

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.

Les parties II et III sont indépendantes

Bassin de traction du LHEEA

I. Présentation

Le système étudié, nommé bassin de traction, est un des nombreux bassins d'essais du *Laboratoire de recherche en Hydrodynamique, Energétique et Environnement Atmosphérique (LHEEA)* situé à Nantes.

Ce bassin de traction mesure 140 m de long, 5 m de large, et a une profondeur constante de 3 m. Il est équipé d'un **chariot de traction** (Figure 1) pouvant se déplacer dans l'une ou l'autre des directions, avec des vitesses atteignant jusqu'à $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. À une extrémité du bassin se trouve un **batteur à houle** (Figure 2) permettant de générer des houles unidirectionnelles régulières de hauteur crête-à-croix maximale de 0,5 m. A son autre extrémité, une plage d'amortissement sert à faire déferler les vagues pour limiter leur réflexion dans le bassin.



Figure 1 : Chariot de traction



Figure 2 : Batteur à houle

Ce bassin, 2^{ème} plus grand bassin de traction en France et le 1^{er} au niveau académique, permet de mener un certain nombre d'expériences :

- études de navires sur eau calme et sur houle ;
- tests de résistance à l'avancement de navires avec ou sans houle ;
- optimisations de carènes, tenue à la mer de navires ou structures flottantes ;
- tests de technologies en Energies Marines Renouvelables.

Il a par exemple servi aux tests menés sur la nouvelle hydrolienne développée par Alstom (Figure 3).

L'industriel a utilisé une maquette de l'hydrolienne sur ce bassin de traction afin d'étudier son comportement pendant la phase de remorquage et, ainsi, vérifier jusqu'à quel état de mer elle pouvait être tractée.

Le diagramme de définition de blocs du chariot de traction (Figure 4) et le cahier des charges partiel du bassin (Figure 5) sont donnés page suivante.



