

Table des matières

1	Présentation du drone.....	3
2	Extrait du cahier des charges.....	4
3	Architecture générale de l’UAV.....	4
4	Étude : contrôler la vitesse de l’AUV.....	5
5	Correcteur PI.....	7
5.1	Discrétisation du processus (1 pts).....	7
5.1.1	Donner l’expression numérique de la fonction de transfert discrétisée avec son échantillonneur bloqueur d’ordre zéro, soit.....	7
	A compléter.....	7
5.2	Comportement en boucle fermée.....	7
5.2.1	Justifier le choix de la période d’échantillonnage. (0,5 pts).....	7
5.2.2	La fonction de transfert en boucle fermée désirée, peut se mettre sous la forme . Donner l’expression numérique de et . (1 pts).....	7
	A Compléter.....	8
5.3	Donner l’expression numérique de la fonction de transfert discrétisée. (1 pts).....	8
5.4	Nous souhaitons mettre en place un correcteur PI numérique de la forme	8
5.4.1	Pourquoi un tel correcteur permet d’annuler l’erreur de position ? (0,5 pts).....	8
5.4.2	Déterminer l’expression numérique des coefficients du correcteur. (2 pts).....	8
	A Compléter.....	8
5.4.3	Déterminer le temps de réponse à 5% pour un échelon unitaire. (1 pts).....	8
5.4.4	Déterminer l’expression numérique de l’erreur à une entrée de consigne de type rampe unitaire.(1 pts).....	8
6	Correcteur PID.....	8
6.1	Comportement en boucle fermée.....	9
6.1.1	Justifier que les fonctions de transfert etsont similaires ? (1 pts).....	9
6.1.2	Donner l’expression numérique de la fonction de transfert discrétisée avec son échantillonneur bloqueur d’ordre zéro, soit avec une période d’échantillonnage. (015 pts).....	9
6.1.3	Justifier le choix de la période d’échantillonnage. (0,5 pts).....	9
6.2	Nous souhaitons mettre en place un correcteur PID numérique de la forme .(3 pts).....	9
6.2.1	A compléter.....	10
6.2.2	Déterminer le temps de réponse à 5 % (1 pts).....	10
6.2.3	Déterminer l’expression numérique de l’erreur à une entrée de consigne de type rampe unitaire. (1 pts).....	10
7	Correcteur polynomial.....	10
7.1	Factorisation de la fonction de transfert en boucle ouverte.....	10
7.1.1	A compléter en fonction de : (2 pts).....	10
7.2	Comportement en boucle fermée.....	11
7.2.1	La fonction de transfert en boucle fermée désirée, peut se mettre sous la forme . Donner l’expression numérique de et . (1 pts).....	11
7.2.2	Donner l’expression numérique de la fonction de transfert discrétisée . (1 pts).....	11
7.2.3	Justifier le choix de la période d’échantillonnage.(0,5 pts).....	11
7.3	Nous souhaitons mettre en place un correcteur polynomial numérique de la forme	11
7.3.1	Établir l’équation diophantienne permettant de calculer le correcteur. (1,5 pts).....	11
7.3.2	Donner l’expression numérique des polynômes eten puissance de z négative. (2 pts)..	11
7.3.3	Déterminer le temps de réponse à 5% pour un échelon unitaire. (1 pts).....	11

7.3.4 Déterminer l'expression numérique de l'erreur à une entrée de consigne de type rampe unitaire. (1,5 pts).....	12
8 Conclusion (1,5 pts).....	12

Pour chaque résultat numérique, il est attendu l'unité.

ALISTAR Engin sous-marin autonome d'inspection

Les installations d'exploitation (plate-forme, tête de puits, pipeline,...) des champs pétrolifères Offshore situées en haute mer font l'objet d'une constante surveillance. Bien que cruciale pour des raisons de sécurité, elle est difficilement réalisable à cause de l'hostilité du milieu marin et des grandes profondeurs rendant l'intervention humaine irréaliste. Le recours à un drone sous-marin s'impose naturellement. La conception d'un tel engin repose essentiellement sur le type de mission à réaliser. Dans le cas particulier d'une inspection de pipeline, il doit être capable, en toute autonomie, de localiser puis de suivre le tracé de ce dernier sur plusieurs dizaines de kilomètres afin de contrôler son état général en focalisant l'attention principalement sur les risques de recouvrement par des sédiments et sur les zones où le pipeline ne repose plus sur les supports. Il doit également être capable de vérifier les points d'ancrage du pipeline.

