



Proposition de corrigé

Concours : Concours Centrale-Supélec

Année : 2012

Filière : TSI

Épreuve : Sciences Industrielles 2

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

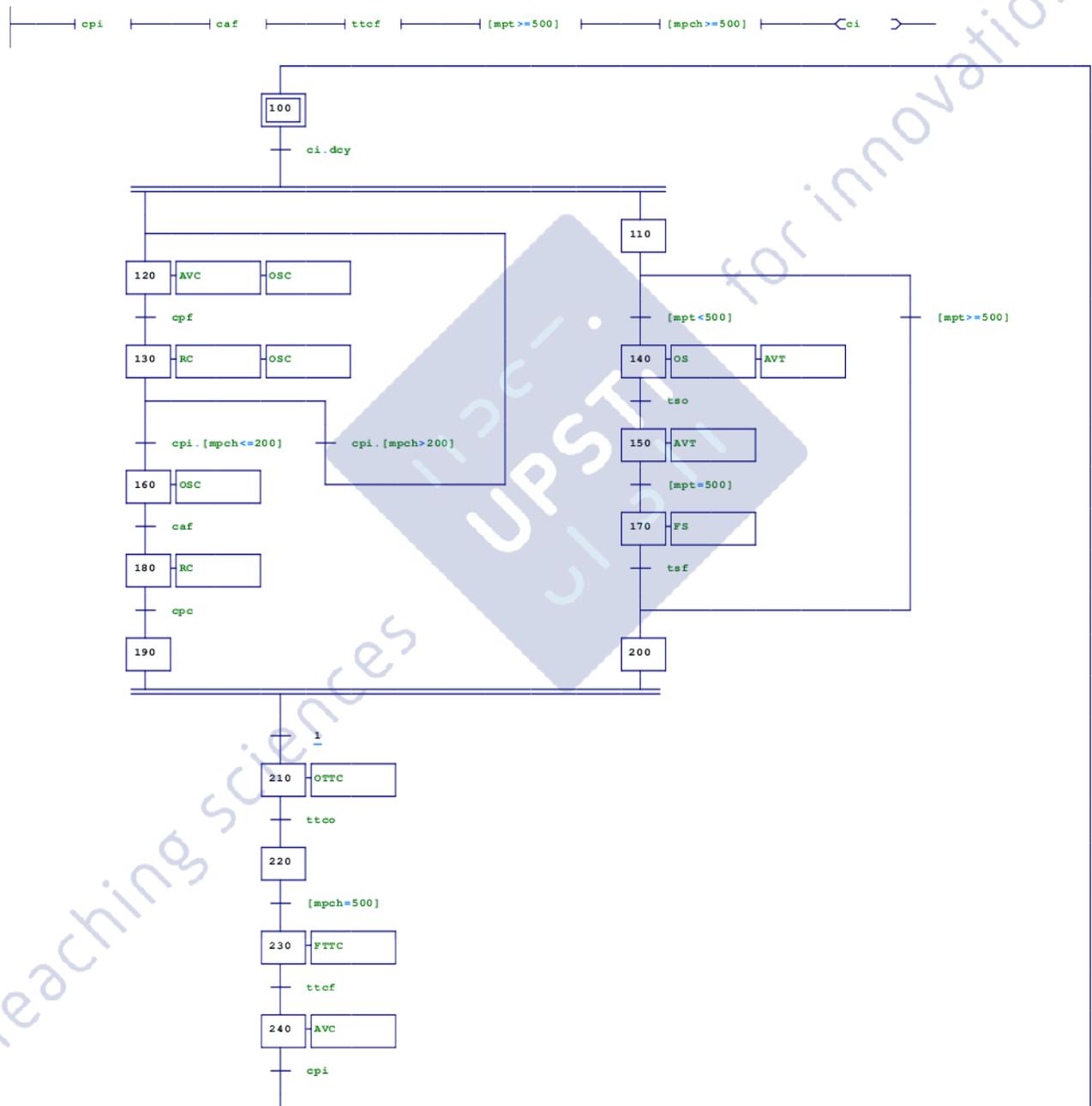
L'équipe UPSTI

Ligne de Fabrication de Laine de verre

I REALISATION DE LA FONCTION « DISTRIBUER LA POUDRE DE VERRE A LA SURFACE DU FOUR »

IA Organisation du cycle de distribution

Q1 Grafcet du cycle



IB Mesure du poids de la poudre présente dans la trémie du chariot de l'enfourneuse