Figure 3 : Maquette de l'Hydrolienne testée par Alstom

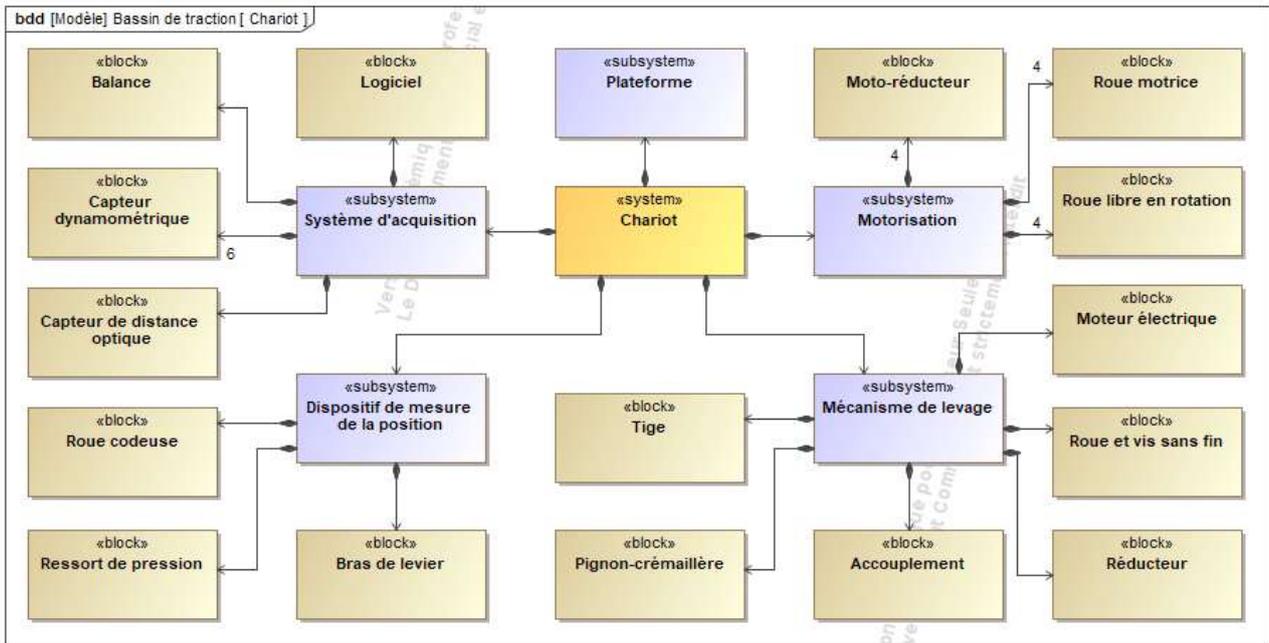


Figure 4 : Diagramme de définition de blocs du chariot de traction

Id	Exigences	Id	Exigences	Niveaux
1	Déplacer la maquette en ligne droite, dans les 2 sens			
1.1	Garantir un déplacement du chariot à vitesse constante	1.1.1	Rapidité : Temps de réponse à 5%	$T_{r5\%} \leq 3s$
		1.1.2	Stabilité : Marge de gain	$M_G \geq 12dB$
			Marge de phase	$M_\varphi \geq 45^\circ$
		1.1.3	Précision : Erreur statique pour une entrée : $v_c(t) = V_0$ avec $V_0 = 8 m \cdot s^{-1}$	$\varepsilon_S = 0$
1.1.4	Sensibilité aux perturbations	Chute de vitesse inférieure à 10%		
2	Générer une houle unidirectionnelle régulière			Hauteur maximale de houle supérieure à 40cm

Figure 5 : Cahier des charges partiel du bassin de traction

II. Étude de l'exigence 1.1 : « Garantir un déplacement du chariot à vitesse constante »

Objectif : Modéliser l'asservissement en vitesse du chariot de traction puis régler les paramètres du correcteur afin de satisfaire tous les critères de l'exigence 1.1 du cahier des charges.

Dans toute cette partie, on se placera dans les conditions de Heaviside.

II.1. Principe de fonctionnement

Le chariot est composé (comme l'indique le Diagramme de Définition de Blocs en Figure 4) de quatre roues motrices et de quatre roues libres en rotation.

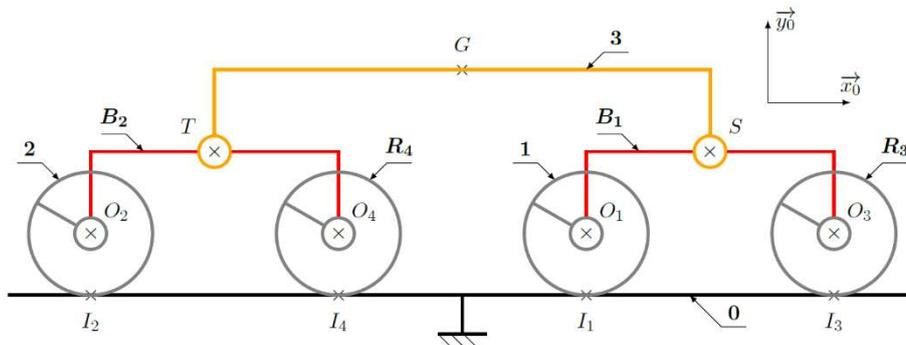


Figure 6 : Schéma cinématique du demi-chariot (moteurs et réducteurs non représentés)

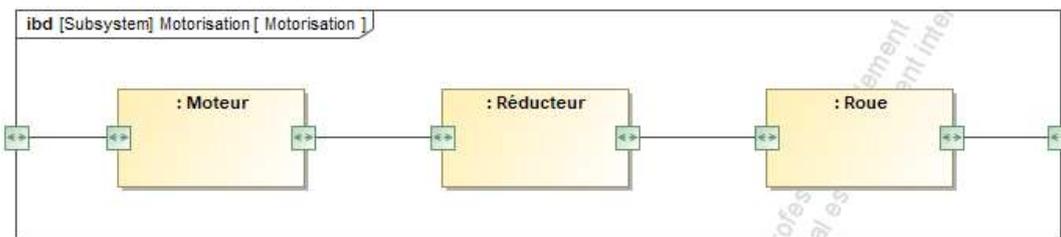


Figure 7 : Chaîne de puissance partielle de la motorisation pour une roue motrice

