

Proposition de corrigé

Concours : Concours Commun Polytechniques

Année : 2010

Filière : PSI

Épreuve : Sciences Industrielles pour l'Ingénieur

Ceci est une proposition de corrigé des concours de CPGE, réalisée bénévolement par des enseignants de Sciences Industrielles de l'Ingénieur et d'Informatique, membres de l'[UPSTI](http://www.upsti.fr) (Union des Professeurs de Sciences et Techniques Industrielles), et publiée sur le site de l'association :

<https://www.upsti.fr/espace-etudiants/annales-de-concours>

A l'attention des étudiants

Ce document vous apportera des éléments de corrections pour le sujet traité, mais n'est ni un corrigé officiel du concours, ni un corrigé détaillé ou exhaustif de l'épreuve en question.

L'UPSTI ne répondra pas directement aux questions que peuvent soulever ces corrigés : nous vous invitons à vous rapprocher de vos enseignants si vous souhaitez des compléments d'information, et à vous adresser à eux pour nous faire remonter vos éventuelles remarques.

Licence et Copyright

Toute représentation ou reproduction (même partielle) de ce document faite sans l'accord de l'UPSTI est **interdite**. Seuls le téléchargement et la copie privée à usage personnel sont autorisés (protection au titre des [droits d'auteur](#)).

En cas de doute, n'hésitez pas à nous contacter à : corrigesconcours@upsti.fr.

Informez-vous !

Retrouvez plus d'information sur les [Sciences de l'Ingénieur](#), l'[orientation](#), les [Grandes Ecoles](#) ainsi que sur les [Olympiades de Sciences de l'Ingénieur](#) et sur les [Sciences de l'Ingénieur au Féminin](#) sur notre site : www.upsti.fr

L'équipe UPSTI

QUESTION 1

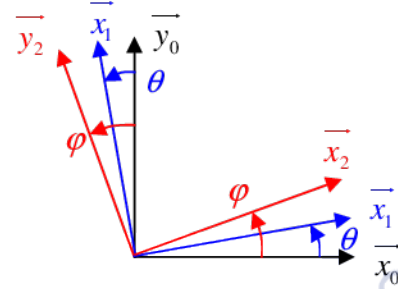
Fermeture géométrique : $\vec{OA} + \vec{AB} + \vec{BO} = \vec{0}$

Soit : $-R\vec{y}_1 - x\vec{x}_1 + h\vec{y}_0 + d\vec{x}_0 = \vec{0}$

En projetant sur \vec{x}_0 et \vec{y}_0 :

$$\begin{cases} +R \sin \theta - x \cos \varphi + d = 0 \\ -R \cos \theta - x \sin \varphi + h = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} x = \frac{R \sin \theta + d}{\cos \varphi} \\ h = R \cos \theta + x \sin \varphi \end{cases}$$



Soit $h = R \cos \theta + (R \sin \theta + d) \tan \varphi$

Lorsque $\theta = 35^\circ$, A est en A_0 , le vérin est horizontal et $\varphi = 0^\circ$.

Lorsque $\theta = -35^\circ$, A est en A_1 , le vérin est horizontal et $\varphi = 0^\circ$.

- A est en A_0 : $h = R \cos \theta$ $h = 400 \cdot \cos 35$ $h = 328 \text{ mm}$
 $x_0 = \frac{R \sin \theta + d}{\cos \varphi}$ $x_0 = \frac{400 \cdot \sin 35 + 732}{\cos 35}$ $x_0 = 961.5 \text{ mm}$
- A est en A_1 : $x_1 = \frac{R \sin \theta + d}{\cos \varphi}$ $x_1 = \frac{400 \cdot \sin(-35) + 732}{\cos(-35)}$ $x_1 = 502.5 \text{ mm}$

La course c du vérin est définie par A_1A_0 : $c = x_0 - x_1$ $c = 459 \text{ mm}$

QUESTION 2

1. J'isole la tige du vérin.
Elle est soumise à :

- Action du basculeur sur la tige : $\{T_{1 \rightarrow 2}\} = \begin{Bmatrix} X_A & L_A \\ Y_A & M_A \\ Z_A & 0 \end{Bmatrix}_{A, (\vec{x}_2, \vec{y}_2, \vec{z}_0)}$

- Action du corps du vérin sur la tige : $\{T_{3 \rightarrow 2}\} = \begin{Bmatrix} 0 & L_C \\ Y_C & M_C \\ Z_C & N_C \end{Bmatrix}_{C, (\vec{x}_2, \vec{y}_2, \vec{z}_0)}$

- Action du fluide sur le piston : $\{T_{F \rightarrow 2}\} = \begin{Bmatrix} F_F & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{D, (\vec{x}_2, \vec{y}_2, \vec{z}_0)}$

PFS appliqué à la tige, en résultante en projection sur \vec{x}_2 :

$$X_A + F_F = 0$$

Les autres forces, Y_A et Z_A sont négligées devant X_A .

2. J'isole l'ensemble $E = \{\text{basculeur} + \text{tube}\}$.
Il est soumis à :

➤ Action de la tige sur le basculeur : $\{T_{2 \rightarrow E}\} = \begin{Bmatrix} -X_A & L_A \\ 0 & M_A \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{A,(\bar{x}_2, \bar{y}_2, \bar{z}_0)}$

➤ Action de la pesanteur sur l'ensemble : $\{T_{pes \rightarrow E}\} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{P}{3} & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{G_A,(\bar{x}_0, \bar{y}_0, \bar{y}_0)}$

➤ Action du bâti sur le basculeur : $\{T_{0 \rightarrow E}\} = \begin{Bmatrix} X & L \\ Y & M \\ Z & 0 \end{Bmatrix}_{O,(\bar{x}_0, \bar{y}_0, \bar{y}_0)}$

PFS appliqué à E, en moment en O ; en projection sur \bar{z}_0 :

$$\overline{M_{O,2 \rightarrow E}} \cdot \bar{z}_0 = \overline{M_{A,2 \rightarrow E}} \cdot \bar{z}_0 + \overline{OA} \wedge \overline{R_{2 \rightarrow E}} \cdot \bar{z}_0 = 0 - (R \cdot \bar{y}_1 \wedge F_A \cdot \bar{x}_2) \cdot \bar{z}_0 = R \cdot F_A \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta_0\right)$$

$$\overline{M_{O,pes \rightarrow E}} = \overline{M_{G_A,pes \rightarrow E}} + \overline{OG_A} \wedge \overline{R_{pes \rightarrow E}} = \vec{0} + \begin{vmatrix} x_{GA} & 0 \\ y_{GA} & -\frac{P}{3} \end{vmatrix} \cdot \bar{z}_0 = -\frac{P}{3} \cdot x_{GA} \cdot \bar{z}_0$$

Enfinement : $R \cdot F_A \cdot \cos(\theta_0) - \frac{P}{3} \cdot x_{GA} = 0$

Soit : $F_A = \frac{P \cdot x_{GA}}{3 \cdot R \cdot \cos(\theta_0)} \quad F_A = \frac{12000 \cdot -350}{3 \cdot 400 \cdot \cos(35)} \quad F_A = -4273 \text{ N}$

Une étude identique dans la position B amène à :

$$F_B = \frac{P \cdot x_{GB}}{3 \cdot R \cdot \cos(\theta_0)} \quad F_B = \frac{12000 \cdot 660}{3 \cdot 400 \cdot \cos(35)} \quad F_B = 8057 \text{ N}$$

QUESTION 3

D'après l'annexe 4, en poussée, la pression est appliquée sur la surface S_1 . En tirage, la pression est appliquée sur la surface S_2 .

En poussée, $F_{BMax} = 8057 \text{ N}$. $F = p \cdot S$ donc $S = \frac{F}{p}$ $S_1 = \frac{8057}{3 \cdot 10^5}$ $S_1 = 26857 \text{ mm}^2$

En tirage, $F_{AMax} = -4273 \text{ N}$. $S_2 = \frac{4273}{3 \cdot 10^5}$ $S_2 = 14242 \text{ mm}^2$

QUESTION 4

$$S_1 = 26857 \text{ mm}^2 \quad S_1 = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} \quad D_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot S_1}{\pi}} \quad D_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot 26857}{\pi}} \quad D_1 = 185 \text{ mm}$$

Il faut choisir $D_1 > 185 \text{ mm}$, soit, sur ce critère le vérin n°5. ($S_1 = \frac{\pi \cdot 221^2}{4}$ $S_1 = 38360 \text{ mm}^2$)

Vérifions dans ce cas que $S_2 > 14242 \text{ mm}^2$:

$$S_2 = \frac{\pi \cdot (D_1^2 - D_2^2)}{4} \quad S_2 = \frac{\pi \cdot (221^2 - 80^2)}{4} \quad S_2 = 33333 \text{ mm}^2$$

Le choix du vérin n°5 est validé.

QUESTION 5

QUESTION 5a

Mouvements :

Le basculeur 1 est en mouvement de rotation par rapport au bâti 0 autour de l'axe $(0, \vec{z}_0)$.

Le basculeur 1 est en mouvement de rotation par rapport à la tige du vérin 2 autour de l'axe (A, \vec{z}_0) .

La tige du vérin 1 est en mouvement de translation d'axe (AB) par rapport au corps du vérin 3.

Le corps du vérin 3 est en mouvement de rotation par rapport au bâti 0 autour de l'axe (B, \vec{z}_0) .

Trajectoires :

La trajectoire du point D lié à 1 dans 0 est un cercle de centre O et de rayon OD .

La trajectoire du point A lié à 1 dans 0 est un cercle de centre O et de rayon OA .

