

1 Quille pendulaire - CCMP PSI 2014

1.1 Présentation

La conception des voiliers de course, dans un contexte de forte compétitivité sportive et technique, utilise toutes les évolutions récentes afin d'améliorer performances et sécurité. Dès les premiers stades de la conception du navire, l'architecte naval intègre les exigences des différents spécialistes qui collaborent au projet. A ce titre la conception d'un voilier de course océanique est analogue à la conduite d'un projet industriel classique où les intervenants s'inscrivent dans une démarche collaborative pilotée par un coordonnateur du projet. L'étude proposée s'intéresse à quelques aspects de la conception d'une quille pendulaire équipant un monocoque 60' IMOCA.

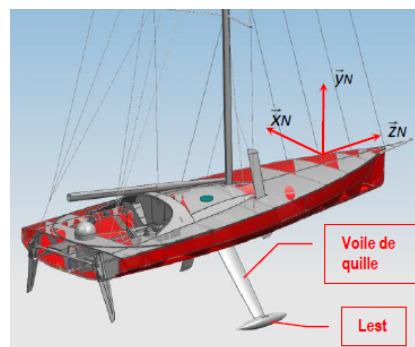


FIGURE 1 – Voilier 60' IMOCA

1.1.1 Analyse structurelle du système

Le comportement dynamique d'un voilier est conditionné par ses interactions avec les deux fluides avec lesquels il entre en contact : l'air et l'eau. Il reçoit de l'énergie sous la forme des actions aérodynamiques dues au mouvement relatif air/voiles. Ces actions mécaniques le font avancer et provoquent son inclinaison autour de son axe longitudinal (axe de direction \vec{z}_N sur la FIGURE 1). C'est le phénomène de gîte. Pour contrebalancer ce mouvement et éviter que le voilier ne se couche sur l'eau, la quille joue le rôle de contrepoids. Cette quille est généralement constituée d'un voile immergé dans l'eau à l'extrémité duquel se trouve un lest profilé. L'efficacité de la quille dépend de la masse du lest et de la longueur du voile. Ces deux paramètres présentent des limitations : le lest ne peut être trop important sous peine de solliciter dangereusement le voile de quille et la longueur de quille est limitée par le tirant d'eau maximal admissible (il faut permettre l'entrée dans les ports sans toucher le fond!).

1.1.2 Cahier des charges

Le cahier des charges du système est donné à la FIGURE 2.

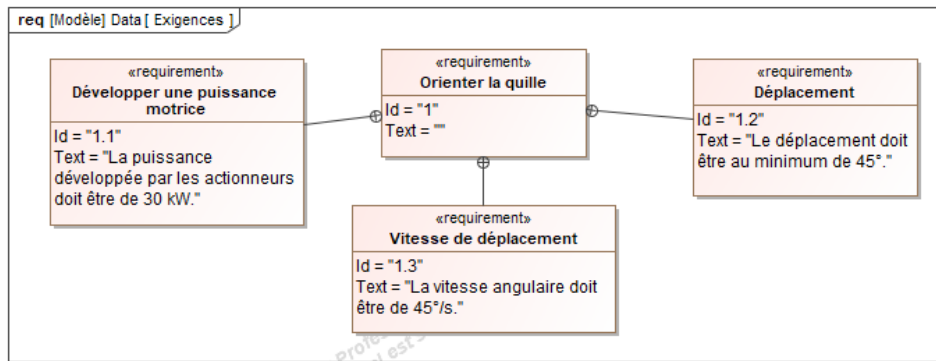


FIGURE 2 – Diagramme des exigences partiel

Objectif

L'objectif du travail proposé est de vérifier que la chaîne d'énergie est correctement dimensionnée pour permettre le déplacement de la quille pendulaire.