Q2 On isole d'ensemble {cadre support ; chariot}. Le théorème de la résultante appliqué au système isolé donne, en projection sur \vec{y}_0 ,

$$2.F_1 + 2.F_3 = (m_{cv} + m_{pc} + m_{cs})g, \text{ ce qui donne } m_{pc} = \frac{2.F_1 + 2.F_3}{g} - m_{cv} - m_{cs}$$

Q3 Le théorème du moment appliqué en un point d'abscisse $x = -x_{ar} = -1235 \text{ mm}$ au système isolé donne, en projection sur \vec{z}_0 ,

$$2.F_3.(x_{av} + x_{ar}) - (m_{cv} + m_{pc}).g.(x + x_{ar}) - m_{cs}.g.\frac{(x_{av} + x_{ar})}{2} = 0$$

Et donc $F_3 = \frac{1}{2} \left[(m_{cv} + m_{pc}).g.\frac{(x + x_{ar})}{(x_{av} + x_{ar})} + \frac{m_{cs}.g}{2} \right]$ et aussi $F_3 = 0,7035.x + 3934,5$.

On obtient aussi, avec $2.F_1 + 2.F_3 - (m_{cv} + m_{pc} + m_{cs}).g = 0$, $F_1 = 7494,1 - 0,7035.x$

Q4 Pour $x = x_f = 4200 \text{ mm}$ on a $F_{3 \text{ Maxi}} = 6890 \text{ N}$ et $F_{1 \text{ mini}} = 4539 \text{ N}$

Pour $x = x_r = -1000 \text{ mm}$ on a $F_{3 \text{ mini}} = 3230 \text{ N}$ et $F_{1 \text{ Maxi}} = 8197 \text{ N}$.

Q5 L'étendue de mesure des capteurs étant de 0 à 1.10^4 N , leur choix est correct.

I.C Détermination du débit de poudre de verre à la sortie du chariot de l'enfourneuse

Q6 On a $Q_{m \text{ moy}} = f_c . h_c . R_c . L_c . \rho_v \text{ apparent}$.

Q7 Influence des paramètres :

v_c : si v_c augmente, alors l'épaisseur de la couche de verre, par aller – retour, diminue.

f_c : si f_c augmente, alors l'épaisseur de la couche de verre augmente.

h_c : si h_c augmente, alors l'épaisseur de la couche de verre augmente et la forme de la couche est moins régulière.

R_c : si R_c augmente, alors l'épaisseur de la couche de verre augmente et la forme de la couche est moins régulière.

Q8 $Q_{m \text{ moy Maxi}} = 4,95 \text{ kg.s}^{-1}$ et $Q_{m \text{ moy mini}} = 4,1.10^{-2} \text{ kg.s}^{-1}$

Q9 La poudre sort de la casquette avec un débit moyen $Q_{m \text{ moy}}$. Pour déposer $m_{pc+} = 300 \text{ kg}$ de

poudre il faut un temps T_d égal à $T_d = \frac{m_{pc+}}{Q_{m \text{ moy}}} = \frac{m_{pc+}}{f_c . h_c . R_c . L_c . \rho_v \text{ apparent}}$.

À la vitesse v_c , un aller et retour se fait en un temps $t_{ar} = \frac{2.L_{tr}}{v_c}$. Le nombre minimal d'allers et

retours nécessaire pour déposer au minimum $m_{pc+} = 300 \text{ kg}$ de poudre est :

$$N_{ar} = E\left(\frac{T_d}{t_{ar}}\right) + 1 = E\left(\frac{m_{pc+} . v_c}{f_c . h_c . R_c . L_c . \rho_v \text{ apparent} . 2.L_{tr}}\right) + 1.$$

Q10 Pour les conditions proposées, le débit moyen de poudre vaut $Q_{m \text{ moy}} = 0,495 \text{ kg.s}^{-1}$ et donc le nombre d'aller retours est $N_{ar} = 5$.

Le temps d'un aller-retour étant $t_{ar} = 140 \text{ s}$, la masse de poudre réellement déposée est $m_{p \text{ réelle}} = N_{ar} . t_{ar} . Q_{m \text{ moy}} = 346,5 \text{ kg}$.