1 Présentation du drone

Le sous-marin autonome d'inspection, objet de cette étude, est développé par la société ECA, localisée à Toulon (Var), spécialisée dans la robotique terrestre et sous-marine pour les environnements hostiles où l'homme ne peut pas intervenir directement. Elle propose une large gamme de produits en particulier dans les domaines de la défense, du nucléaire et l'offshore pétrolier.

L'ALISTAR 3000 (figure 1) est un engin sous-marin autonome qui entre dans la catégorie des « UAV » (Autonomous Under-water Vehicle) capable d'effectuer une grande variété de tâches d'inspection sur les champs pétrolifères Offshore jusqu'à une profondeur de 3000 m. Une fois la mission d'inspection établie et programmée, il offre la possibilité de recueillir des données vidéo (caméra) et sonars (latéral et à balayage) des installations sous-marines visitées (pipeline, tête de puits, ...). Il stocke ces informations pour dépouillement ultérieur à terre. Pour cette étude, le profil d'une mission type (figure 2) de ce sous-marin se décompose par l'enchaînement temporel de cinq phases distinctes :

1. une phase de pesée et de préparation du sous-marin, mise à l'eau ;
2. une phase de descente afin de rejoindre le point de départ de son travail d'inspection ;
3. une phase d'inspection (contrôle de l'état général du pipeline) ;
4. une phase de remontée à la surface ;
5. une phase de récupération du sous-marin.



Figure 1 Le sous-marin autonome d'inspection ALISTAR

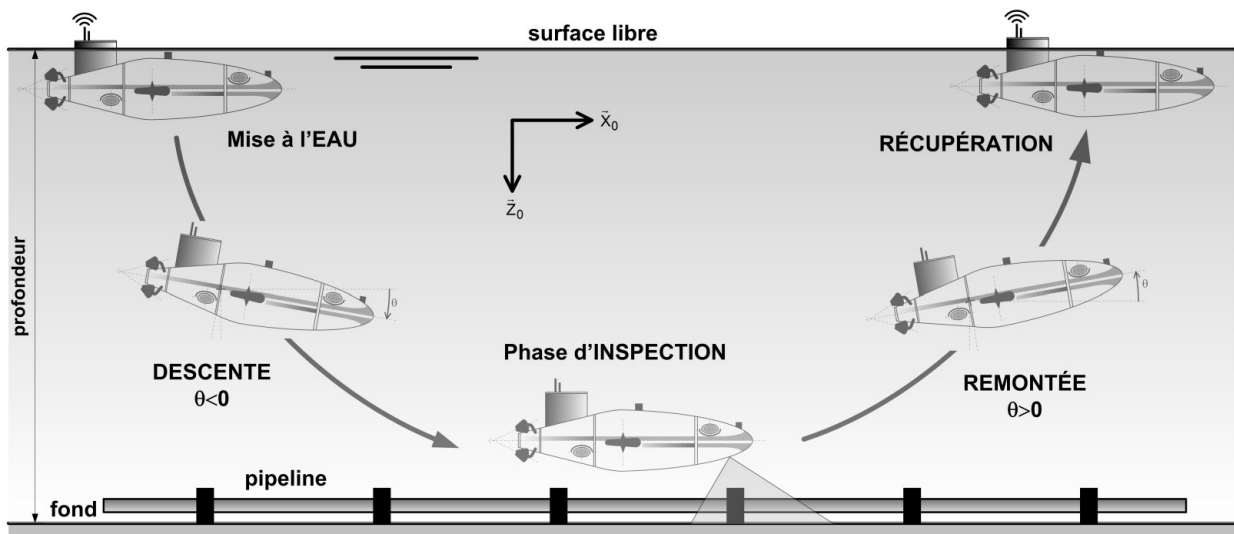


Figure 2 Profil d'une mission type de l'AUV

2 Extrait du cahier des charges

Maîtriser la vitesse de suivi du pipeline par l'AUV :

- Erreur en régime stationnaire pour une entrée en échelon de vitesse nulle.
- Rapidité $t_{R5\%} < 5s$.
- Aucun dépassement.