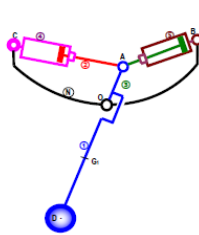
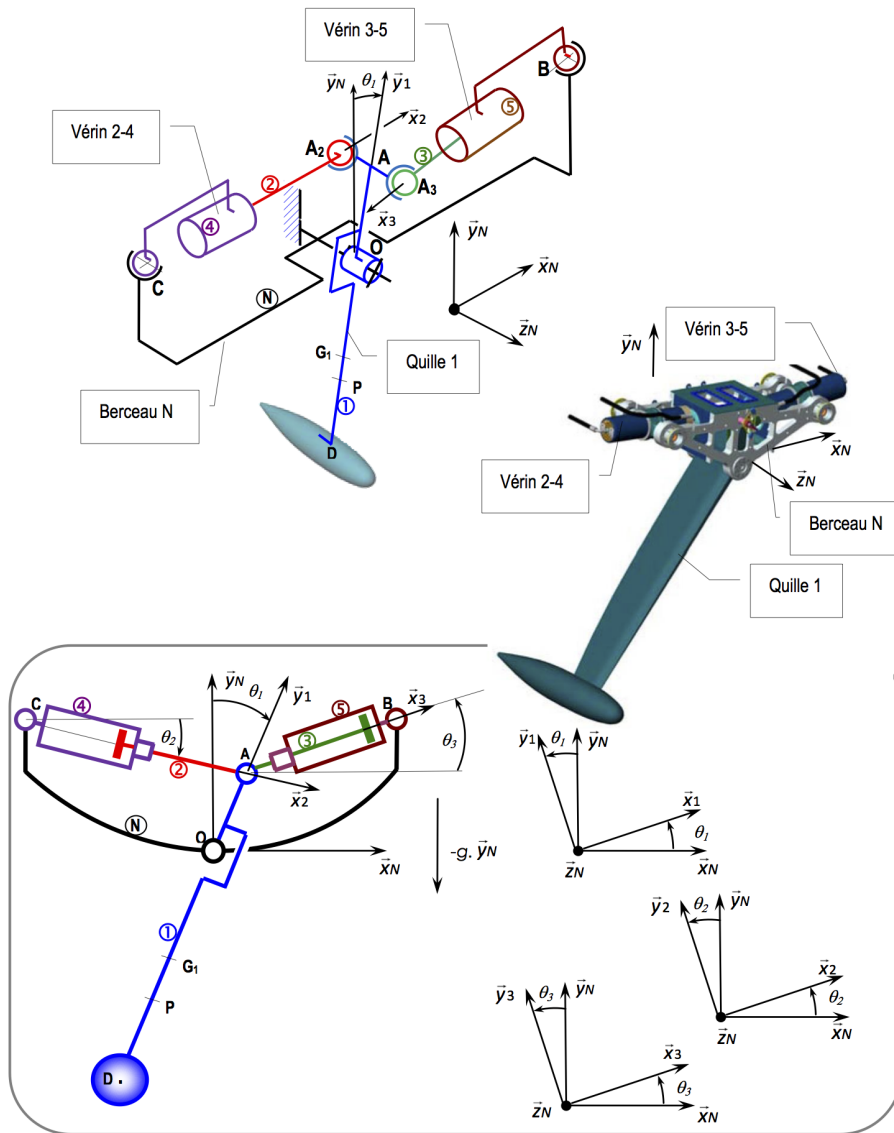
1.2 Modéliser le système

La quille pendulaire est en liaison pivot d'axe (O, \vec{z}_N) avec la coque du navire et peut être orientée d'un côté ou de l'autre du navire. Une fois l'orientation désirée obtenue, tout mouvement dans la liaison pivot est supprimé par le blocage en rotation de celle-ci. La mise en mouvement et le blocage en position de la quille sont réalisés par des chaînes fonctionnelles indépendantes.

1.2.1 Modélisation et paramétrage de la chaîne d'énergie du système

La chaîne d'énergie du système étudié est composée (voir FIGURE 3) :

- du berceau **N** encastré sur la coque du navire et dont le repère associé est $R_N(O, \vec{x}_N, \vec{y}_N, \vec{z}_N)$;
- de la quille **1** constituée du voile et du lest d'extrémité et dont le repère associé est $R_1(O, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_N)$;
- du vérin **2-4** constitué du piston **2** et du cylindre **4** et dont les repères associés sont respectivement $R_2(A, \vec{x}_2, \vec{y}_2, \vec{z}_N)$ et $R_4(C, \vec{x}_2, \vec{y}_2, \vec{z}_N)$ (la rotation relative **2-4** ne sera pas prise en compte dans l'étude et donc les bases de R_2 et R_4 sont confondues) ;
- du vérin **3-5** constitué du piston **3** et du cylindre **5** et dont les repères associés sont respectivement $R_3(A, \vec{x}_3, \vec{y}_3, \vec{z}_N)$ et $R_5(B, \vec{x}_3, \vec{y}_3, \vec{z}_N)$ (la rotation relative **3-5** ne sera pas prise en compte dans l'étude et donc les bases de R_3 et R_5 sont confondues).



Modèle 2D :

Données géométriques

Le plan de l'étude est : (A ; \bar{x}_N , \bar{y}_N).