Q11 Le temps nécessaire aux 5 allers retours et à un rechargement est $T_r = 820 \text{ s}$. Pendant ce temps, $m_{p \text{ réelle}} = 346,5 \text{ kg}$ de poudre est déposé. Ce qui donne un débit massique réel

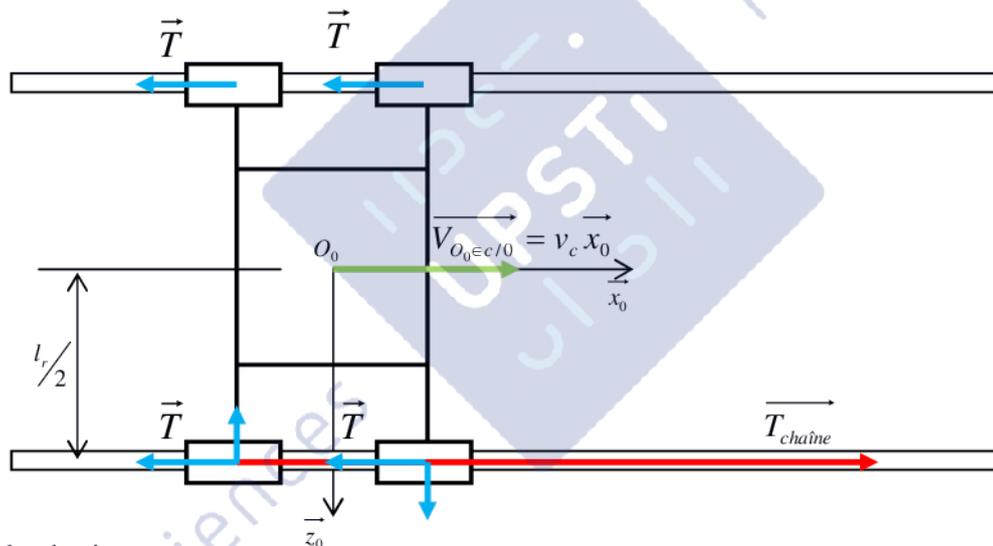
$$Q_{m \text{ réel}} = 0,422 \text{ kg.s}^{-1} \text{ soit } Q_{m \text{ réel}} = 36,5 \text{ tonnes/jour.}$$

Q16 Pour une pression de contact supposée uniforme on obtient $P = \frac{F}{L.d} = 2,9 \text{ MPa}$. Pour une pression de contact proportionnelle aux petits déplacements radiaux on a $P_{Maxi} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{F}{L.d} = 3,7 \text{ MPa}$. Dans les deux cas la pression maximale admissible n'est pas atteinte.

Avec $V_{F \in S/0} = 95 \text{ mm.s}^{-1}$, on a une vitesse tangentielle au contact de l'arbre sur le coussinet égale à $2,76 \text{ mm.s}^{-1}$ qui est très inférieure à la limite autorisée.

I.E Mise en mouvement et guidage en translation du chariot par rapport au cadre support
I.E.1 Justification qualitative de la présence d'un entraînement par chaîne de chaque côté du chariot

Q17

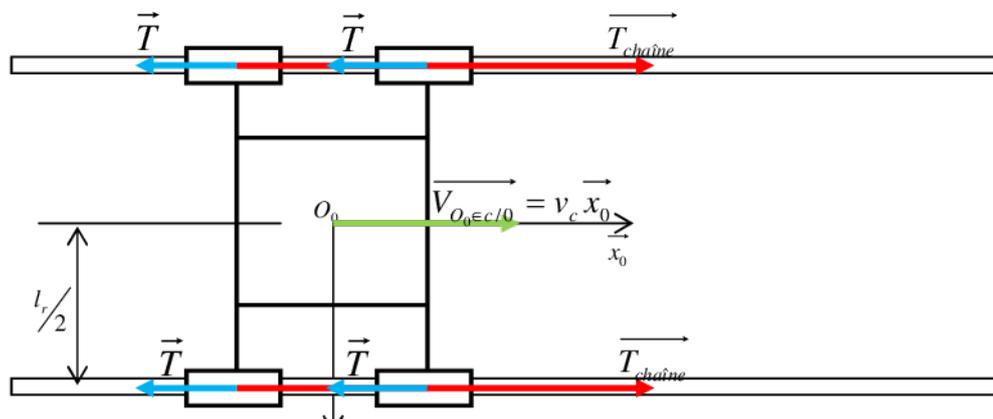


On isole le chariot.

Les actions connues sont : les actions des rails sur les galets ainsi que l'action de la chaîne sur le chariot.

Le théorème du moment dynamique appliqué au solide isolé en O_0 (solide en translation rectiligne) donne : $T_{chaîne} \cdot \frac{l_r}{2} + X = 0$; X étant le moment en O_0 des actions créés au niveau des épaulements des galets.