3 Architecture générale de l'UAUV

Pour se déplacer, l'ALISTAR est pourvu de 8 propulseurs : 4 propulseurs principaux arrière, 2 propulseurs latéraux et 2 propulseurs verticaux (architecture et localisation figure 4). Cette structure assure une excellente manœuvrabilité dans l'espace sans avoir à recourir à des gouvernes orientables, consommatrices d'énergie et peu efficaces lors de certaines manœuvres ou pour contrecarrer les effets des courants marins ;

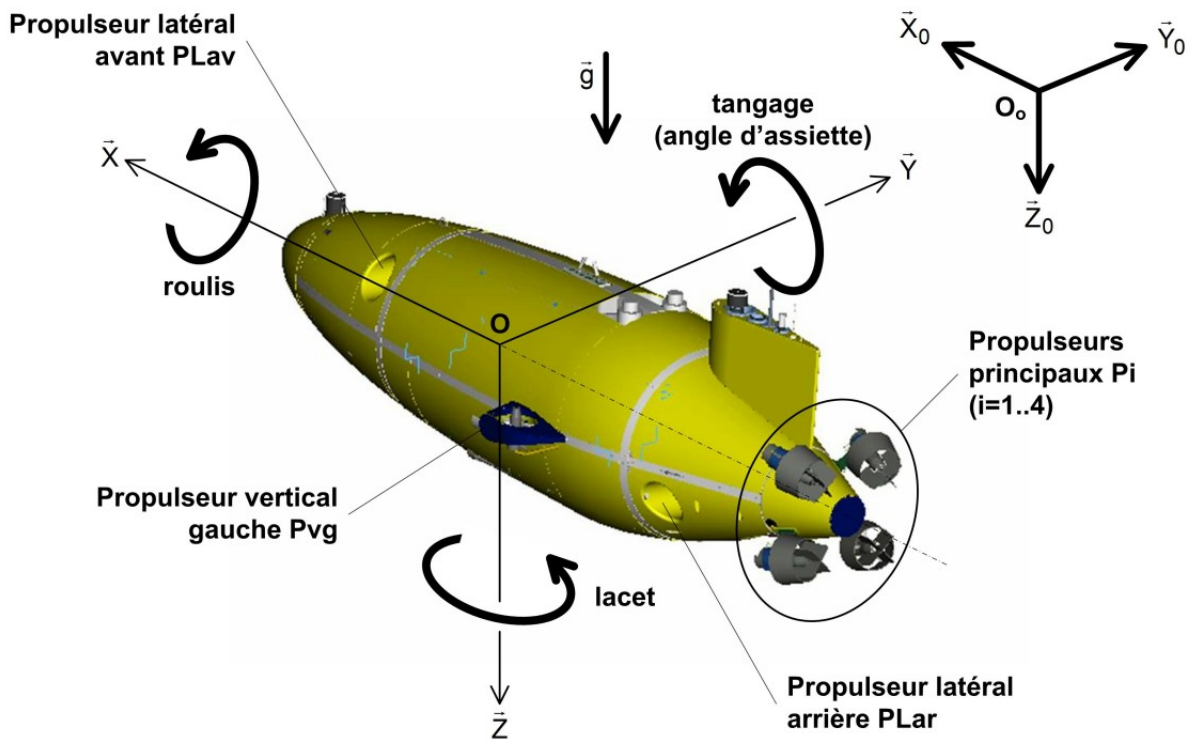


Figure 4 Positionnement des propulseurs et paramétrage angulaire de l'AUV

4 Étude : contrôler la vitesse de l'AUV

On se place toujours durant la phase d'inspection d'un pipeline rectiligne et horizontal. Au cours de son évolution, l'AUV enregistre une image de la structure externe du pipeline et effectue un balayage sonar. Ces données seront transférées, dépouillées puis analysées dès la phase de récupération en mer effectuée. La qualité de ces enregistrements dépend fortement de la qualité du contrôle du déplacement de l'AUV que ce soit la vitesse de déplacement ou en régulant la distance qui le sépare du pipeline. En ce qui concerne spécifiquement la vitesse de suivi, le schéma-bloc modélisant la commande asservie du sous-marin peut se mettre sous la forme suivante (figure 12).