Dans ce modèle, les points A_2 et A_3 sont confondus avec le point A ($d=0$), et les points C et B sont projetés dans le plan (A ; \bar{x}_N , \bar{y}_N).

$\vec{OA} = R \cdot \bar{y}_1$; $\vec{OC} = -a \cdot \bar{x}_N + b \cdot \bar{y}_N$; $\vec{OB} = a \cdot \bar{x}_N + b \cdot \bar{y}_N$; $\vec{DO} = L t_1 \cdot \bar{y}_1$

avec $R > 0$, $a > 0$, $b > 0$ et $L t_1 > 0$.

$\vec{CA} = x_{24} \cdot \bar{x}_2$ ($t \rightarrow x_{24}(t)$) ; $\vec{AB} = x_{35} \cdot \bar{x}_3$ ($t \rightarrow x_{35}(t)$).

Liaison	type	Caractéristique géométrique	Paramètre(s)	Liaison	type	Caractéristique géométrique	Paramètres
N/1	Pivot	Axe (O, \bar{z}_N)	$\theta_1 = (\bar{x}_N, \bar{x}_1)$	2/4	Glissière	Direction \bar{x}_2	$\vec{CA} = x_{24} \cdot \bar{x}_2$
N/4	Pivot	Axe (C, \bar{z}_N)	$\theta_2 = (\bar{x}_N, \bar{x}_2)$	5/3	Glissière	Direction \bar{x}_3	$\vec{AB} = x_{35} \cdot \bar{x}_3$
N/5	Pivot	Axe (B, \bar{z}_N)	$\theta_3 = (\bar{x}_N, \bar{x}_3)$	2/1	Pivot	Axe (A, \bar{z}_N)	
				3/1	Pivot	Axe (A, \bar{z}_N)	

FIGURE 3 – Modèle cinématique

Solide	Masse	Centre d'inertie	Matrice d'inertie
1	M_1	G1 : $\overline{OG1} = -L_1 \vec{y}_1 \quad L_1 > 0$	$[[I(G1,1)]] = \begin{bmatrix} A1 & 0 & 0 \\ 0 & B1 & -D1 \\ 0 & -D1 & C1 \end{bmatrix}_{(\vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_N)}$
2	M_2	G2 : $\overline{AG2} = -L_2 \vec{x}_2 \quad L_2 > 0$	$[[I(G2,2)]] = \begin{bmatrix} A2 & 0 & 0 \\ 0 & B2 & 0 \\ 0 & 0 & B2 \end{bmatrix}_{(\vec{x}_2, \vec{y}_2, \vec{z}_N)}$
3	$M_3 = M_2$	G3 : $\overline{AG3} = +L_2 \vec{x}_3 \quad L_2 > 0$	$[[I(G3,3)]] = \begin{bmatrix} A3 & 0 & 0 \\ 0 & B3 & 0 \\ 0 & 0 & B3 \end{bmatrix}_{(\vec{x}_3, \vec{y}_3, \vec{z}_N)}$ $A3=A2, B3=B2$
4	M_4	C	$[[I(C,4)]] = \begin{bmatrix} A4 & 0 & 0 \\ 0 & B4 & 0 \\ 0 & 0 & C4 \end{bmatrix}_{(\vec{x}_2, \vec{y}_2, \vec{z}_N)}$
5	$M_5 = M_4$	B	$[[I(B,5)]] = \begin{bmatrix} A5 & 0 & 0 \\ 0 & B5 & 0 \\ 0 & 0 & C5 \end{bmatrix}_{(\vec{x}_3, \vec{y}_3, \vec{z}_N)}$ $A5=A4, B5=B4 \text{ et } C5=C4$

FIGURE 4 – Données massiques et inertielles

1.2.2 Modélisation des actions mécaniques

Le bateau est supposé à l'arrêt et son repère R_N est galiléen.

Les liaisons sont supposées parfaites. Le mouvement du fluide dans les diverses canalisations s'accompagne d'un phénomène de frottement visqueux défini en FIGURE 5. L'eau exerce sur le voile de quille une action hydrodynamique définie en FIGURE 5, où F_p est une composante de portance et F_t est une composante de traînée.