La trajectoire du point A lié à 3 dans 0 est un cercle de centre B et de rayon BA .

Vitesses :

$\vec{V}_{D,1/0}$ est tangent au cercle de centre O et de rayon OD , dirigé vers le haut au vu du sens de rotation du basculeur.

$\vec{V}_{A,1/0}$ est tangent au cercle de centre O et de rayon OA , dirigé vers la droite.

On construit le point A' , situé sur OD , tel que $OA = OA'$

Les propriétés du champ des vecteurs vitesses permettent de construire la vitesse $\vec{V}_{A,1/0}$.

De plus $\|\vec{V}_{A,1/0}\| = \|\vec{V}_{A',1/0}\|$, puisque $OA = OA'$

La composition des vecteurs vitesses permet d'écrire : $\vec{V}_{A,1/0} = \vec{V}_{A,1/2} + \vec{V}_{A,2/3} + \vec{V}_{A,3/0}$

$\vec{V}_{A,2/1} = \vec{0}$ car A est le centre de la liaison pivot entre 2 et 1.

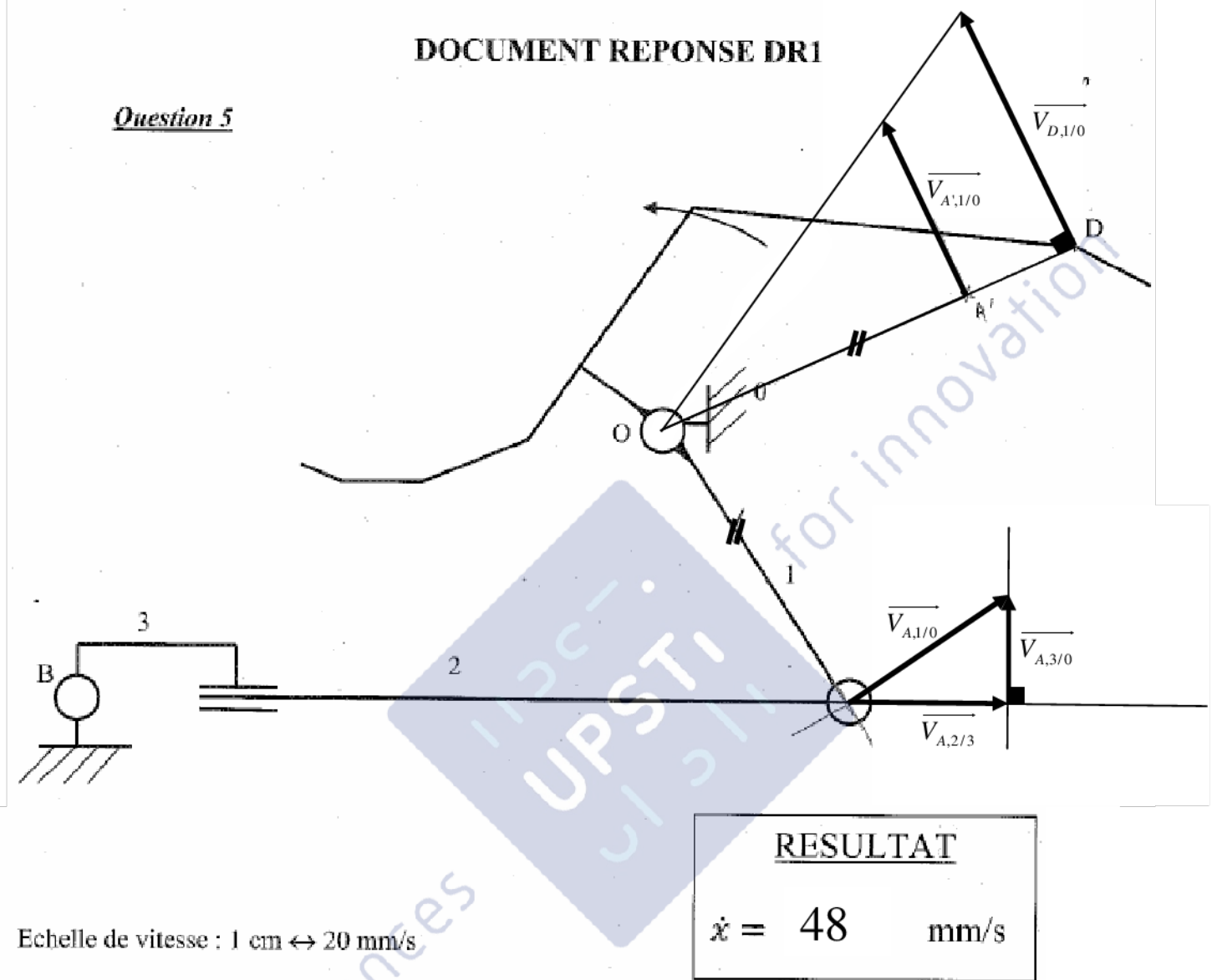
$\vec{V}_{A,2/3}$ est porté par la droite (AB)

La fermeture du triangle des vitesses donne un vecteur $\vec{V}_{A,2/3}$ de longueur 2.4 cm soit :

$$\dot{x} = \|\vec{V}_{A,2/3}\| = 48 \text{ mm/s}$$

DOCUMENT REPOSE DR1

Question 5



RESULTAT
 $\dot{x} = 48 \text{ mm/s}$

QUESTION 5b

$Q = S \cdot V = S_1 \cdot \dot{x}$

$Q = 3.8 \cdot 10^{-2} \cdot 0.048$

$Q = 1.8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

$Q = 1.8 \text{ l/s}$

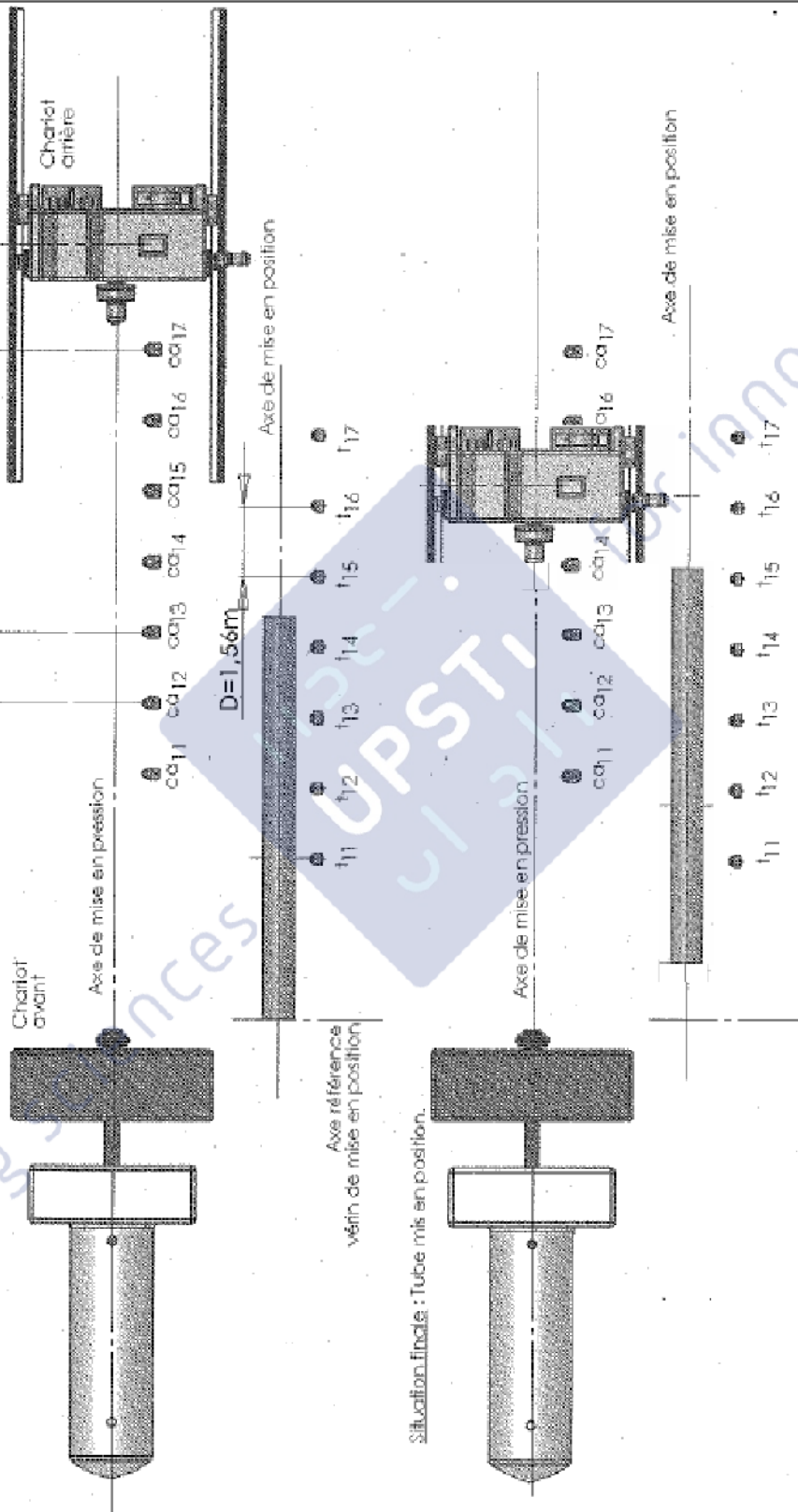
QUESTION 6 & 7

DOCUMENT REPONSE DR2

Questions 6 et 7

Situation initiale : Tube mis en position.