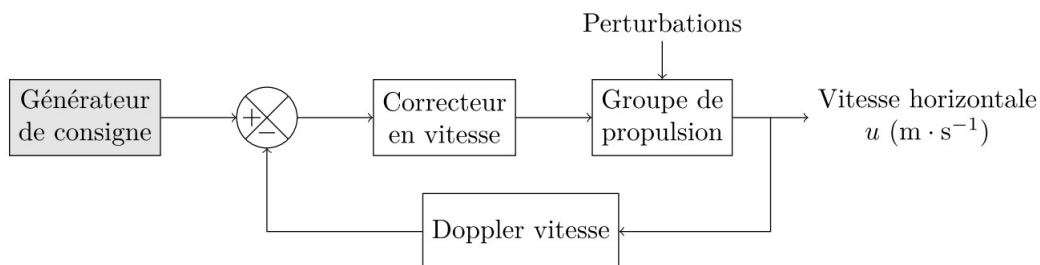


Figure 12 Modèle de commande asservie en vitesse

Lors de la phase d'inspection horizontale, seuls les propulseurs arrière P_i sont actifs et le répartiteur impose une poussée P identique sur les quatre. Ces entités du propulseur sont constitués d'un moteur à courant continu piloté en tension par modulation de largeur d'impulsion MLI et accouplé à une hélice. La variation de la tension de commande du moteur entraîne une variation de la fréquence de rotation de l'hélice modulant alors la poussée.

Le schéma-bloc du modèle de la commande en poussée est le suivant :

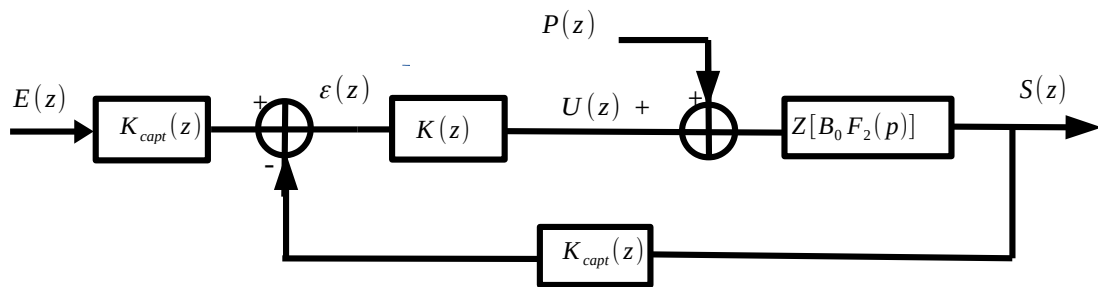


Figure 14

Le système obtenu est non linéaire. Un travail de linéarisation et d'identification numérique (non demandé dans le sujet) sur le modèle dynamique de l'AUV obtenu précédemment permet de proposer un modèle de commande asservi réaliste pour une vitesse de fonctionnement fixée. Compte-tenu des contraintes imposées notamment par les différents capteurs d'inspection, la vitesse nominale est fixée à 2 nœuds (soit $1,028 \text{ m.s}^{-1}$).

Concernant les opérations de linéarisation, on rappelle que, pour toute grandeur $x(t)$, note \bar{x} sa valeur prise au point de fonctionnement et $\tilde{x}(t)$ sa variation (d'ordre 1) autour de ce point de fonctionnement conduisant à l'écriture suivante : $x(t) = \bar{x} + \tilde{x}(t)$. Ainsi, si le schéma-bloc de la figure 14 modélise la commande en vitesse de l'AUV, en accord avec les remarques précédentes sur l'action de linéarisation, tous les signaux figurant dans ce schéma-bloc font référence à des variations autour du point de fonctionnement défini.

Notations :

- $\tilde{e}(t)$: Consigne en vitesse [m.s^{-1}].
- $E(z) = Z[\tilde{e}(t)]$: transformée en Z de $\tilde{e}(t)$.
- $\tilde{s}(t)$: Vitesse de déplacement de l'AUV [m.s^{-1}].
- $S(z) = Z[\tilde{s}(t)]$: transformée en Z de $\tilde{s}(t)$.
- $\tilde{u}(t)$: Poussée totale [N].

- $U(z) = Z[\tilde{u}(t)]$: transformée en Z de $\tilde{u}(t)$.
- $\tilde{p}(t)$: Effort de perturbation [N].
- $P(z) = Z[\tilde{p}(t)]$: transformée en Z de $\tilde{p}(t)$.

Remarque : L'effort de perturbation $\tilde{p}(t)$ est considéré comme nul pour la suite du sujet.