Actions de		Origine	Torseur représentatif	Actions sur		Origine	Torseur représentatif
de	sur			de	sur		
Huile	2	Pression hydraulique vérin 2-4	$\{ph \rightarrow 2\} : \begin{bmatrix} F_{h2} \vec{x}_2 \\ \vec{0} \end{bmatrix}_C$	Huile	2	Frottement visqueux vérin 2-4	$\{phf \rightarrow 2\} : \begin{bmatrix} -k \cdot \frac{dx_{24}}{dt} \cdot \vec{x}_2 \quad (k>0) \\ \vec{0} \end{bmatrix}_A$
Huile	3	Pression hydraulique vérin 3-5	$\{ph \rightarrow 3\} : \begin{bmatrix} -F_{h3} \vec{x}_3 \\ \vec{0} \end{bmatrix}_B$	Huile	3	Frottement visqueux vérin 3-5	$\{phf \rightarrow 3\} : \begin{bmatrix} k \cdot \frac{dx_{35}}{dt} \cdot \vec{x}_3 \quad (k>0) \\ \vec{0} \end{bmatrix}_A$
				Eau	1	Actions hydrodynamiques	$\{eau \rightarrow 1\} : \begin{bmatrix} F_p \vec{z}_1 + F_t \vec{x}_1 \\ \vec{0} \end{bmatrix}_P$ $\overline{OP} = -h \vec{y}_1 \quad h > 0$

FIGURE 5 – Actions mécaniques

1.3 Déterminer les énergies cinétiques galiléennes

Question 1 Exprimer les vitesses suivantes :

- (a) $\overrightarrow{V_{G_1 \in 1/N}}$ en fonction de $\frac{d\theta_1}{dt}$ et des paramètres géométriques utiles ;
 (b) $\overrightarrow{V_{G_2 \in 2/N}}$ en fonction de $\frac{d\theta_2}{dt}$, $\frac{dx_{24}}{dt}$, x_{24} et des paramètres géométriques utiles ;
 (c) $\overrightarrow{V_{G_3 \in 3/N}}$ en fonction de $\frac{d\theta_3}{dt}$, $\frac{dx_{35}}{dt}$, x_{35} et des paramètres géométriques utiles ;
 (d) $\overrightarrow{V_{A \in 2/4}}$ en fonction de $\frac{dx_{24}}{dt}$.

$$(a) \Rightarrow \overrightarrow{V_{G_1 \in 1/N}} = \left[\frac{d\overrightarrow{OG_1'}}{dt} \right]_N = -L_1 \left[\frac{d\vec{y}_1'}{dt} \right]_N = -L_1 \overrightarrow{\Omega_{1/N}} \wedge \vec{y}_1' = \boxed{L_1 \dot{\theta}_1 \cdot \vec{x}_1'}$$

$$(b) \Rightarrow \overrightarrow{V_{G_2 \in 2/N}} = \left[\frac{d\overrightarrow{CG_2'}}{dt} \right]_N = \left[\frac{d(x_{24} - L_2) \vec{x}_2'}{dt} \right]_N = \dot{x}_{24} \vec{x}_2' + \dot{\theta}_2 \vec{z}_N \wedge (x_{24} - L_2) \vec{x}_2' \\ = \boxed{\dot{x}_{24} \cdot \vec{x}_2' + (x_{24} - L_2) \dot{\theta}_2 \cdot \vec{y}_2'}$$

$$(c) \Rightarrow \overrightarrow{V_{G_3 \in 3/N}} = \left[\frac{d\overrightarrow{BG_3'}}{dt} \right]_N = \left[\frac{d(-x_{35} + L_3) \cdot \vec{x}_3'}{dt} \right]_N = -\dot{x}_{35} \cdot \vec{x}_3' + \dot{\theta}_3 \cdot \vec{z}_N \wedge (-x_{35} + L_3) \cdot \vec{x}_3' \\ = \boxed{-\dot{x}_{35} \cdot \vec{x}_3' + (-x_{35} + L_3) \dot{\theta}_3 \cdot \vec{y}_3'}$$

$$(d) \Rightarrow \overrightarrow{V_{A \in 2/4}} = \left[\frac{d\overrightarrow{CA}}{dt} \right]_4 = \left[\frac{dx_{24} \vec{x}_2'}{dt} \right]_4 = \boxed{\dot{x}_{24} \cdot \vec{x}_2'}$$

Question 2 Déterminer les énergies cinétiques suivantes :

- (a) énergie cinétique galiléenne du solide **1** dans son mouvement par rapport à **N**, $E_{c(1/N)}$, en fonction de $\frac{d\theta_1}{dt}$ et des paramètres inertiels et géométriques utiles ;
 (b) énergie cinétique galiléenne du solide **2** dans son mouvement par rapport à **N**, $E_{c(2/N)}$, en fonction de $\frac{d\theta_2}{dt}$, $\frac{dx_{24}}{dt}$, x_{24} et des paramètres inertiels et géométriques utiles ;
 (c) énergie cinétique galiléenne du solide **4** dans son mouvement par rapport à **N**, $E_{c(4/N)}$, en fonction de $\frac{d\theta_2}{dt}$ et des paramètres inertiels et géométriques utiles.