Q18



En l'absence d'actions créées au niveau des épaulements des galets, les actions exercées par chaque chaîne doivent être identiques si les résistances au roulement sont identiques au niveau de chaque galet.

I.E.2 Vérification du dimensionnement du moteur d'entraînement

Q19 Pour une vitesse maximale du chariot de $v_{c \text{ Max}} = 0,083 \text{ m.s}^{-1}$, on a $\omega_{mc/0} = 137,7 \text{ rad.s}^{-1}$ soit $N_{mc/0} = 1315 \text{ tr.min}^{-1}$. Le choix du moteur est correct.

Q20 L'énergie cinétique totale du sous ensemble isolé est :

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot [m_c \cdot v_c^2] + 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot [J_{at} \cdot \omega_{red/0}^2] = \frac{1}{2} \cdot \left[m_c \cdot \frac{d_{pc}^2}{4} + 2 \cdot J_{at} \right] \cdot \omega_{red/0}^2$$

L'application du théorème de l'énergie cinétique au sous ensemble isolé donne :

$$\left[m_c \cdot \frac{d_{pc}^2}{4} + 2 \cdot J_{at} \right] \cdot \dot{\omega}_{red/0} = C_{red/at} - f \cdot m_c \cdot g \cdot \frac{d_{pc}}{2}. \text{ Soit, } C_{red/at} = \left[m_c \cdot \frac{d_{pc}^2}{4} + 2 \cdot J_{at} \right] \cdot \dot{\omega}_{red/0} + f \cdot m_c \cdot g \cdot \frac{d_{pc}}{2}$$

Il vient, $C_{red/at} = 15,93 \text{ N.m}$.

Q21 On isole maintenant l'arbre du moteur. Le théorème du moment dynamique appliqué à cet arbre donne :

$$C_m - C_{red/am} = J_{am+red} \cdot \dot{\omega}_{am/0}. \text{ Avec } C_{red/am} = \frac{1}{\eta_r} \cdot \frac{1}{\rho_c} \cdot C_{at/red}, \text{ il vient, } C_m = 0,252 \text{ N.m}.$$

Q22 Cette valeur de couple est très inférieure à la valeur du couple moteur nominal (2,92 N.m). Les résistances au mouvement dans les différentes liaisons peuvent donc être prises en compte.

$$Q23 \quad \lambda = \frac{U_{mc} - R_a \cdot I_{mc}}{\frac{\pi}{30} N_{mc}} = 1,747 \text{ V.s}$$

Q24 En tenant compte du couple de pertes, le couple électromagnétique du moteur est : $C_m = 0,25 + 0,56 = 0,81 \text{ N.m}$, on déduit :

$$I_m = \frac{C_m}{\lambda} = \frac{0,81}{1,747} = 0,46 \text{ A}$$

$$Q25 \quad \langle u \rangle = \frac{1}{T_h} \int_0^{T_h} u(t) \cdot dt = \frac{1}{T_h} \cdot (a \cdot T_h \cdot (U_0) + (1-a) \cdot T_h \cdot (-U_0)) = (2a-1)U_0$$

La tension moyenne aux bornes du moteur doit être maximale pour la vitesse maximale. La tension moyenne maximale est obtenue pour la valeur maximale du rapport cyclique a.

Pour la vitesse maximale

$$\text{La vitesse angulaire maximale du moteur est : } \omega_{am/0} = \frac{2 \cdot v_c \cdot \rho_c}{d_{pc}} = 137,7 \text{ rad.s}^{-1}$$

La tension moteur maximale nécessaire sera donc : $\langle u \rangle_{max} = \lambda \cdot \omega_{am/0} + R_a \cdot I_m = 241,8 \text{ V}$

Pour la valeur U_{0mini} , cette tension sera obtenue avec le rapport cyclique maximal soit :

$$\langle u \rangle_{max} = (2a_{max} - 1)U_{0mini} \text{ donc } U_{0mini} = \frac{\langle u \rangle_{max}}{(2a_{max} - 1)} = 251,9 \text{ V}$$