La fonction de transfert $F_2(p)$ est de la forme suivante : $F_2(p) = \frac{5 \times 10^{-3}}{1 + 11p}$

5 Correcteur PI

Nous souhaitons mettre en place un correcteur numérique PI pour répondre au cahier des charges.

5.1 Discrétisation du processus (1 pts)

La période d'échantillonnage du processus à discrétiser ($F_2(p)$) est $T_e = 0,5s$. Le processus est discrétisé avec un échantillonneur d'ordre zéro.

5.1.1 Donner l'expression numérique de la fonction de transfert discrétisée avec son échantillonneur bloqueur d'ordre zéro, soit $T_{2d}(z) = Z[B_0(p)F_2(p)] = \frac{b_1 z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1}}$

A compléter

$$b_1 =$$

$$a_1 =$$

5.2 Comportement en boucle fermée

Nous souhaitons en boucle fermée, un système 10 fois plus rapide et une erreur de position nulle $\varepsilon_p(t \rightarrow +\infty) = 0$.

5.2.1 Justifier le choix de la période d'échantillonnage $T_e = 0,5 s$. (0,5 pts)

5.2.2 La fonction de transfert en boucle fermée désirée, peut se mettre sous la forme

$$T_1(p) = \frac{T_1}{1 + \tau_{BF} p} . \text{ Donner l'expression numérique de } T_1 \text{ et } \tau_{BF} . \text{ (1 pts)}$$

A Compléter

$\tau_{BF} =$

$T_1 =$

5.3 Donner l'expression numérique de la fonction de transfert discrétisée
 $T_{1d}(z) = Z[B_O(p)T_1(p)]$. (1 pts)

$$T_{1d}(z) = \frac{B_1 z^{-1}}{1 + A_1 z^{-1}}$$

A Compléter

$B_1 =$

$A_1 =$

5.4 Nous souhaitons mettre en place un correcteur PI numérique de la forme $K_{pi}(z)$.

$$K_{pi}(z) = \frac{r_{0pi} + r_{1pi} z^{-1}}{1 - z^{-1}}$$

5.4.1 Pourquoi un tel correcteur permet d'annuler l'erreur de position ? (0,5 pts)

5.4.2 Déterminer l'expression numérique des coefficients du correcteur. (2 pts)

A Compléter

$r_{0pi} =$

$r_{1pi} =$

5.4.3 Déterminer le temps de réponse à 5% pour un échelon unitaire. (1 pts)

5.4.4 Déterminer l'expression numérique de l'erreur à une entrée de consigne de type rampe unitaire. (1 pts)

6 Correcteur PID

Nous souhaitons mettre en place un correcteur numérique PID pour répondre au cahier des charges.

6.1 Comportement en boucle fermée

Nous souhaitons un comportement en boucle fermée de type second ordre de la forme

$$T_1(p) = \frac{T_1}{\frac{p^2}{\omega_1^2} + \frac{2m_1 p}{\omega_1} + 1} .$$

$$\text{avec } T_1=1 \text{ , } m_1=1 \text{ , } \omega_1 = \frac{14}{\tau} \text{ rad.s}^{-1} \text{ avec } \tau=11 \text{ s .}$$

Pour un correcteur numérique PID, la fonction de transfert en boucle fermée est d'ordre 3. Pour construire cette fonction de transfert, notée $T_{pid}(p) = T_1(p)T(p)$, nous choisissons

$$T(p) = \frac{1}{1 + 1 \times 10^{-3} p} .$$

6.1.1 Justifier que les fonctions de transfert $T_{pid}(p)$ et $T_1(p)$ sont similaires ? **(1 pts)**

6.1.2 Donner l'expression numérique de la fonction de transfert discrétisée avec son échantillonneur bloqueur d'ordre zéro, soit $T_d(z) = Z[B_0(p)T_{pid}(p)]$ avec une période d'échantillonnage $Te = 0,5 \text{ s}$. **(0,15 pts)**

$$T_d(z) = \frac{b'_1 z^{-1} + b'_2 z^{-2} + b'_3 z^{-3}}{1 + p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2} + p_3 z^{-3}}$$