(a) \Rightarrow Le solide **1** est en rotation d'axe fixe (O, \vec{z}_N) dans N . On connaît uniquement la matrice d'inertie en G_1 donc on utilise la relation : $E_{c(1/N)} = \frac{1}{2} (M_1 \overrightarrow{V_{G_1 \in 1/N}})^2 + C_1 \dot{\theta}_1^2 = \boxed{\frac{1}{2} (C_1 + M_1 L_1^2) \dot{\theta}_1^2}$

(b) \Rightarrow Le solide **2** a un mouvement dans le plan, on utilise la même formule : $E_{c(2/N)} = \frac{1}{2} (M_2 \overrightarrow{V_{G_2 \in 2/N}})^2 + B_2 \dot{\theta}_2^2 = \boxed{\frac{1}{2} [(B_2 + M_2 (x_{24} - L_2)^2) \dot{\theta}_2^2 + M_2 \dot{x}_{24}^2]}$

(c) \Rightarrow Le solide **4** est en rotation autour d'un axe fixe (C, \vec{z}_N) et sa matrice d'inertie est connue en C donc : $E_{c(4/N)} = \boxed{\frac{1}{2} C_4 \dot{\theta}_2^2}$

On note **E** l'ensemble constitué des solides **1**, **2**, **3**, **4** et **5**. On note $P_{i \leftrightarrow j}$ la puissance intérieure développée par les actions entre les solides i et j (par exemple : $P_{5 \leftrightarrow 3}$ est la puissance développée par

l'action visqueuse entre **3** et **5**).

Question 3 Recenser les différentes puissances intérieures à **E** en utilisant la notation ci-dessus, et les exprimer en fonction du (ou des) paramètre(s) propre(s) à la liaison ou au mouvement concerné.

On note $P_{5 \leftrightarrow 3}^{\text{phf}}$ la puissance développée par l'action de frottement visqueux entre **5** et **3** et $P_{4 \leftrightarrow 2}^{\text{phf}}$ celle entre **2** et **4**.

On note $P_{5 \leftrightarrow 3}^{\text{ph}}$ la puissance développée par l'huile entre **5** et **3** et $P_{4 \leftrightarrow 2}^{\text{ph}}$ celle entre **2** et **4**.

Les puissances intérieures sont donc : $P_{\text{int}} = P_{1 \leftrightarrow 2} + P_{1 \leftrightarrow 3} + P_{3 \leftrightarrow 5} + P_{2 \leftrightarrow 4} + P_{5 \leftrightarrow 3}^{\text{phf}} + P_{4 \leftrightarrow 2}^{\text{phf}} + P_{5 \leftrightarrow 3}^{\text{ph}} + P_{4 \leftrightarrow 2}^{\text{ph}}$

Comme les liaisons sont parfaites : $P_{1 \leftrightarrow 2} + P_{1 \leftrightarrow 3} + P_{3 \leftrightarrow 5} + P_{2 \leftrightarrow 4} = 0$.

$$P_{4 \leftrightarrow 2}^{\text{phf}} = \{V_{2/4}\} \otimes \{T_{\text{phf} \rightarrow 2}\} = -k\dot{x}_{24}^2$$

$$P_{5 \leftrightarrow 3}^{\text{phf}} = \{V_{3/5}\} \otimes \{T_{\text{phf} \rightarrow 3}\} = -k\dot{x}_{35}^2 \quad (\text{car } \overrightarrow{V_{A \in 3/5}} = -\dot{x}_{35}\overrightarrow{x}_3)$$

$$P_{4 \leftrightarrow 2}^{\text{ph}} = \{V_{2/4}\} \otimes \{T_{\text{ph} \rightarrow 2}\} = F_{h2}\dot{x}_{24}$$

$$P_{5 \leftrightarrow 3}^{\text{ph}} = \{V_{3/5}\} \otimes \{T_{\text{ph} \rightarrow 3}\} = F_{h3}\dot{x}_{35}$$

On note $P_{\text{ext} \rightarrow i/N}$ la puissance galiléenne des actions mécaniques extérieures à **E** sur le solide *i*.

Question 4 Recenser puis exprimer les puissances galiléennes développées par les actions mécaniques extérieures à **E** en fonction du (ou des) paramètre(s) propre(s) à la liaison ou au mouvement concerné.