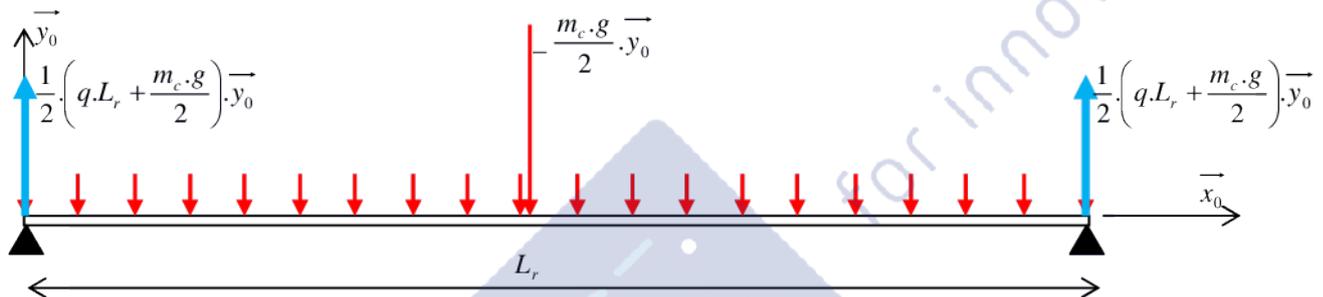
Q26 Si la tension U_0 est obtenue par un redressement mono alternance à partir du réseau monophasé 230V, on aura, si on ne tient pas compte des chutes de tension dans les diodes :

$$U_0 = \frac{2U_r \sqrt{2}}{\pi} = 207V .$$

Un redressement par pont PD2 ne peut pas suffire. Il faudra envisager un PD3 à partir du réseau 400V qui donnera une valeur moyenne de la tension redressée de 540V.

LF Supporter le chariot et maintenir une distance constante entre l'enfourneuse et la surface du four

Q27 La flèche maximale est obtenue lorsque le chariot est au milieu de la poutre.



Le moment de flexion maximal, obtenu au milieu de la poutre.

Q28 L'expression du moment de flexion maximal est :

$$M_{fz \text{ Maxi}} = \left(q \cdot L_r + \frac{m_c \cdot g}{2} \right) \cdot \frac{L_r}{4} - \frac{q \cdot L_r^2}{8} = 12,9 \cdot 10^3 \text{ N.m} .$$

On obtient ainsi une contrainte normale maximale en flexion de $\sigma_{\text{Maxi}} = -\frac{M_{fz \text{ Maxi}}}{I_{Gz}} \cdot y_{\text{mini}} = 23,3 \text{ MPa} .$

Cette contrainte est très inférieure à R_e . Le coefficient de sécurité est $s = 10$.

Q29 En négligeant l'effet du poids propre de la poutre, on se trouve dans le cas d'une poutre soumise à une charge concentrée au milieu de cette poutre. La flèche maximale vaut alors,

$$f_{\text{maxi}} = \frac{\frac{m_c \cdot g}{2} \cdot L_r^3}{48 \cdot E \cdot I_{Gz}} = 2,7 \text{ mm} . \text{ Cette valeur est très inférieure à la valeur maximale tolérée.}$$

II. REALISATION DE LA FONCTION « CHAUFFER LE VERRE DANS LE FOUR »

II.A Puissance de chauffe nécessaire

Q30 Puissance perdue par conduction, convection et rayonnement : $P_{\text{pertes}} = \frac{\Delta\theta}{R_{th}}$

S'il s'agit de maintenir à température constante le four il faudra que le système de chauffage compense cette puissance perdue soit : $P_{e0} = P_{\text{pertes}} = \frac{\Delta\theta}{R_{th}} = \frac{1250 - 20}{2,9 \cdot 10^{-3}} = 4,241 \cdot 10^5 \text{ W}$ soit

$$P_{e0} = 424,1 \text{ kW}$$

Q31 Bilan énergétique

L'énergie apportée au verre contenu dans le four pendant un temps dt est : $\left(P_e - P_s - \frac{\Delta\theta}{R_{th}}\right).dt$. Elle provoque une variation de température $d\theta$ telle que : $(P_e - P_s - P_{pertes}).dt = M.C.d\theta$

$$\text{Soit } d\theta = \frac{P_e - P_s - P_{pertes}}{M.C}.dt$$

Q32 Fonction de transfert

En reprenant l'expression $P_{pertes} = \frac{\Delta\theta}{R_{th}}$, on peut écrire : $\left(P_e - P_s - \frac{\Delta\theta}{R_{th}}\right).dt = M.C.d\theta$, de plus,

l'énoncé donne $\Delta\theta = \theta - \theta_a$ donc $d(\Delta\theta) = d\theta$. Soit : $\left(P_e - P_s - \frac{\Delta\theta}{R_{th}}\right).dt = M.C.d(\Delta\theta)$ d'où :

$$(P_e - P_s).R_{th} = \Delta\theta + M.C.R_{th} \cdot \frac{d(\Delta\theta)}{dt}$$