A compléter

$$b'_1 =$$

$$b'_2 =$$

$$b'_3 =$$

$$p_1 =$$

$$p_2 =$$

$$p_3 =$$

6.1.3 Justifier le choix de la période d'échantillonnage. **(0,5 pts)**

6.2 Nous souhaitons mettre en place un correcteur PID numérique de la forme $K_{pid}(z)$. (3 pts)

$$K_{pid}(z) = \frac{r_{0pid} + r_{1pid} z^{-1} + r_{2pid} z^{-2}}{1 - z^{-1}}$$

6.2.1 A compléter

$$r_{0\text{ pid}} =$$

$$r_{1\text{ pid}} =$$

$$r_{2\text{ pid}} = ,$$

6.2.2 Déterminer le temps de réponse à 5 % (1 pts)

6.2.3 Déterminer l'expression numérique de l'erreur à une entrée de consigne de type rampe unitaire. (1 pts)

7 Correcteur polynomial

Nous souhaitons mettre en place un correcteur numérique polynomial pour répondre au cahier des charges.

7.1 Factorisation de la fonction de transfert en boucle ouverte

La fonction de transfert en boucle ouverte établie précédemment $T_{2d}(z)$ peut-être factorisée

de la sorte
$$T_{2d}(z) = \frac{B^+(z)B^-(z)}{A^+(z)A^-(z)S_m(z)} = \frac{b_1 z^{-1}}{1+a_1 z^{-1}}$$
 avec :

- $B^+(z)$: polynôme dont les racines (zéros) sont stables en puissance de z négative. Soit à l'intérieur du cercle unité du plan des z .
- $B^-(z)$: polynôme dont les racines (zéros) sont instables en puissance de z négative. Soit à l'extérieur du cercle unité du plan des z .
- $A^+(z)$: polynôme dont les racines (pôles) sont stables en puissance de z négative. Soit à l'intérieur du cercle unité du plan des z .
- $A^-(z)$: polynôme dont les racines (pôles) sont instables en puissance de z négative . Soit à l'extérieur du cercle unité du plan des z .
- $S_m(z) = (1-z^{-1})^m$: nombre d'intégrateurs qui définissent la classe m du système. en puissance de z négative

L'expression de $B^-(z)$ est donnée : $B^-(z) = b_1 z^{-1}$.

7.1.1 A compléter en fonction de a_1 et b_1 : (2 pts)

$$B^+(z) =$$

$$A^+(z) =$$

$$A^-(z) =$$

$$S_m(z) =$$

7.2 Comportement en boucle fermée

Nous souhaitons en boucle fermée, un système 11 fois plus rapide et une erreur de position nulle $\varepsilon_p(t \rightarrow +\infty) = 0$.

7.2.1 La fonction de transfert en boucle fermée désirée, peut se mettre sous la forme

$$T_4(p) = \frac{T_{40}}{1 + \tau_4 p} . \text{ Donner l'expression numérique de } T_{40} \text{ et } \tau_4 . \text{ (1 pts)}$$

A compléter :

$$\tau_4 = \qquad T_{40} =$$

7.2.2 Donner l'expression numérique de la fonction de transfert discrétisée $T_{4d}(z) = Z[B_o(p)T_4(p)]$. **(1 pts)**

$$T_{4d}(z) = \frac{C_1 z^{-1}}{1 + D_1 z^{-1}}$$

A compléter

$$C_1 = \qquad D_1 =$$

7.2.3 Justifier le choix de la période d'échantillonnage $T_e = 0,5 \text{ s}$. **(0,5 pts)**

7.3 Nous souhaitons mettre en place un correcteur polynomial numérique de la forme $K_p(z)$.

$$K_p(z) = \frac{\theta(z)A^+(z)S_m(z)}{B^+(z)\Pi_1(z)S_r(z)}$$

7.3.1 Établir l'équation diophantienne permettant de calculer le correcteur. **(1,5 pts)**

7.3.2 Donner l'expression numérique des polynômes $\theta(z)$ et $\Pi_1(z)$ en puissance de z négative. **(2 pts)**

A compléter

$$\theta(z) = \qquad \Pi_1(z) =$$

7.3.3 Déterminer le temps de réponse à 5% pour un échelon unitaire. **(1 pts)**

7.3.4 Déterminer l'expression numérique de l'erreur à une entrée de consigne de type rampe unitaire.
(1,5 pts)

8 Conclusion (1,5 pts)

Pour chaque correcteur, indiquer si le cahier des charges est respecté.