Les puissances extérieures agissant sur le système sont :

$$P_{\text{ext}} = P_{\text{pes} \rightarrow 1/N} + P_{\text{pes} \rightarrow 2/N} + P_{\text{pes} \rightarrow 3/N} + P_{\text{pes} \rightarrow 4/N} + P_{\text{pes} \rightarrow 5/N} + P_{\text{eau} \rightarrow 1/N} + P_{N \rightarrow 1/N} + P_{N \rightarrow 5/N} + P_{N \rightarrow 4/N}$$

Comme les liaisons sont parfaites : $P_{N \rightarrow 1/N} + P_{N \rightarrow 5/N} + P_{N \rightarrow 4/N} = 0$.

$$\text{On a : } P_{\text{eau} \rightarrow 1/N} = \{T_{\text{eau} \rightarrow 1}\} \otimes \{V_{1/N}\} = -(F_t \cdot \overrightarrow{x}_1 + F_p \cdot \overrightarrow{z}_1) \cdot h\dot{\theta}_1 \cdot \overrightarrow{x}_1 = h\dot{\theta}_1 F_t$$

De même :

$$P_{\text{pes} \rightarrow 1/N} = -M_1 g \cdot \overrightarrow{y}_N \cdot L_1 \dot{\theta}_1 \cdot \overrightarrow{x}_1 = -M_1 g L_1 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1$$

$$P_{\text{pes} \rightarrow 2/N} = -M_2 g \cdot \overrightarrow{y}_N \cdot (\dot{x}_{24} \cdot \overrightarrow{x}_2 + (x_{24} - L_2) \dot{\theta}_2 \cdot \overrightarrow{y}_2) = -M_2 g (\dot{x}_{24} \sin \theta_2 + (x_{24} - L_2) \dot{\theta}_2 \cos \theta_2)$$

$$P_{\text{pes} \rightarrow 3/N} = -M_3 g \cdot \overrightarrow{y}_N \cdot (-\dot{x}_{35} \cdot \overrightarrow{x}_3 + (-x_{35} + L_2) \dot{\theta}_3 \cdot \overrightarrow{y}_3) = -M_3 g (-\dot{x}_{35} \sin \theta_3 + (-x_{35} + L_2) \dot{\theta}_3 \cos \theta_3)$$

Les centres de gravité de **4** et **5** sont fixes dans R_N , donc la puissance de la pesanteur est **nulle sur ces solides**

1.4 Déterminer la puissance motrice nécessaire

Dans la phase de vie étudiée, lors de la commande de basculement de la quille, les vérins sont alimentés de telle sorte que $F_{h2} > 0$ et $F_{h3} = 0$ (voir FIGURE 5). Le vérin **2-4** est alors moteur et le vérin **3-5** est libre.

Question 5 Appliquer le théorème de l'énergie cinétique à **E** dans son mouvement par rapport à **N**. Écrire ce théorème de façon globale en utilisant uniquement les notations précédentes, sans leur développement. Exprimer, dans ces conditions, la puissance motrice que fournit le vérin moteur en fonction des autres puissances et de la variation d'énergie cinétique de l'ensemble des solides par rapport à **N**.

On applique le théorème de l'énergie cinétique à l'ensemble **E** en mouvement dans le référentiel galiléen **N** :

$$\frac{dE_{c(E/N)}}{dt} = P_{\text{ext} \rightarrow E/N} + P_{\text{int}}$$

$$\frac{dE_{c(1/N)}}{dt} + \frac{dE_{c(2/N)}}{dt} + \frac{dE_{c(3/N)}}{dt} + \frac{dE_{c(4/N)}}{dt} + \frac{dE_{c(5/N)}}{dt} = P_{\text{pes} \rightarrow 1/N} + P_{\text{pes} \rightarrow 2/N} + P_{\text{pes} \rightarrow 3/N} + P_{\text{eau} \rightarrow 1/N} + P_{5 \leftrightarrow 3}^{\text{phf}} + P_{4 \leftrightarrow 2}^{\text{phf}} + P_{5 \leftrightarrow 3}^{\text{ph}} + P_{4 \leftrightarrow 2}^{\text{ph}}$$

La puissance motrice est $P_{4 \leftrightarrow 2}^{\text{ph}}$ et par ailleurs $P_{5 \leftrightarrow 3}^{\text{ph}} = 0$ car le vérin **3-5** est libre. Ainsi :

$$P_{\text{mot}} = \frac{dE_{c(E/N)}}{dt} - (P_{\text{pes} \rightarrow E/N} + P_{\text{eau} \rightarrow 1/N} + P_{5 \leftrightarrow 3}^{\text{phf}} + P_{4 \leftrightarrow 2}^{\text{phf}})$$

On se place dans le cas où une commande en vitesse est générée à destination du vérin **2-4**. Le vérin **3-5** est libre. Cette commande « en trapèze de vitesse » (voir FIGURE 6) provoque le déplacement de la quille de la position $\theta_1 = 0$ à la position $\theta_1 = 45^\circ$ en 4 secondes, le maintien de la quille dans cette position pendant 1 seconde puis le retour à la position $\theta_1 = 0$ en 4 secondes. Les phases d'accélération et de décélération (rampes) durent 1 seconde.