Ecartement capteurs $D=1,56m$



W12 en binaire = 0·0·1·0·0·0·0

W12 en décimal = (16)¹⁰

Course du chariot arrière = 5,2 m

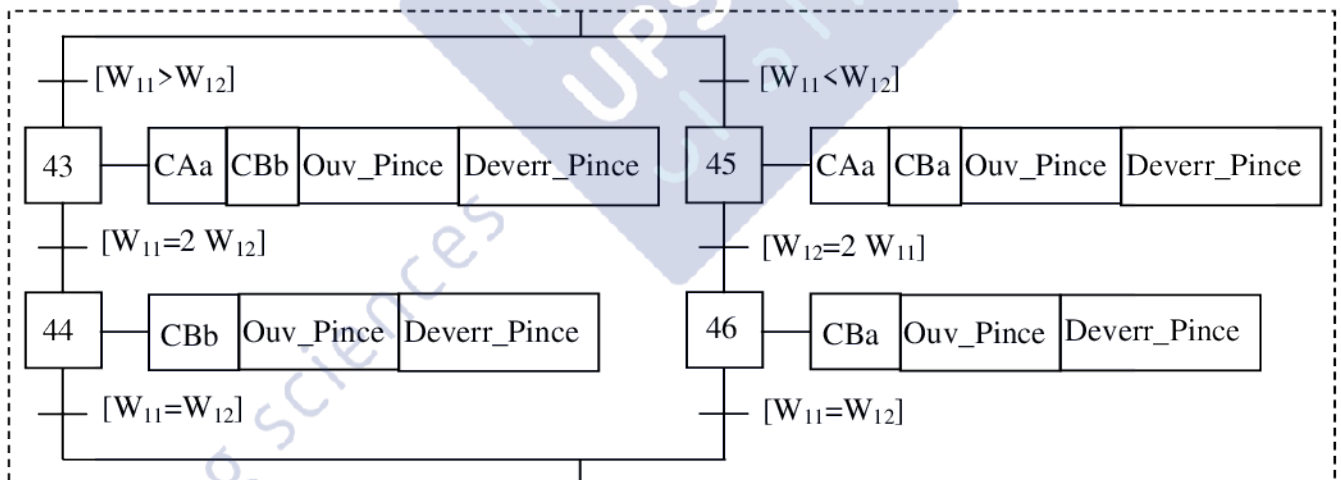
QUESTION 8

Déplacement du chariot	Commande 1 : pilotée 0 : non pilotée			Débit (L/min)
	CAa	CBa	CBb	
Vers l'avant, vitesse lente	0	0	1	20
Vers l'avant, vitesse rapide	1	0	1	41
Vers l'arrière, vitesse lente	0	1	0	20
Vers l'arrière, vitesse rapide	0	1	0	41

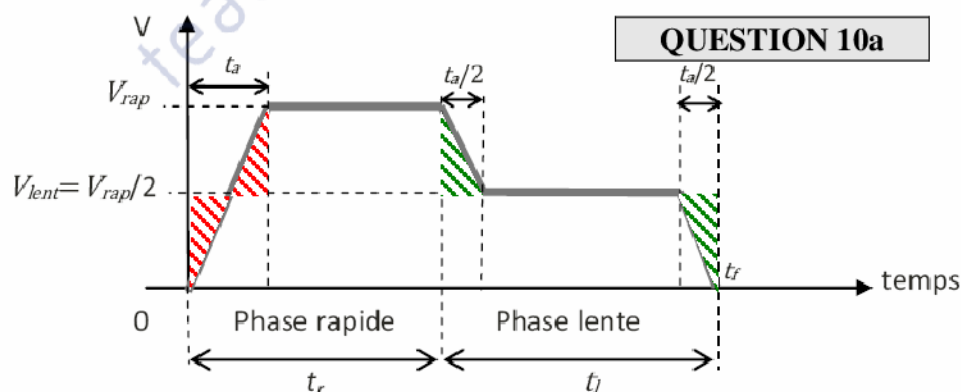
QUESTION 9

Attention, erreur d'énoncé : Il faut lire :

- si $W_{11} > W_{12}$, il doit avancer
- si $W_{11} < W_{12}$, il doit reculer



QUESTION 10



La distance parcourue pendant les 2 phases correspond à l'intégrale de la courbe de vitesse pendant la durée considérée.

Pendant la phase lente, déterminer la distance parcourue revient à calculer l'aire sous la courbe de vitesse : L'aire du triangle supérieur du début de phase compense l'aire du triangle de fin de phase manquant (en vert).

L'aire sous la courbe est donc égale à l'aire d'un rectangle de longueur t_l et de largeur $V_{lent} = \frac{V_{rap}}{2}$

La distance parcourue pendant la phase lente est : $c_{lente} = \frac{V_{rap}}{2} \cdot t_l$

Par un raisonnement similaire, l'aire du triangle supérieur du début de la phase rapide (de $\frac{t_a}{2}$ à t_a)

compense l'aire du triangle inférieur du début de la phase rapide (de 0 à $\frac{t_a}{2}$) (en rouge).

L'aire sous la courbe est donc égale à la somme des aires de 2 rectangles :

- de longueur t_a et de largeur $V_{lent} = \frac{V_{rap}}{2}$.
- de longueur $t_r - t_a$ et de largeur V_{rap} .

La distance parcourue pendant la phase rapide est : $c_{rapide} = \frac{V_{rap}}{2} \cdot t_a + V_{rap} \cdot (t_r - t_a)$

$$c_{rapide} = V_{rap} \cdot \left(t_r - \frac{t_a}{2} \right)$$

QUESTION 10b

$$c_{lente} = \frac{V_{rap}}{2} \cdot t_l$$

$$t_l = 2 \cdot \frac{c_{lente}}{V_{rap}}$$

$$t_l = 2 \cdot \frac{1.56}{0.5}$$

$$t_l = 6.24 \text{ s}$$

La durée totale du mouvement est de 20 s, donc :

$$t_r = 20 - 6.24$$

$$t_r = 13.76 \text{ s}$$

$$c_{rapide} = V_{rap} \cdot \left(t_r - \frac{t_a}{2} \right)$$

$$t_a = 2 \cdot \left(t_r - \frac{c_{rapide}}{V_{rap}} \right)$$

$$t_a = 2 \cdot \left(13.76 - \frac{6.24}{0.5} \right)$$

$$t_a = 2.56 \text{ s}$$

$$V_{rap} = a \cdot t_a$$

$$a = \frac{V_{rap}}{t_a}$$

$$a = \frac{0.5}{2.56}$$

$$a = 0.19 \text{ m/s}^2$$

QUESTION 11

QUESTION 11a

Transmission pignon/crémaillères :

Engrènement Roue 3/Roue 2 : $R_3 \cdot \omega_{3/C} = -R_2 \cdot \omega_{2/C}$

Engrènement Roue 2/Roue 1 : $R_2 \cdot \omega_{2/C} = -R_1 \cdot \omega_{1/C}$

Réducteur roue et vis sans fin : $\omega_{M/C} = \frac{\omega_{1/C}}{r}$ (+ ou -, l'énoncé ne permet pas de le dire : on prendra + par défaut. Ce n'est pas important pour la suite)

$$\omega_M = \omega_{M/C} = \frac{\omega_{1/C}}{r} = -\frac{\omega_{2/C} \cdot R_2}{r \cdot R_1} = \frac{\omega_{3/C} \cdot R_2 \cdot R_3}{r \cdot R_1 \cdot R_2} = \frac{\omega_{3/C} \cdot R_3}{r \cdot R_1} = -\frac{V \cdot R_3}{r \cdot R_1 \cdot R_p}$$

$$\omega_M = -\frac{V \cdot R_3}{r \cdot R_1 \cdot R_p}$$

QUESTION 11b

$$\omega_M = -\frac{0.5 \cdot 0.115}{\frac{1}{30} \cdot 0.05 \cdot 0.085}$$

$$\omega_M = -406 \text{ rad/s}$$

$$\dot{\omega}_M = -\frac{\dot{V} \cdot R_3}{r \cdot R_1 \cdot R_p} = -\frac{a \cdot R_3}{r \cdot R_1 \cdot R_p}$$

$$\dot{\omega}_M = -\frac{0.19 \cdot 0.115}{\frac{1}{30} \cdot 0.05 \cdot 0.085}$$

$$\dot{\omega}_M = -158.5 \text{ rad/s}^2$$

QUESTION 12

QUESTION 12a

L'ensemble est en mouvement de translation rectiligne. Chaque pièce est en mouvement de rotation par rapport au chariot.