II.2. Modélisation de l'asservissement en vitesse

Modèles de connaissance :

On étudie l'asservissement en vitesse du chariot de traction dont le schéma-blocs est à compléter sur le document réponses :

- Un **adaptateur** de gain K_1 permet de fournir l'image $U_C(p)$ de la consigne de vitesse $V_C(p)$.
- Un **capteur de vitesse en rotation** de gain K_C renvoie une tension $U_{mes}(p)$ proportionnelle à la vitesse de rotation $\Omega_R(p)$ de la roue.
- L'écart $\varepsilon_U(p)$ entre $U_C(p)$ et $U_{mes}(p)$ est ensuite corrigé par un **correcteur** de fonction de transfert $C(p)$ afin de piloter un **variateur** de gain K_2 .
- La tension de commande $U_m(p)$ du **moteur** va induire la vitesse angulaire $\Omega_m(p)$ de l'axe moteur.
- Le moteur est un **moteur à courant continu** dont on donne le modèle de connaissance :
 - $u_m(t) = e(t) + R_m \cdot i_m(t) + L_m \cdot \frac{di_m(t)}{dt}$ (loi des mailles)
 - $e(t) = k_e \cdot \omega_m(t)$ (équation électromagnétique)
 - $c_m(t) = k_t \cdot i_m(t)$ (équation électromagnétique)
 - $c_m(t) - c_r(t) = J_e \cdot \frac{d\omega_m(t)}{dt}$ (équation de la dynamique).
- Un **réducteur de vitesse** de gain K_3 puis le **système roue-rail** de gain R (où R est le rayon de la roue) transforment le mouvement pour obtenir une vitesse $V(p)$ de translation du chariot.
- On notera $F_{res}(p)$ la force de l'eau sur la maquette en mouvement. $C_{res}(p)$ représente le couple équivalent à $F_{res}(p)$ ramené sur l'axe moteur :
 - $C_{res}(p) = K_4 \cdot F_{res}(p)$

$K_1, K_C, K_2, R_m, L_m, k_e, k_t, J_e$ et K_4 sont des constantes réelles positives.

Question 1 : Après avoir appliqué la transformée de Laplace au modèle de connaissance du moteur, compléter le cadre pointillé du schéma blocs de l'asservissement en vitesse du chariot.

Question 2 : Compléter le reste du schéma blocs de l'asservissement en vitesse du chariot.
On indiquera les fonctions de transfert des différents blocs ainsi que les variables entre blocs manquantes.

Question 3 : Montrer que le schéma blocs peut se mettre sous la forme proposée dans le document réponses où la perturbation a été décalée en amont du moteur (on complètera les autres blocs, restant inchangés par rapport à Q2.).
On déterminera l'expression de : K en fonction de K_a , R_m et k_t
 T en fonction de R_m et L_m
 $H_m(p)$, sous forme canonique, en fonction R_m , L_m , J_e , k_t et k_e .

Question 4 : Exprimer le gain K_1 de l'adaptateur en fonction de K_c et R afin que le système soit correctement asservi.