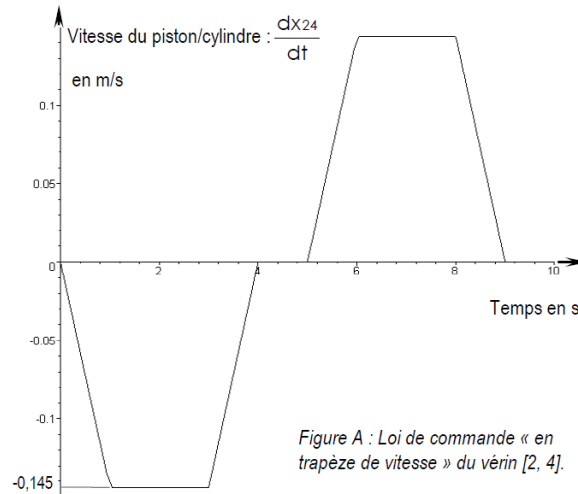


FIGURE 6 – Loi de commande en trapèze de vitesse du vérin **2-4**

Un logiciel de calcul permet de tracer l'évolution temporelle des puissances mises en jeu. Ces puissances sont représentées sur la FIGURE 7.

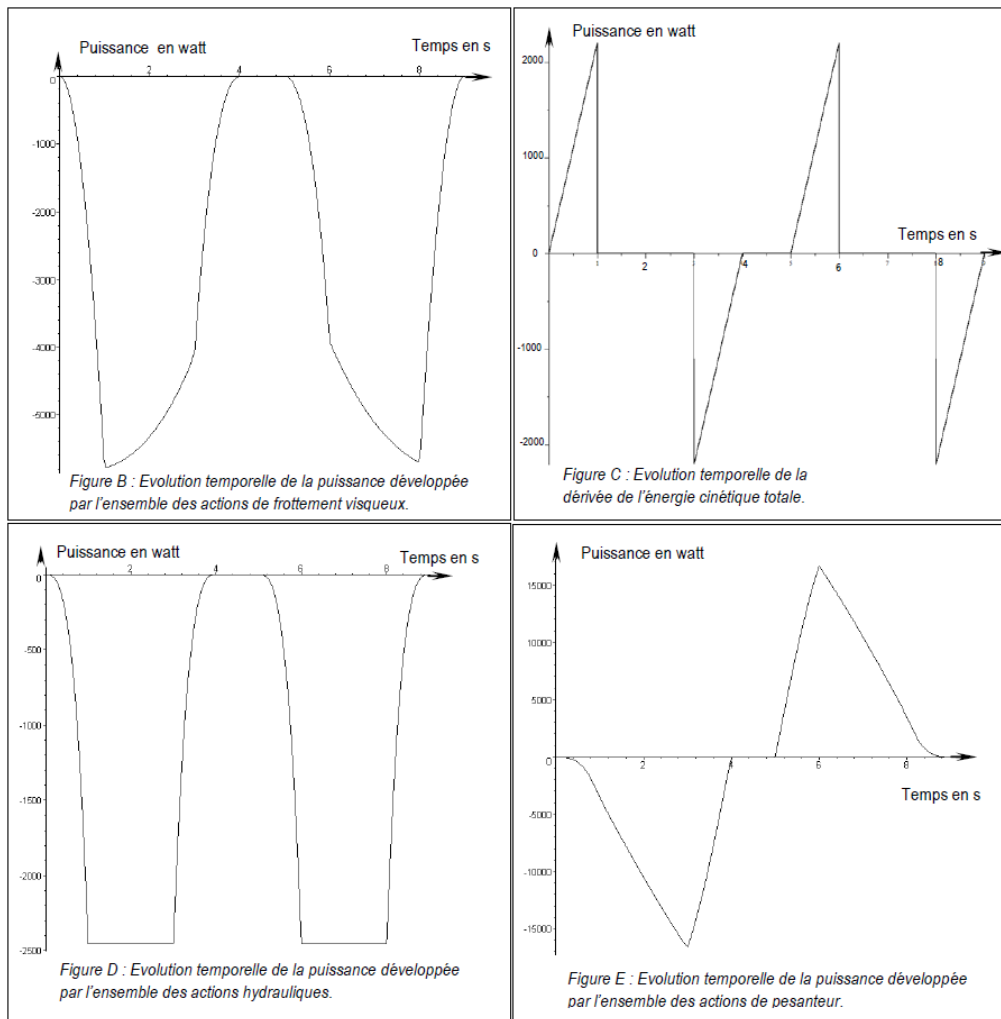


FIGURE 7 – Résultats de simulation

Question 6 Dans le but de chiffrer la valeur maximale de la puissance que doit fournir l'actionneur pour réaliser le mouvement prévu, tracer, à l'aide de la FIGURE 7, sur la FIGURE 8, l'allure de l'évolution temporelle de cette puissance. Pour cela, évaluer les valeurs aux instants $t = 0\text{ s}$, $t = 1\text{ s}$, $t = 3\text{ s}$ et $t = 4\text{ s}$.

$$\text{À } t = 0\text{ s} : P_{\text{mot}} = 0\text{ W}$$

$$\text{À } t = 1\text{ s, on calcule : } P_{\text{mot}} = 2200 + 5800 + 2500 + 4000 = 14\,500\text{ W}$$

$$\text{À } t = 3\text{ s} : P_{\text{mot}} = 0 + 4000 + 2500 + 16000 = 22\,500\text{ W}$$

$$\text{À } t = 4\text{ s} : P_{\text{mot}} = 0\text{ W}$$