Mouvement de translation : $T_{trans(\Sigma/0)} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot V^2$

Mouvement de rotation : $T_{rot(\Sigma/0)} = T_{rot(M/0)} + T_{rot(red/0)} + T_{rot(Roue1/0)} + T_{rot(Roue2/0)} + T_{rot(Roue3/0)} = T_{rot(M/0)} + T_{rot(red/0)}$

$$T_{rot(\Sigma/0)} = \frac{1}{2} \cdot I_M \cdot \omega_M^2 + \frac{1}{2} \cdot I_r \cdot \omega_M^2$$

$$T_{(\Sigma/0)} = T_{rot(\Sigma/0)} + T_{trans(\Sigma/0)}$$

$$T_{(\Sigma/0)} = \frac{1}{2} \cdot (I_M + I_r) \cdot \omega_M^2 + \frac{1}{2} \cdot M \cdot V^2$$

QUESTION 12b

L'ensemble est en mouvement de translation rectiligne. Chaque pièce est en mouvement de rotation par

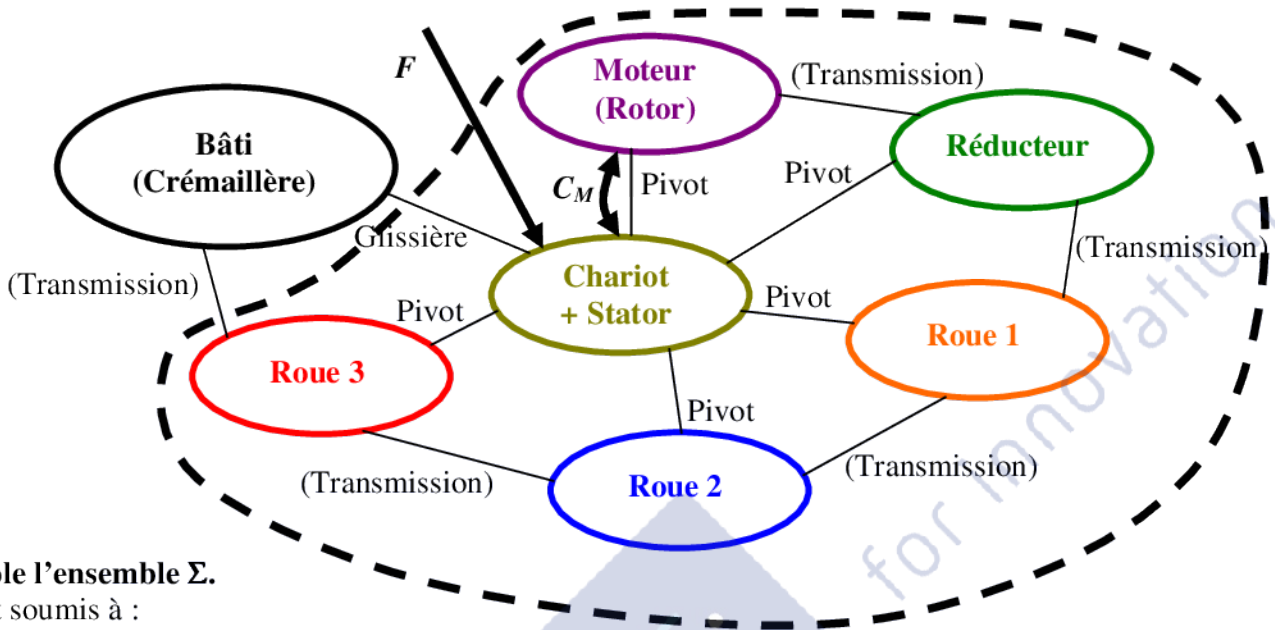
$$\omega_M = -\frac{V \cdot R_3}{r \cdot R_1 \cdot R_p} \quad V = -\frac{\omega_M \cdot r \cdot R_1 \cdot R_p}{R_3} \quad T_{rot(\Sigma/0)} = \frac{1}{2} \cdot \left(I_M + I_r + M \cdot \left(\frac{r \cdot R_1 \cdot R_p}{R_3} \right)^2 \right) \cdot \omega_M^2$$

$$T_{rot(\Sigma/0)} = \frac{1}{2} \cdot J_{eq} \cdot \omega_M^2 \quad J_{eq} = I_M + I_r + M \cdot \left(\frac{r \cdot R_1 \cdot R_p}{R_3} \right)^2$$

$$J_{eq} = 0.0012 + 0.004 + 2350 \cdot \left(\frac{\frac{1}{30} \cdot 0.05 \cdot 0.085}{0.115} \right)^2$$

$$J_{eq} = 0.00877 \text{ kg.m}^2$$

QUESTION 13



J'isole l'ensemble Σ .

Il est soumis à :

- Actions dans la transmission
- Actions résistantes sur le chariot
- Action du stator sur le rotor

Puissances extérieures :

➤ $P_{e(Ext \rightarrow \Sigma/0)} = F \cdot V$

Puissance des efforts résistants

En considérant les liaisons parfaites :

➤ $P_{e(0(Crémaillère) \rightarrow \Sigma/0)} = 0$

Puissance dans la transmission pignon/crémaillère (RSG)

➤ $P_{e(0(Glissière) \rightarrow \Sigma/0)} = 0$

Puissance dans la liaison glissière

Puissances intérieures :

➤ $P_{i(Stator \leftrightarrow Rotor)} = C_M \cdot \omega_M$

Puissance fournie par le moteur

➤ $P_{i(liaisons)} = 0$

Puissance dissipée dans les liaisons

➤ $P_{i(Transmission)} = (\eta - 1) \cdot C_M \cdot \omega_M$

Puissance perdue dans la transmission

Théorème de l'énergie cinétique : $\frac{dT_{(\Sigma/0)}}{dt} = \Sigma P_{e(\bar{\Sigma} \rightarrow \Sigma/0)} + \Sigma P_i$

Soit : $J_{eq} \cdot \omega_M \cdot \dot{\omega}_M = F \cdot V + \eta \cdot C_M \cdot \omega_M$

$$J_{eq} \cdot \omega_M \cdot \dot{\omega}_M = -F \cdot \frac{\omega_M \cdot r \cdot R_1 \cdot R_p}{R_3} + \eta \cdot C_M \cdot \omega_M$$

$$J_{eq} \cdot \dot{\omega}_M = -F \cdot \frac{r \cdot R_1 \cdot R_p}{R_3} + \eta \cdot C_M$$

car le système est en mouvement ($\omega_M \neq 0$)

$$C_M = \frac{J_{eq} \cdot \dot{\omega}_M + F \cdot \frac{r \cdot R_1 \cdot R_p}{R_3}}{\eta}$$

$$C_M = \frac{0.01 \cdot 250 + 500 \cdot \frac{1}{30} \cdot 0.05 \cdot 0.085}{0.3}$$

$$C_M = 10.4 \text{ N.m}$$

QUESTION 14

$$\omega_M = -406 \text{ rad/s} \qquad \omega_M = -\frac{406}{2\pi} \cdot 60 \qquad \omega_M = 3876 \text{ tr/min}$$

$$C_M = 10.4 \text{ N.m}$$

$$\text{La puissance moteur est donc : } P_M = C_M \cdot \omega_M \qquad P_M = 10.4 \cdot 3876 \qquad P_M = 4,2 \text{ kW}$$

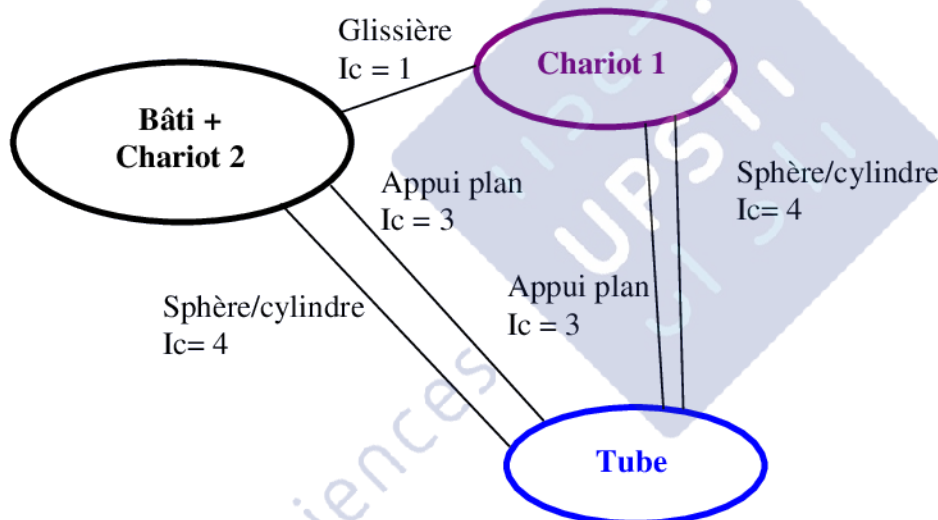
L'étude précédente permet de choisir un moteur suivant les critères de vitesse angulaire, de couple et de puissance.

- le moteur HDMF11-14 convient
- le moteur HDMF11-19 convient également

Le moteur HDMF11-14 est probablement moins onéreux et moins compliqué à intégrer au système.

QUESTION 15

QUESTION 15a



La liaison équivalente d'un appui plan et d'une sphère cylindre dans cette configuration est **une liaison pivot d'axe l'axe la normale au plan d'appui (ici \vec{x})**.

En effet, ces liaisons sont en parallèle, on a donc la relation : $\{V_{tube \rightarrow 0}^{eq}\}_B = \{V_{tube \rightarrow 0}^1\}_B = \{V_{tube \rightarrow 0}^2\}_B$

$$\text{Soit : } \left\{ \begin{array}{cc} \omega_x^{eq} & V_x^{eq} \\ \omega_x^{eq} & V_y^{eq} \\ \omega_x^{eq} & V_z^{eq} \end{array} \right\}_{B} = \left\{ \begin{array}{cc} \omega_x^1 & 0 \\ 0 & V_y^1 \\ 0 & V_z^1 \end{array} \right\}_{B} = \left\{ \begin{array}{cc} \omega_x^2 & V_x^2 \\ \omega_y^2 & 0 \\ \omega_z^2 & 0 \end{array} \right\}_{B}$$

$$\{V_{0 \rightarrow 1}^{eq}\}_B = \left\{ \begin{array}{cc} \omega_x^{eq} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{array} \right\}_{BB} \quad \text{On reconnaît le torseur cinématique d'une liaison pivot d'axe } (B, \vec{x})$$

QUESTION 15b

$$h = Ec - Ic + m$$

$$Ec = 6 \cdot \gamma \text{ avec } \gamma \text{ le nombre de cycles indépendants (ici, } \gamma = 3 \text{). } Ec = 18$$

$$Ic = 1 + 4 + 3 + 4 + 3 \text{ d'après le graphe des liaisons précédent. } Ic = 15$$

$$m = m_u + m_i \text{ avec } m_u \text{ mobilité utile et } m_i \text{ mobilité interne.}$$

- Ici :
- $m_u = 0$, aucune mobilité utile n'est attendue du mécanisme, une liaison encastrement est souhaitée.
 - $m_i = 1$, le tube peut tourner autour de son axe.