On considèrera cette condition remplie par la suite et on notera $H_m(p) = \frac{K_m}{(1+T_e \cdot p) \cdot (1+T_m \cdot p)}$

II.3. Influence de la perturbation sur la réponse

A partir de la modélisation initiale, on peut établir le schéma-blocs à retour unitaire de la Figure 8 :

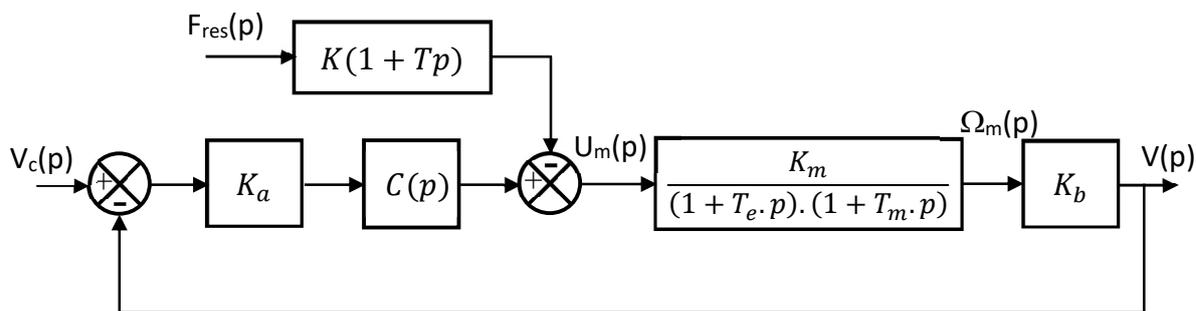


Figure 8 : Schéma blocs à retour unitaire

Question 5 : Déterminer l'expression de K_a et de K_b en fonction de K_2 , K_3 , K_c et R .

On fera dans un premier temps le choix d'un correcteur proportionnel : $C(p) = C$

On notera $V(p) = H_1(p) \cdot V_c(p) - H_2(p) \cdot F_{res}(p)$.

Par souci de simplification, on notera également $K_{BO} = C \cdot K_a \cdot K_b \cdot K_m$

Question 6 : Déterminer, sous forme canonique, l'expression littérale des fonctions de transfert $H_1(p)$ et $H_2(p)$ en fonction de K_{BO} , K_m , K , K_b , T_e , T_m et T .

Question 7 : En absence de perturbation, exprimer $v(+\infty)$ en régime permanent lorsque la vitesse de consigne est un échelon d'amplitude V_0 .

Conclure sur l'exigence 1.1.3 du cahier des charges.

La perturbation $F_{res}(p)$ de cet asservissement correspond à l'action de l'eau sur la maquette en mouvement. On souhaite déterminer ici la condition sur le gain C du correcteur proportionnel (on notera C_{pert} cette condition) permettant de négliger l'influence de cette perturbation vis-à-vis de la réponse à la consigne. Pour cela, on cherchera à vérifier que la chute de vitesse induite par la perturbation est inférieure à 10% de la vitesse atteinte par le chariot en régime permanent.

Question 8 : Exprimer la chute de vitesse $\Delta v(+\infty)$ à l'apparition d'une perturbation $F_{res}(t)$ modélisée par un échelon d'amplitude F_0 .

Question 9 : Déterminer l'expression du gain C_{pert} du correcteur permettant de satisfaire l'exigence 1.1.4 du cahier des charges.

III. Étude de l'exigence 2 : « Générer une houle unidirectionnelle régulière »

Objectif : Établir la loi entrée-sortie du batteur de houle et vérifier l'exigence 2 du cahier des charges.

III.1. Principe de fonctionnement

La houle est générée par un batteur de houle constitué d'un ensemble de volets situé à l'une des extrémités du bassin (voir Figure 2).

Nous nous intéresserons dans cette partie à la cinématique **d'un seul volet**.

Ce volet est mis en mouvement par un vérin double effet alimenté par un groupe hydraulique.

III.2. Modélisation cinématique et paramétrage

La modélisation cinématique du système de génération de la houle est donnée Figure 9. La tige de vérin (**8**), mise en mouvement par rapport au corps du vérin (**9**) à partir de la puissance hydraulique fournie par le groupe hydraulique, va mettre en mouvement de rotation (alternatif) le volet (**7**) par rapport au bâti (**0**).