Question 7 Sur l'intervalle $[0,4]\text{ s}$, évaluer, en kW, la valeur maximale de la puissance que doit fournir l'actionneur. Expliquer pourquoi le maximum de puissance est situé sur cet intervalle, et non sur l'intervalle $[5,8]\text{ s}$.

Le maximum de puissance est à environ 22,5 kW. Sur cet intervalle, le poids est résistant alors qu'il est

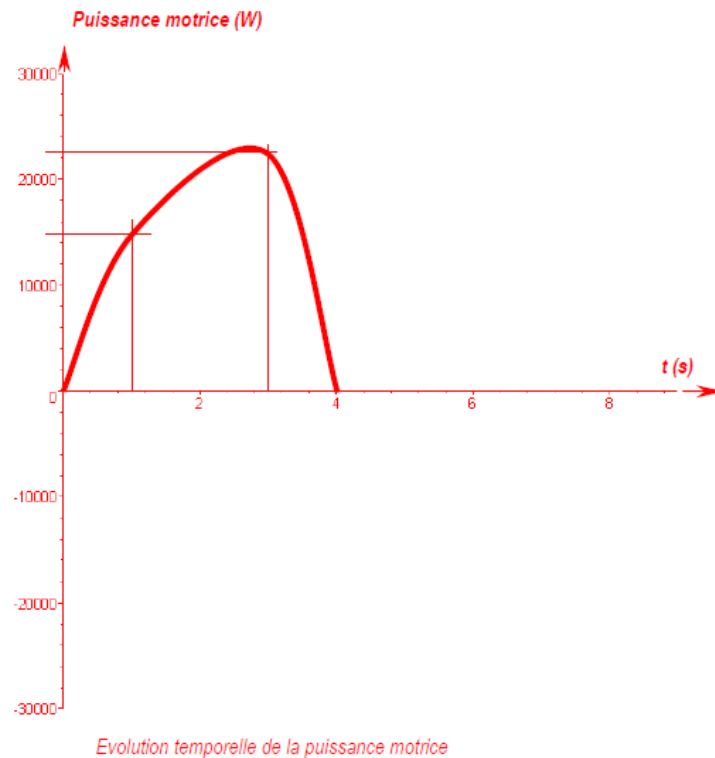


FIGURE 8 – Évolution temporelle de la puissance motrice

moteur sur $[5,8]$ s.

Question 8 Comparer la puissance obtenue par simulation avec celle indiquée dans le cahier des charges. Dans les hypothèses utilisées pour constituer le modèle de calcul, indiquer ce qui peut expliquer la différence entre la valeur calculée et la valeur donnée dans le cahier des charges.

La puissance obtenue par simulation est inférieure à la puissance maximale indiquée dans le cahier des charges. Le constructeur a donc pris une marge de sécurité. Il y a 7,5 kW de différence, soit presque 30%. Les liaisons ont été supposées parfaites mais ce n'est pas forcément une hypothèse qui justifie une telle différence. Le système est surdimensionné pour tenir compte des incertitudes sur la modélisation des actions de l'eau et l'usure des éléments.