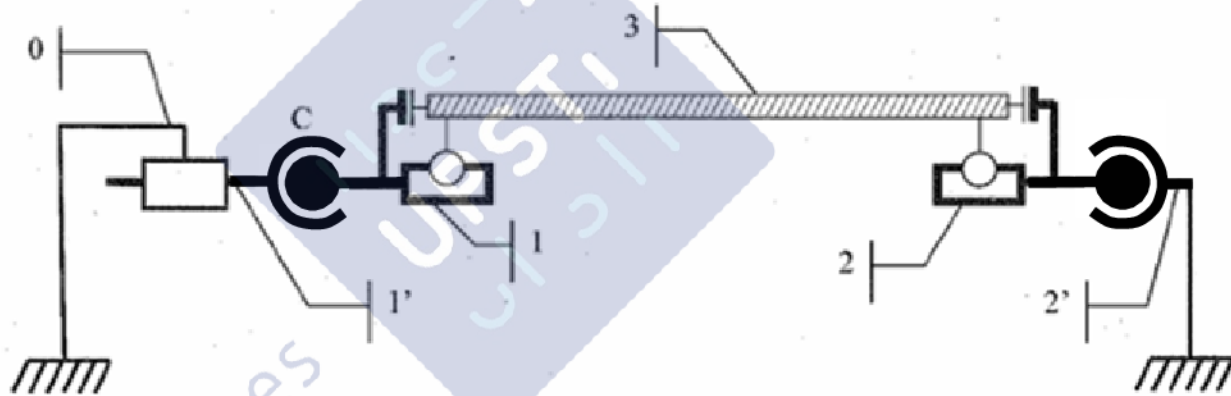
$$h = 18 - 15 + 1 \quad \boxed{h = 4} \quad \text{Le système est hyperstatique de degré 4.}$$

QUESTION 16

Les liaisons introduites sont des liaisons rotules.

DOCUMENT REPONSE DR4

Question 16



$$Ec = 18 \text{ Inchangé}$$

$$Ic = 1 + 4 + 3 + 4 + 3 + 3 + 3$$

$$m = 3$$

- $m_u = 0$, aucune mobilité utile n'est attendue du mécanisme, une liaison encastrement est souhaitée.
- $m_i = 1 + 1 + 1$, le tube peut tourner autour de son axe, l'ensemble 1 peut également tourner autour de son axe et l'ensemble 2 peut également tourner autour de son axe.

$$h = 18 - 21 + 3 \quad \boxed{h = 0} \quad \text{Le système est isostatique.}$$

QUESTION 17

$$Q_e(p) = S_e \cdot p \cdot Z(p) - \frac{V_{e0}}{B_e} \cdot p \cdot P_e(p)$$

$$Q_h(p) = S_h \cdot p \cdot Z(p) + \frac{V_{h0}}{B_h} \cdot p \cdot P_h(p)$$

QUESTION 18

J'isole le piston.

Il est soumis à :

- Actions du fluide dans la chambre C_h sur le piston
- Actions du fluide dans la chambre C_e sur le piston
- Actions de la pesanteur sur le piston.
- Actions des frottements fluides sur le piston.

PFD appliqué au piston, en résultante en projection sur \vec{z} , dans le référentiel galiléen :

- Actions du fluide dans la chambre C_h sur le piston : $\overline{F_e(t)} = -S_e \cdot p_e(t) \cdot \vec{z}$
- Actions du fluide dans la chambre C_e sur le piston : $\overline{F_h(t)} = +S_h \cdot p_h(t) \cdot \vec{z}$
- Actions de la pesanteur sur le piston. : $\overline{P} = -M \cdot g \cdot \vec{z}$
- Actions des frottements fluides sur le piston : $\overline{F_f(t)} = -f \cdot z(t) \cdot \vec{z}$.

Soit : $M \cdot \ddot{z}(t) = S_h \cdot p_h(t) - S_e \cdot p_e(t) - M \cdot g - f \cdot \dot{z}(t)$ Equation de mouvement du piston

$$M \cdot p^2 \cdot Z(p) = S_h \cdot P_h(p) - S_e \cdot P_e(p) - \frac{M \cdot g}{p} - f \cdot p \cdot Z(p)$$

L'équation recherchée est : $(f \cdot p + M \cdot p^2) \cdot Z(p) = S_h \cdot P_h(p) - S_e \cdot P_e(p) - \frac{M \cdot g}{p}$

QUESTION 19

J'isole l'équipage mobile.

Il est soumis à :

- Actions du tube sur l'équipage mobile
- Actions du fluide sur les surfaces S_a et S_b de l'équipage mobile
- Actions des frottements fluides sur l'équipage mobile.

PFD appliqué au piston, en résultante en projection sur l'axe du tube, dans le référentiel galiléen :

- Actions du tube sur l'équipage mobile : $\overline{F_t(t)} = -r \cdot L(t) \cdot \vec{x}$
- Actions du fluide sur les surfaces S_a et S_b de l'équipage mobile: $\overline{F_h(t)} = (S_a - S_b) \cdot p_e(t) \cdot \vec{x}$
- Actions des frottements fluides sur l'équipage mobile : $\overline{F_f(t)} = -f' \cdot L(t) \cdot \vec{x}$.

Soit : $m \cdot \ddot{L}(t) = -r \cdot L(t) + (S_a - S_b) \cdot p_e(t) - f' \cdot L(t)$ Equation de mouvement de l'équipage mobile.

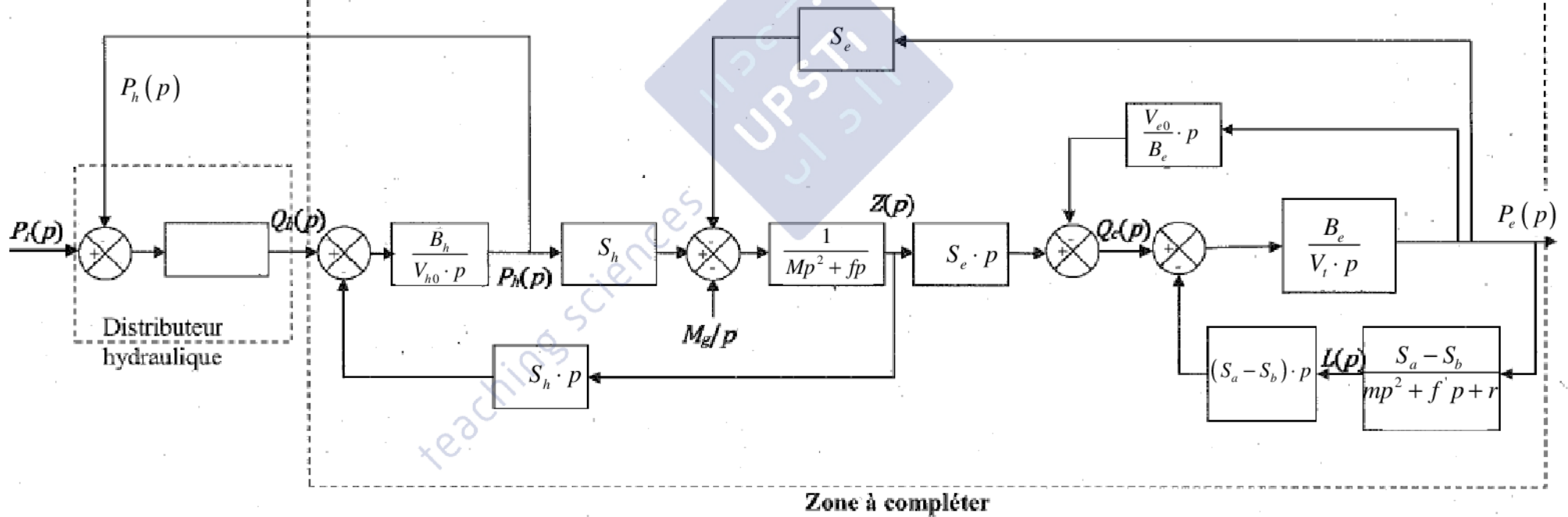
Les deux équations recherchées sont : $Q_e(p) = (S_a - S_b) p \cdot L(p) + \frac{V_t}{B_e} \cdot p \cdot P_e(p)$ (Equation 4)

$$m \cdot p^2 \cdot L(p) = -r \cdot L(p) + (S_a - S_b) \cdot P_e(p) - f' \cdot p \cdot L(p)$$

QUESTION 20

$m \cdot p^2 \cdot L(p) = -r \cdot L(p) + (S_a - S_b) \cdot P_e(t) - f' \cdot p \cdot L(p)$ permet d'écrire :
 $(m \cdot p^2 + f' \cdot p + r) \cdot L(p) = (S_a - S_b) \cdot P_e(t)$

Question 20



QUESTION 21

Ces réponses ne présentent pas de dépassement et une tangente non nulle à l'origine. On les identifie à des

1^{ers} ordres de la forme : $H_i(p) = \frac{P_i(p)}{P_r(p)} = \frac{K_i}{1 + \tau_i \cdot p}$