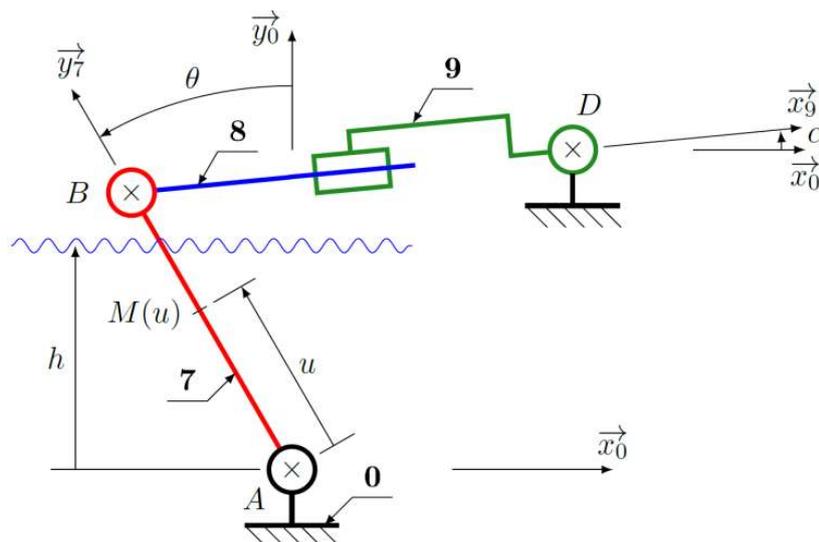


Figure 9 : Schéma cinématique du mécanisme de mise en mouvement d'un volet

- Le **volet 7**, auquel on associe le repère $R_7(A, \vec{x}_7, \vec{y}_7, \vec{z}_7)$, est en liaison pivot d'axe (A, \vec{z}_0) avec le **bâti 0** auquel on associe le repère $R_0(A, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$. On note $\theta(t) = (\vec{y}_0, \vec{y}_7)$; $-30^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$.

Le point A est fixe et on note $\overline{AB} = b \cdot \vec{y}_7$.

- Le **corps du vérin 9**, auquel on associe le repère $R_9(D, \vec{x}_9, \vec{y}_9, \vec{z}_9)$, est en liaison pivot d'axe (D, \vec{z}_0) avec le bâti 0 tel que $\alpha(t) = (\vec{x}_0, \vec{x}_9)$.
- La **tige du vérin 8**, auquel on associe le repère $R_8(B, \vec{x}_8, \vec{y}_8, \vec{z}_8)$, est :
 - en liaison pivot glissant d'axe (D, \vec{x}_9) avec le corps 9 tel que $\overline{BD} = \lambda(t) \cdot \vec{x}_9$.
On note et $\overline{AD} = d \cdot \vec{x}_0 + b \cdot \vec{y}_0$.
 - en liaison pivot d'axe (B, \vec{z}_0) avec le volet 7.

Question 10 : Réaliser le graphe de liaisons du mécanisme de mise en mouvement d'un volet.

Question 11 : Tracer les figures géométrales associées aux mouvements dans ce mécanisme.

Question 12 : A l'aide d'une équation de fermeture géométrique, déterminer l'expression de l'allongement du vérin $\lambda(t)$ en fonction de l'angle du volet $\theta(t)$, de d et de b .

La courbe représentative de la fonction $\lambda = f(\theta)$ obtenue question 12 est donnée sur le document réponses.

Question 13 : Déterminer graphiquement la course du vérin pour la plage angulaire d'utilisation du batteur de houle.

Question 14 : Proposer une linéarisation de la loi entrée sortie $\lambda = f(\theta)$ sur la plage angulaire d'utilisation du batteur de houle.

Le document réponses montre le schéma cinématique du batteur de houle dans la position $\theta = 0^\circ$.

Question 15 : Tracer, par-dessus, le schéma cinématique du batteur de houle dans la position $\theta = 30^\circ$.

III.3. Détermination des caractéristiques du mouvement du volet pour générer la houle la plus énergivore

La Figure 10 proposée ci-après montre le couple (Hauteur, Fréquence) de la houle qui peut être générée par le bassin de traction du LHEEA (géométrie du batteur en fonction de la géométrie du bassin).

