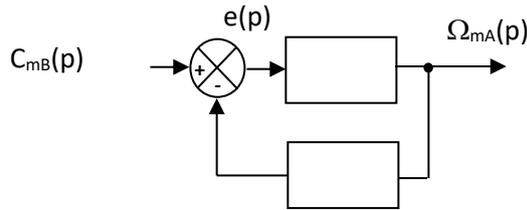


Figure 10c : schéma bloc d'un actionneur en régulation $U(p) = 0$

Question 9.

Transformer le schéma-bloc de la figure 10c, de façon à obtenir un schéma-bloc « classique » de la forme :



Question 10.

Exprimer la fonction de transfert $H_B(p) = \frac{\Omega_{mA}(p)}{C_{mB}(p)}$ et la mettre sous forme canonique du premier ordre.

Exprimer le gain statique K2 et la constante de temps T2 correspondants en fonction de KA, R et J.

On soumet ce système à une entrée en échelon d'amplitude Cm0.

Question 11.

Représenter la réponse indicielle $\omega_{mA}(t)$ du moteur. Donnez les caractéristiques de cette courbe (tangente à l'origine, valeurs particulières, temps de réponse à 5%).

5. Etude de l'asservissement du transducteur

– Etude de l'exigence 1.1.1.3 : Déplacer le transducteur à vitesse constante

Le robot MIR étant à l'arrêt entre les deux cuves, le mini bac est plaqué contre la paroi de la cuve à contrôler.

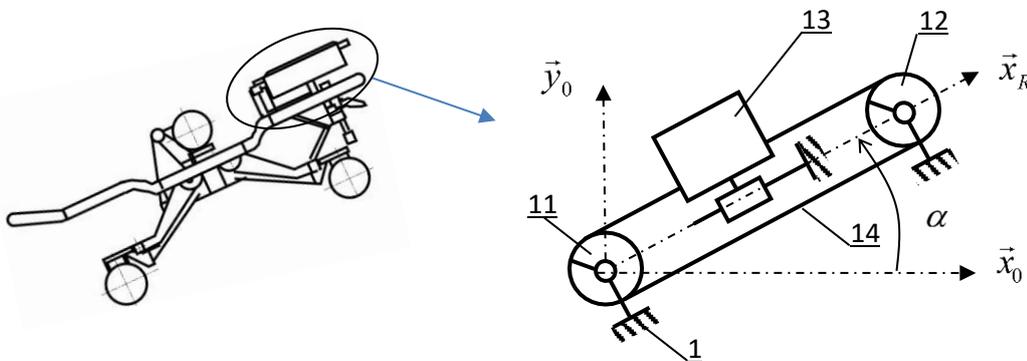


Figure 12 : schéma de l'intérieur du mini bac

Le transducteur **13** coulisse selon la direction \vec{x}_R , avec le corps **1** du robot MIR. La chaîne d'énergie est composée entre autre, d'un moteur électrique qui exerce un couple $\mathbf{c}(t)$ en fonction de la tension électrique $\mathbf{u}(t)$ qui l'alimente.

Le couple $\mathbf{c}(t)$ du moteur est appliqué sur l'ensemble {pignon **11** + poulie + courroie **14**} qui le transforme en une force $\mathbf{f}(t)$ appliquée sur le transducteur. En fonction de cette force $\mathbf{f}(t)$, le transducteur se déplace à une vitesse $\mathbf{v}_r(t)$ que l'on cherche à contrôler. Pour cela, un capteur de vitesse mesure $\mathbf{v}_r(t)$ et délivre une tension $\mathbf{u}_r(t)$.

La consigne $\mathbf{v}_c(t)$ est convertie en une tension $\mathbf{u}_c(t)$. L'écart calculé par ce système automatique est donc $\mathbf{\epsilon} = \mathbf{u}_c(t) - \mathbf{u}_r(t)$. Cet écart constitue l'entrée du correcteur qui délivre la tension $\mathbf{u}(t)$ au moteur.

Question 12.

Présenter la structure de ce système automatisé sous la forme d'un schéma fonctionnel bouclé, sur lequel vous ferez apparaître les grandeurs physiques et le nom des composants.

Hypothèses :

On suppose que le robot **1** est immobile par rapport au repère galiléen.

Toutes les liaisons sont supposées parfaites.