La valeur finale de la réponse à un échelon d'un 1^{er} ordre est $s_i(\infty) = K_i \cdot e_{i0}$ soit $K_i = \frac{s_i(\infty)}{e_{i0}}$

$$K_h = \frac{s_h(\infty)}{e_{h0}} \quad K_h = \frac{250}{250} \quad K_h = 1$$

$$K_e = \frac{s_e(\infty)}{e_{e0}} \quad K_e = \frac{800}{250} \quad K_e = 3.2$$

La constante de temps se déterminer par l'une des 3 méthodes suivantes :

Méthode 1 : la tangente à l'origine atteint la valeur finale à $t = \tau$

$$\tau_h = 15 \text{ s} \quad \tau_e = 17 \text{ s}$$

Méthode 2 : pour $t = \tau$, la courbe atteint 63% de la valeur finale.

$$63\% \cdot s_h(\infty) = 0.63 \cdot 250 = 157.7 \text{ atteint pour } \tau_h = 14 \text{ s}$$

$$63\% \cdot s_e(\infty) = 0.63 \cdot 800 = 504 \text{ atteint pour } \tau_e = 14 \text{ s}$$

Méthode 3 : pour $t = 3 \cdot \tau$, la courbe atteint 95% de la valeur finale.

$$95\% \cdot s_h(\infty) = 0.95 \cdot 250 = 237.5 \text{ atteint pour } 3 \cdot \tau_h = 28.2 \text{ s} \quad \tau_h = 9.4 \text{ s}$$

$$95\% \cdot s_e(\infty) = 0.95 \cdot 800 = 760 \text{ atteint pour } 3 \cdot \tau_e = 28.2 \text{ s} \quad \tau_e = 9.4 \text{ s}$$

Les 3 méthodes donnent normalement sensiblement les mêmes valeurs, ce qui n'est pas le cas ici. Les raisons sont :

- La valeur finale prise n'est pas forcément la bonne valeur (la courbe semble évoluer encore).
- La modélisation sous la forme d'un premier ordre n'est sans doute pas pertinente.

On choisira la méthode 3, qui donne les mêmes valeurs avec, a priori, l'erreur de construction la plus faible.

Finalement :

$$\frac{P_h(p)}{P_r(p)} = \frac{1}{1 + 9.4 \cdot p}$$

$$\frac{P_e(p)}{P_r(p)} = \frac{3.2}{1 + 9.4 \cdot p}$$

QUESTION 22

A l'instant $t = 35 \text{ s}$, un échelon de débit de fuite est appliqué au système.

La réponse ne présente pas de dépassement et une tangente non nulle à l'origine. On l'identifie à un 1^{er}

ordre. $\frac{P_e(p)}{\Delta Q_e(p)} = \frac{K_f}{1 + \tau_f \cdot p}$

La valeur finale de la réponse à un échelon d'un 1^{er} ordre est $s_i(\infty) = K_i \cdot e_{i0}$ soit $K_i = \frac{s_i(\infty)}{e_{i0}}$

La valeur initiale est de 800 bars. La valeur finale est de 480 bars.

On effectue un changement d'origine par une translation de la courbe de -800 bars :

La nouvelle valeur initiale est de 0 bars. La nouvelle valeur finale est de -320 bars.

$$K_f = \frac{s_f(\infty)}{e_{f0}} \quad K_f = \frac{-320}{2 \cdot 10^{-3}} \quad K_f = 160000 \text{ bar}/(\text{m}^3/\text{s})$$

On choisit la méthode 3 :

Méthode 3 : pour $t = 3 \cdot \tau$, la courbe atteint 95% de la valeur finale.

$$95\% \cdot s_f(\infty) = 0.95 \cdot -320 = -304 \text{ atteint pour } t = 77 \text{ s}$$

$$3 \cdot \tau_f = 42 \text{ s}$$

$$\tau_f = 14 \text{ s}$$

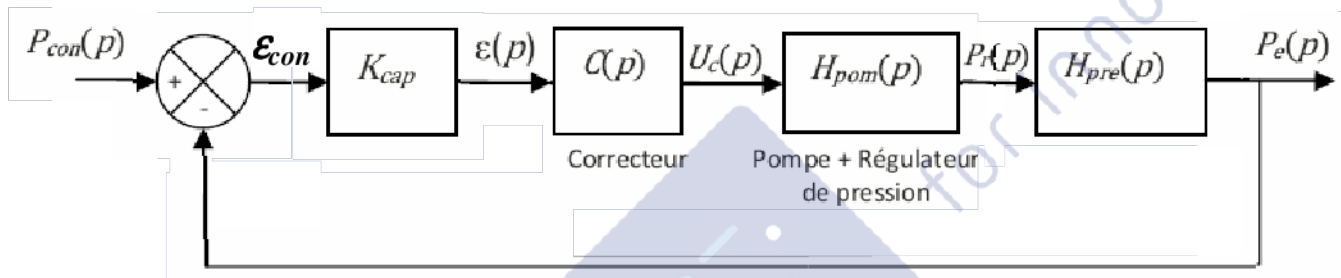
Finalement :

$$\frac{P_e(p)}{\Delta Q_e(p)} = \frac{160000}{1+14 \cdot p}$$

QUESTION 23

QUESTION 23a

On transforme le schéma bloc en se ramenant à un retour unitaire, le débit de fuite étant nul :



$$\text{Soit : } \frac{P_e(p)}{\epsilon_{con}(p)} = K_p \cdot \frac{K_m}{1+T_1 \cdot p} \cdot \frac{K_{pom}}{1+T_2 \cdot p} \cdot K_{cap} \quad \text{d'où } K_{BO} = K_p \cdot K_m \cdot K_{pom} \cdot K_{cap}$$

Le système étant de classe 0, l'erreur statique relative est : $\epsilon_{con\%} = \frac{1}{1+K_{BO}}$

L'énoncé parle de l'erreur statique ϵ_{con} alors que le Cahier de Charges donne une erreur statique $\epsilon_{con} < 5\%$.

On préférera parler ici d'erreur statique relative $\epsilon_{con\%}$.

$$\epsilon_{con\%} = \frac{1}{1+K_p \cdot K_m \cdot K_{pom} \cdot K_{cap}}$$

QUESTION 23b

On désire avoir $\epsilon_{con\%} < 5\%$

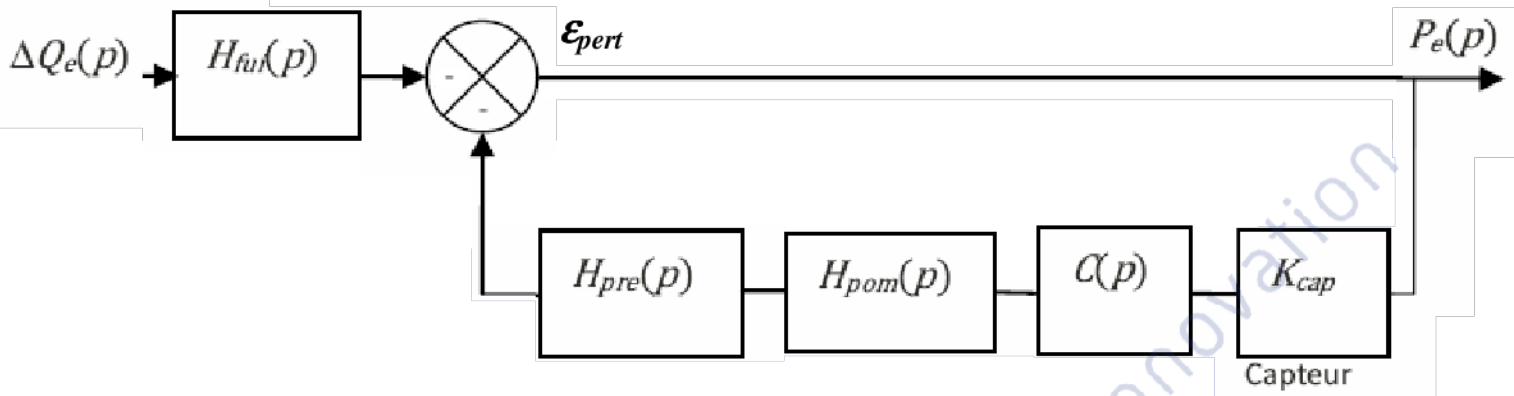
$$\begin{aligned} \text{Soit : } \frac{1}{1+K_p \cdot K_m \cdot K_{pom} \cdot K_{cap}} &< 0.05 \\ 1 &< 0.05 + 0.05 \cdot K_p \cdot K_m \cdot K_{pom} \cdot K_{cap} \\ 0.95 &< 0.05 \cdot K_p \cdot K_m \cdot K_{pom} \cdot K_{cap} \\ K_p &> \frac{0.95}{0.05 \cdot K_m \cdot K_{pom} \cdot K_{cap}} \end{aligned}$$

$$K_p > \frac{0.95}{0.05 \cdot 3.24 \cdot 1.234 \cdot 10^7 \cdot 2.5 \cdot 10^{-8}}$$

$$K_p > 19$$

QUESTION 23c

Si $P_{con}(p) = 0$, le schéma bloc devient :



$$P_e(p) = -\Delta Q_e(p) \cdot H_{fui}(p) - P_e(p) \cdot K_{cap} \cdot C(p) \cdot H_{pom}(p) \cdot H_{pre}(p)$$

$$P_e(p) (1 + K_{cap} \cdot C(p) \cdot H_{pom}(p) \cdot H_{pre}(p)) = -\Delta Q_e(p) \cdot H_{fui}(p)$$

$$P_e(p) = -\Delta Q_e(p) \cdot \frac{H_{fui}(p)}{1 + K_{cap} \cdot C(p) \cdot H_{pom}(p) \cdot H_{pre}(p)}$$