La zone « foncée » correspond aux caractéristiques d'une houle impossible à générer.

La zone « claire » correspond aux caractéristiques d'une houle que l'on peut générer. La zone « claire » est encadrée par 3 courbes. Ces 3 courbes correspondent aux hauteurs maximales, à fréquence fixée, qu'on peut générer :

- Aux faibles fréquences, il faut un mouvement du batteur de grande amplitude (grand volume à déplacer), c'est donc le **débattement** maximal du volet, entre ses capteurs de fin de course, qui limite l'amplitude des vagues.
- Aux fortes fréquences, si on augmente l'amplitude de mouvement du volet, on finit par observer que les vagues déferlent (**déferlement**) et on ne peut générer des hauteurs plus grandes, même en augmentant encore l'amplitude de mouvement.

Entre ces 2 régimes, pour ce volet à vérin hydraulique, c'est la **vitesse** maximale permise par le système hydraulique qui limite la hauteur de houle.

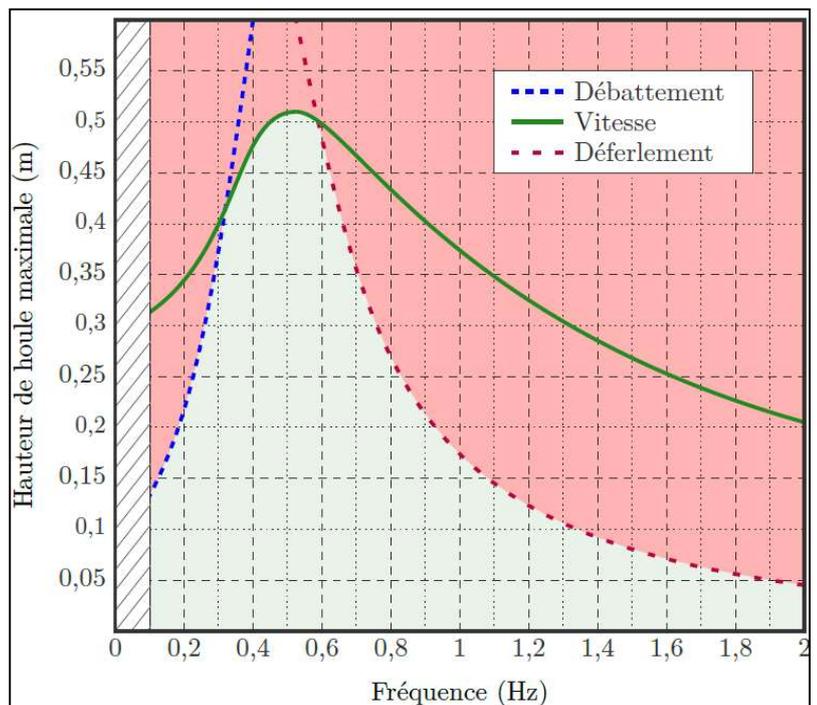


Figure 10 : Caractéristiques de la houle réalisable par le batteur du LHEEA

Chaque case du tableau, fourni dans le document réponses, correspond au produit de $f_H \times a_0$ où a_0 représente la hauteur maximale de la houle et f_H représente la fréquence de la houle.

Question 16 : Compléter le tableau du document réponses en barrant d'une croix toutes les cases dont le produit $f_H \times a_0$ de la houle est impossible à atteindre.

En entourant la valeur maximale du produit $f_H \times a_0$ pour une houle réalisable, conclure sur l'exigence 2 du cahier des charges.

Afin d'que la houle atteigne la hauteur maximale déterminée à la question précédente, le volet doit avoir un mouvement de la forme sinusoïdale de même fréquence que la houle qu'il génère : $\lambda(t) = \lambda_0 \cdot \sin(\omega_v \cdot t)$

Question 17 : Déterminer la pulsation ω_v du mouvement du volet afin que la houle atteigne la hauteur maximale.