On néglige la masse et l'inertie de la courroie crantée **14**.

En appliquant le théorème de l'énergie puissance à l'ensemble, on peut montrer alors que l'équation qui régit le comportement dynamique s'écrit :

$$M_{eq} \cdot \frac{dv_r}{dt} = \delta \cdot c(t) + \beta \cdot v_r(t) + \gamma \cdot f_{pert}(t)$$

Dans laquelle les paramètres δ , β , γ et M_{eq} sont des constantes qui s'expriment en fonction des données de masse, d'inertie, de frottement, etc. $f_{pert}(t)$ est une perturbation provenant de l'action de la pesanteur.

On modélise la partie mécanique du système d'asservissement de vitesse de la manière suivante :

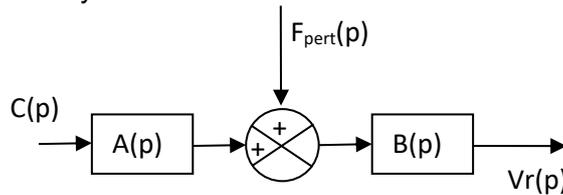


Figure 13 : schéma bloc de la partie mécanique

Notations :

$V_r(p)$ est la transformée de Laplace de $v_r(t)$ vitesse de translation du transducteur **13**.

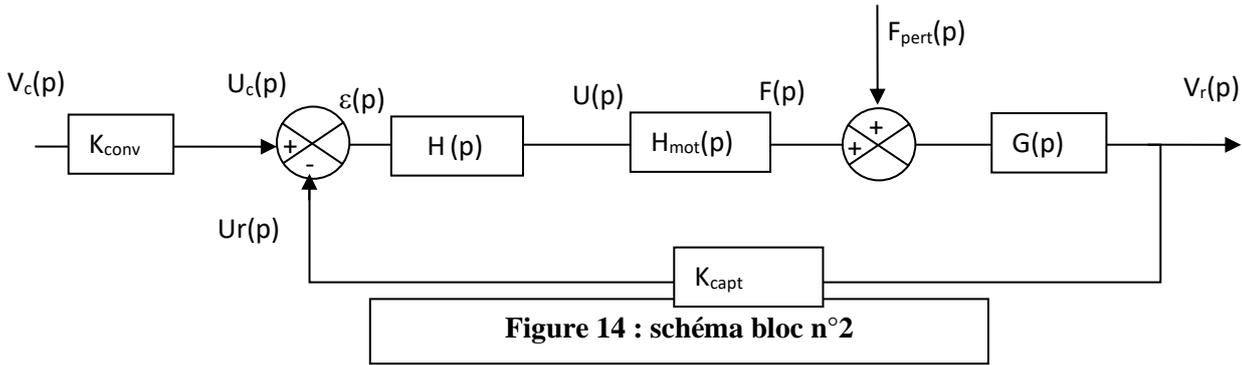
$F_{pert}(p)$ est la transformée de Laplace de $f_{pert}(t)$,

Question 13.

En supposant des conditions initiales nulles, exprimer les fonctions de transfert $A(p)$ et $B(p)$ en fonction de δ , β , γ et M_{eq} .

6. Etude des performances

On adopte ensuite la modélisation suivante :



Avec : $H(p)=K_{cor}$: gain du correcteur

Une simulation à l'aide du logiciel Xcos sous Scilab donne pour cette modélisation, et avec 3 valeurs de réglage de gain de correcteur différentes, les réponses à un échelon de consigne de vitesse de 0,005m/s, figurant sur le document réponse.

Le Cahier des Charges Fonctionnel à respecter est donné partiellement ci-dessous :

Critère de performance	Valeur
temps de réponse à 5%	$t_{r5\%} < 0,1s$
écart ou erreur statique	$\epsilon_s < 0,0001m/s$
1 ^{er} dépassement	$D1 < 20\%$

Question 14.

Rappeler les noms des performances d'un asservissement et leur associer si possible les critères de performance citées ci-dessus.

Question 15.

Pour chacune de ces réponses, en indiquant les tracés et relevés de valeurs nécessaires sur la courbe, donner les valeurs des 1^{er} dépassement, temps de réponse à 5% et d'écart ou erreur statique (statique=en régime permanent).

Fin de l'énoncé