$$\frac{P_e(p)}{\Delta Q_e(p)} = -\frac{H_{fui}(p)}{1 + K_{cap} \cdot C(p) \cdot H_{pom}(p) \cdot H_{pre}(p)} \quad \frac{P_e(p)}{\Delta Q_e(p)} = -\frac{\frac{K_f}{1+T_1 \cdot p}}{1 + K_{cap} \cdot K_p \cdot \frac{K_m}{1+T_1 \cdot p} \cdot \frac{K_{pom}}{1+T_1 \cdot p}}$$

$$\frac{P_e(p)}{\Delta Q_e(p)} = -\frac{K_f \cdot (1+T_1 \cdot p) \cdot (1+T_2 \cdot p)}{(1+T_1 \cdot p) \cdot ((1+T_1 \cdot p) \cdot (1+T_2 \cdot p) + K_{cap} \cdot K_p \cdot K_m \cdot K_{pom})}$$

$$\varepsilon_{pert} = \lim_{t \rightarrow \infty} (p_e(t)) \text{ car } \varepsilon_{pert}(p) = P_e(p) \text{ et, par le théorème de la valeur finale : } \varepsilon_{pert} = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot (P_e(p))$$

$$\text{Or } \varepsilon_{pert}(p) = P_e(p) = -\Delta Q_e(p) \cdot \frac{K_f \cdot (1+T_1 \cdot p) \cdot (1+T_2 \cdot p)}{(1+T_1 \cdot p) \cdot ((1+T_1 \cdot p) \cdot (1+T_2 \cdot p) + K_{cap} \cdot K_p \cdot K_m \cdot K_{pom})}$$

$$\varepsilon_{pert}(p) = -\frac{\Delta Q_e}{p} \cdot \frac{K_f \cdot (1+T_1 \cdot p) \cdot (1+T_2 \cdot p)}{(1+T_1 \cdot p) \cdot ((1+T_1 \cdot p) \cdot (1+T_2 \cdot p) + K_{cap} \cdot K_p \cdot K_m \cdot K_{pom})}$$

$$\varepsilon_{pert} = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot (\varepsilon_{pert}(p)) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot \left(-\frac{\Delta Q_e}{p} \cdot \frac{K_f \cdot (1+T_1 \cdot p) \cdot (1+T_2 \cdot p)}{(1+T_1 \cdot p) \cdot ((1+T_1 \cdot p) \cdot (1+T_2 \cdot p) + K_{cap} \cdot K_p \cdot K_m \cdot K_{pom})} \right)$$

$$\varepsilon_{pert} = -\Delta Q_e \cdot \frac{K_f}{1 + K_{cap} \cdot K_p \cdot K_m \cdot K_{pom}}$$

$$\text{On prendra la valeur absolue : } \varepsilon_{pert} = \Delta Q_e \cdot \frac{K_f}{1 + K_{cap} \cdot K_p \cdot K_m \cdot K_{pom}}$$

QUESTION 23d

On désire avoir $\varepsilon_{pert} < 40$ bars

$$\text{Soit : } \Delta Q_e \cdot \frac{K_f}{1 + K_{cap} \cdot K_p \cdot K_m \cdot K_{pom}} < 40$$

$$\Delta Q_e \cdot K_f < 40 + 40 \cdot K_{cap} \cdot K_p \cdot K_m \cdot K_{pom}$$

$$\Delta Q_e \cdot K_f - 40 < 40 \cdot K_{cap} \cdot K_p \cdot K_m \cdot K_{pom}$$

$$K_p > \frac{\Delta Q_e \cdot K_f - 40}{40 \cdot K_{cap} \cdot K_m \cdot K_{pom}}$$

$$K_p > \frac{5 \cdot 10^{-4} \cdot 2.55 \cdot 10^5 - 40 \cdot 10^5}{40 \cdot 10^5 \cdot 2 \cdot 10^{-8} \cdot 3.24 \cdot 1.234 \cdot 10^7}$$

$$K_p > 2.19$$

QUESTION 24

Le Cahier des Charges impose qu'il n'y ait pas de dépassement, soit un coefficient d'amortissement ξ de la fonction de transfert $\frac{P_e(p)}{P_{con}(p)}$ supérieur à 1

$$\frac{P_e(p)}{P_{con}(p)} = \frac{K_p \cdot K_m \cdot K_{pom} \cdot K_{cap}}{(1+T_1 \cdot p) \cdot (1+T_2 \cdot p)} = \frac{K_p \cdot K_m \cdot K_{pom} \cdot K_{cap}}{1 + \frac{K_p \cdot K_m \cdot K_{pom} \cdot K_{cap}}{(1+T_1 \cdot p) \cdot (1+T_2 \cdot p)}} = \frac{K_p \cdot K_m \cdot K_{pom} \cdot K_{cap}}{(1+T_1 \cdot p) \cdot (1+T_2 \cdot p) + K_p \cdot K_m \cdot K_{pom} \cdot K_{cap}}$$

$$\frac{P_e(p)}{P_{con}(p)} = \frac{K_p \cdot K_m \cdot K_{pom} \cdot K_{cap}}{1 + K_p \cdot K_m \cdot K_{pom} \cdot K_{cap} + (T_1 + T_2) \cdot p + T_1 \cdot T_2 \cdot p^2}$$

$$\frac{P_e(p)}{P_{con}(p)} = \frac{K_p \cdot K_m \cdot K_{pom} \cdot K_{cap}}{1 + \frac{T_1 + T_2}{1 + K_p \cdot K_m \cdot K_{pom} \cdot K_{cap}} \cdot p + \frac{T_1 \cdot T_2}{1 + K_p \cdot K_m \cdot K_{pom} \cdot K_{cap}} \cdot p^2} = \frac{K_{BF}}{1 + \frac{2 \cdot \xi_{BF}}{\omega_{BF}} \cdot p + \frac{p^2}{\omega_{BF}^2}}$$

Ainsi, par identification :

$$\frac{1}{\omega_{BF}^2} = \frac{T_1 \cdot T_2}{1 + K_p \cdot K_m \cdot K_{pom} \cdot K_{cap}} \quad \omega_{BF} = \sqrt{\frac{1 + K_p \cdot K_m \cdot K_{pom} \cdot K_{cap}}{T_1 \cdot T_2}}$$

$$\frac{2 \cdot \xi_{BF}}{\omega_{BF}} = \frac{T_1 + T_2}{1 + K_p \cdot K_m \cdot K_{pom} \cdot K_{cap}} \quad \xi_{BF} = \frac{\omega_{BF}}{2} \cdot \frac{T_1 + T_2}{1 + K_p \cdot K_m \cdot K_{pom} \cdot K_{cap}}$$

$$\text{Finalement : } \xi_{BF} = \frac{T_1 + T_2}{2 \cdot \sqrt{T_1 \cdot T_2} \cdot (1 + K_p \cdot K_m \cdot K_{pom} \cdot K_{cap})}$$

On désire avoir $\xi > 1$

$$\text{Soit : } \frac{T_1 + T_2}{2 \cdot \sqrt{T_1 \cdot T_2} \cdot (1 + K_p \cdot K_m \cdot K_{pom} \cdot K_{cap})} > 1$$

$$(T_1 + T_2)^2 > 4 \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot (1 + K_p \cdot K_m \cdot K_{pom} \cdot K_{cap})$$

$$(T_1 + T_2)^2 > 4 \cdot T_1 \cdot T + 4 \cdot T_1 \cdot T \cdot K_p \cdot K_m \cdot K_{pom} \cdot K_{cap}$$

$$4 \cdot T_1 \cdot T \cdot K_p \cdot K_m \cdot K_{pom} \cdot K_{cap} < (T_1 + T_2)^2 - 4 \cdot T_1 \cdot T$$

$$K_p < \frac{(T_1 + T_2)^2 - 4 \cdot T_1 \cdot T}{4 \cdot T_1 \cdot T \cdot K_m \cdot K_{pom} \cdot K_{cap}}$$

$$K_p < \frac{(10+5)^2 - 4 \cdot 10 \cdot 5}{4 \cdot 10 \cdot 5 \cdot 3.24 \cdot 1.234 \cdot 10^7 \cdot 2.5 \cdot 10^{-8}}$$

$$K_p < 0.125$$

Critère n°1 : $\varepsilon_{con\%} < 5\%$ implique $K_p > 19$

Critère n°2 : $\varepsilon_{pert} < 40$ bars implique $K_p > 2.19$

Critère n°3 : $\xi > 1$ implique $K_p < 0.125$

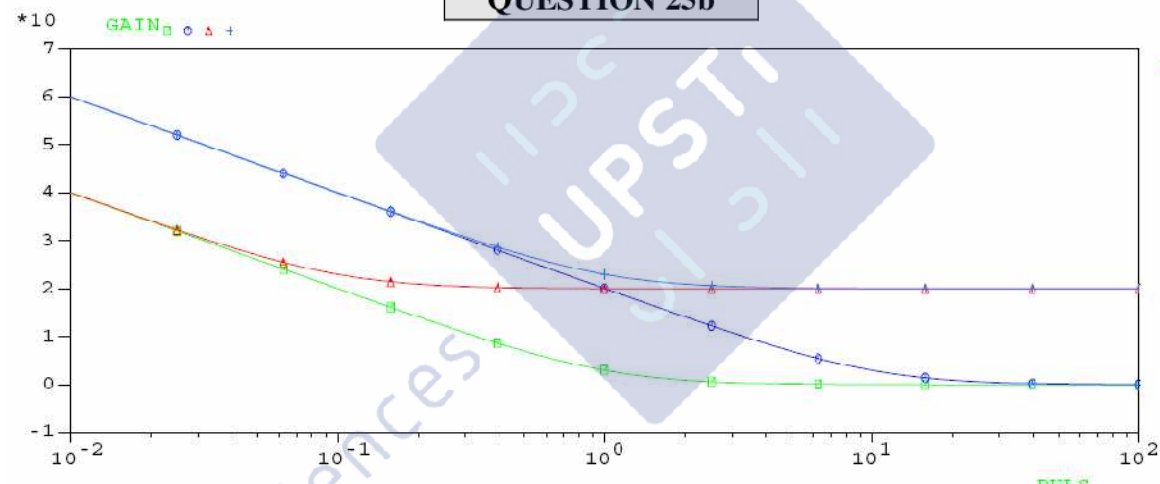
Il est impossible de vérifier les trois conditions avec un correcteur proportionnel

QUESTION 25a

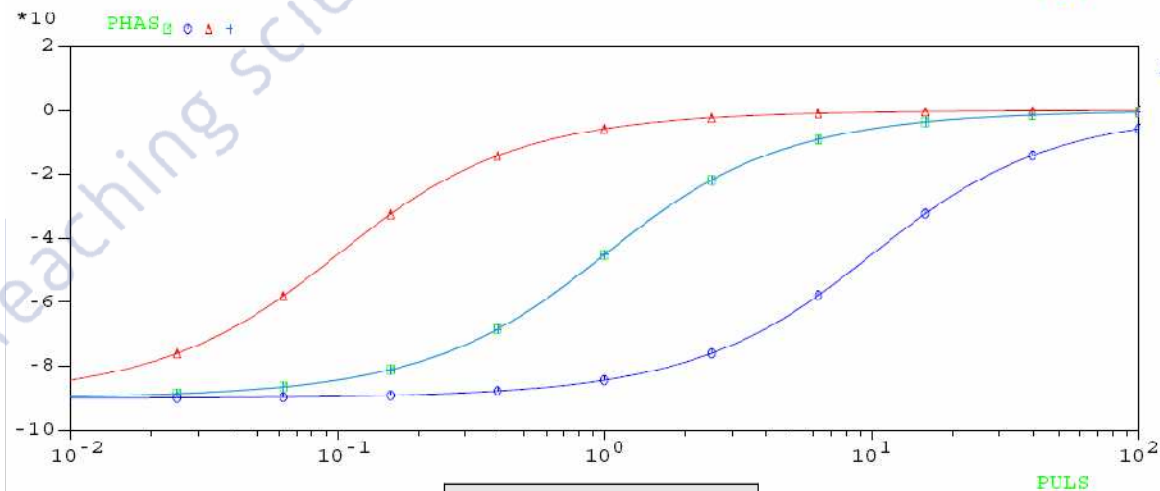
$$C(p) = \frac{U_c(p)}{\varepsilon(p)} \quad \text{or} \quad U_c(p) = \varepsilon(p) \cdot \left(\frac{K_i}{p} + K_p \right) \quad U_c(p) = \varepsilon(p) \cdot \left(\frac{K_i + K_p \cdot p}{p} \right)$$

$$C(p) = \frac{K_i + K_p \cdot p}{p}$$

QUESTION 25b



CADRE 1	
■	GAIN
	Kp=1
	Ki=1
■	PULS
	Kp=1
	Ki=1
○	GAIN
	Kp=1
	Ki=10
○	PULS
	Kp=1
	Ki=10
▲	GAIN
	Kp=10
	Ki=1
▲	PULS
	Kp=10
	Ki=1
+	GAIN
	Kp=10
	Ki=10
+	PULS
	Kp=10
	Ki=10



QUESTION 25c

La présence d'un intégrateur dans ce correcteur, placé avant la perturbation, permet d'annuler $\varepsilon_{con\%}$ et ε_{pert} . Par contre, ce correcteur étant à retard de phase, il tend à détériorer la stabilité du système.

QUESTION 26

QUESTION 26a

On désire avoir $t_e < 40$ s

L'énoncé donne : $t_e \cdot \omega_{0dB} = 3$ $t_e = \frac{3}{\omega_{0dB}}$ $\frac{3}{\omega_{0dB}} < 40$ $\omega_{0dB} > \frac{3}{40}$

$\omega_{0dB} > 0.075$ rad/s

QUESTION 26b

On se place à la limite $\omega_{0dB} = 0.075$ rad/s

La boucle ouverte de l'asservissement en pression sans correction est donné par :

$$\frac{P_e(p)}{\varepsilon_{con}(p)} = \frac{K_m \cdot K_{pom} \cdot K_{cap}}{(1+T_1 \cdot p) \cdot (1+T_2 \cdot p)}$$

$$\varphi(\omega) = -\arctan(T_1 \cdot \omega) - \arctan(T_2 \cdot \omega) \quad \varphi(0.075) = -\arctan(T_1 \cdot 0.075) - \arctan(T_2 \cdot 0.075)$$

Soit $\varphi(0.075) = -57^\circ$ Ce qui donne : $M\varphi = 123^\circ$

Le correcteur doit donc être réglé de manière à ce que sa phase, pour $\omega_{0dB} = 0.075$ rad/s, ne soit pas inférieur à -63° .

$$\varphi_c(\omega) = -90 - \arctan\left(\frac{K_p}{K_i} \cdot \omega\right) \quad \varphi_c(0.075) = -90 - \arctan\left(\frac{K_p}{K_i} \cdot 0.075\right)$$

On désire avoir $\varphi_c(0.075) > -27^\circ$

$$-90 + \arctan\left(\frac{K_p}{K_i} \cdot 0.075\right) > -27 \quad \arctan\left(\frac{K_p}{K_i} \cdot 0.075\right) > 27^\circ \quad \frac{K_p}{K_i} \cdot 0.075 > \tan(27)$$

$$T = \frac{K_p}{K_i} > \frac{\tan(27)}{0.075}$$

$T = \frac{K_p}{K_i} > 6.92$ La marge de phase est alors supérieure à 60°

QUESTION 26c

On désire que la pulsation de coupure à 0 dB en boucle ouverte ω_{0dB} soit égale à 0.075 rad/s.

Sans correction, $G_{dB}(\omega_{0dB}) = 20 \cdot \log(K_m \cdot K_{pom} \cdot K_{cap}) - 10 \cdot \log(1 + (T_1 \cdot \omega_{0dB})^2) - 10 \cdot \log(1 + (T_2 \cdot \omega_{0dB})^2)$

Avec $\omega_{0dB} = 0.075$ rad/s,

$$G_{dB}(0.075) = 20 \cdot \log(K_m \cdot K_{pom} \cdot K_{cap}) - 10 \cdot \log(1 + (T_1 \cdot 0.075)^2) - 10 \cdot \log(1 + (T_2 \cdot 0.075)^2)$$

$$G_{dB}(0.075) = 20 \cdot \log(3.24 \cdot 1.234 \cdot 10^7 \cdot 2.5 \cdot 10^{-8}) - 10 \cdot \log(1 + (10 \cdot 0.075)^2) - 10 \cdot \log(1 + (5 \cdot 0.075)^2)$$

$$G_{dB}(0.075) = -2.51 \text{ dB}$$

Il faut donc choisir le correcteur tel que : $G_{dBcor}(0.075) = +2.51 \text{ dB}$

Soit :

$$G_{dBcor}(\omega) = 20 \cdot \log\left(\left|\frac{K_i}{j \cdot \omega} + K_p\right|\right) = 20 \cdot \log\left(\left|\frac{K_i + K_p \cdot j \cdot \omega}{j \cdot \omega}\right|\right) = -20 \cdot \log(\omega) + 10 \cdot \log\left(\left|K_i \cdot \left(1 + \frac{K_p}{K_i} \cdot j \cdot \omega\right)\right|\right)$$

$$G_{dBcor}(\omega) = -20 \cdot \log(\omega) + 20 \cdot \log(K_i) + 10 \cdot \log\left(1 + \left(\frac{K_p}{K_i} \cdot \omega\right)^2\right)$$

soit : $G_{dBcor}(0.075) = +2.51 = -20 \cdot \log(0.075) + 20 \cdot \log(K_i) + 10 \cdot \log\left(1 + (6.92 \cdot 0.075)^2\right)$

$$20 \cdot \log(K_i) = +2.51 + 20 \cdot \log(0.075) - 10 \cdot \log\left(1 + (6.92 \cdot 0.075)^2\right)$$

$$20 \cdot \log(K_i) = -21.0$$

$$\boxed{K_i = 0.089} \text{ pour avoir } \omega_{0dB} = 0.075 \text{ rad/s}$$

$\frac{K_p}{K_i} > 6.92$ donc $K_p > K_i \cdot 6.92$ soit $K_p > 0.615$. On choisit : $\boxed{K_p = 0.615}$

QUESTION 27

Sur la figure 15 :

- $\omega_{0dB} = 0.1 \text{ rad/s}$ $\omega_{0dB} = 0.075 \text{ rad/s}$ Critère de rapidité respecté
- $\varphi(\omega_{0dB}) = -127^\circ$ $M\varphi = 63^\circ$ $M\varphi > 60^\circ$ Critère de stabilité vis-à-vis de la phase respecté
- $\varphi(\omega) > -180^\circ$ $MG = \infty$ $MG = 12dB$ Critère de stabilité vis-à-vis du gain respecté

Sur la figure 16 :

- $\varepsilon_{con\%} = 0\%$ $\varepsilon_{con\%} < 5\%$ Critère de l'erreur statique due à la consigne respecté
- $\varepsilon_{pert} = 0 \text{ bars}$ $\varepsilon_{pert} < 40 \text{ bars}$ Critère de l'erreur statique due à la perturbation respecté
- Pas de dépassement Critère d'amortissement respecté

Tous les critères du Cahier des Charges sont respectés