En appliquant la transformation de Laplace avec des conditions initiales nulles : $(P_e(p) - P_s(p)).R_{th} = \Delta\theta(p) + M.C.R_{th} \cdot p \cdot \Delta\theta(p)$ soit :

$$(P_e(p) - P_s(p)).R_{th} = \Delta\theta(p) + M.C.R_{th} \cdot p \cdot \Delta\theta(p) \quad \frac{\Delta\theta(p)}{P_e(p) - P_s(p)} = \frac{R_{th}}{1 + M.C.R_{th} \cdot p}$$

Gain statique : $R_{th} = 2,9.10^{-3} K.W^{-1}$ soit en dB $-50,75dB$

Constante de temps : $M.C.R_{th} = 100,8.10^3 s$

Q33 Régime statique.

La puissance fournie au bain de verre en fusion doit permettre à la fois de maintenir en température le verre (puissance P_{pertes} précédente) mais aussi de faire fondre la poudre de verre apportée. La production maximale de verre est de 37 tonnes par jours. En une seconde, la masse de poudre

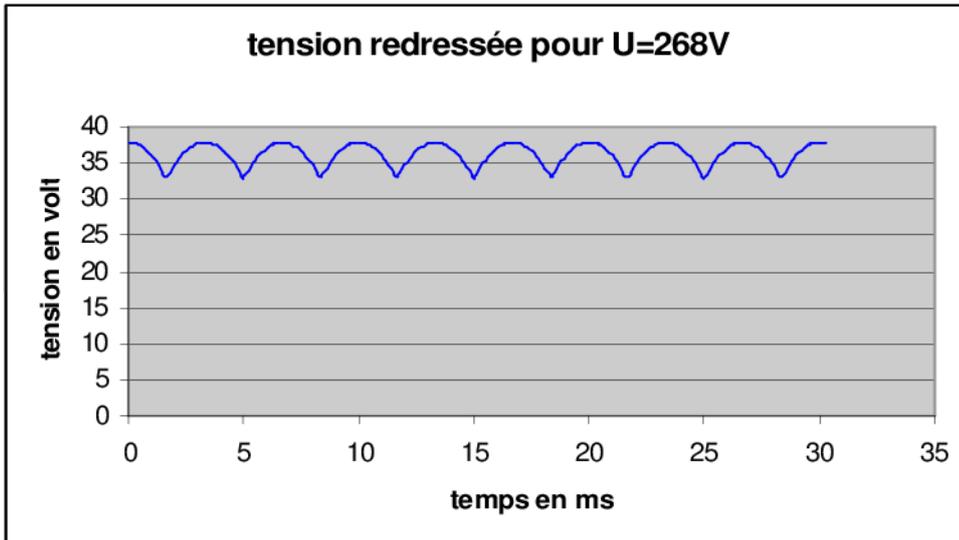
apportée est donc : $M_s = \frac{37.10^3}{24.3600} = 0,428kg$: La puissance à fournir est donc :

$P = P_{pertes} + C.M_s \cdot \Delta\theta_f$ soit $P = 1,156.10^6 W$. Cette puissance doit être apportée par le système de chauffage.

II.B Réglage de la puissance électrique apportée au four

II.B.2. Réalisation du capteur de tension

Q34 Image de la tension :



$U_{red\ max} = V_{max} \sqrt{3}$ et $\langle u_{red} \rangle = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} M.U$. La fréquence de l'ondulation de $u_{red}(t)$ est 6 fois la fréquence de la tension secteur soit 300Hz.

Q35 Fonction de transfert du filtre.

Notons U_2 la tension aux bornes du condensateur C_2 (référence à la masse). La loi des nœuds appliquée au nœud des trois résistances R et du condensateur C_2 donne :

$$\frac{U_{rf} - U_2}{R} + \frac{M_U - U_2}{R} - \frac{U_2}{R} - U_2 \cdot jC_2 \omega = 0$$

remarque : le théorème de Millman conduit à la même relation :
$$U_2 = \frac{\frac{U_{rf}}{R} + \frac{M_U}{R}}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R} + jC_2 \omega}$$

La loi des nœuds appliquée à l'entrée inverseuse de l'ALI donne :
$$\frac{U_2}{R} = -M_U jC_1 \omega$$

En éliminant U_2 de ces deux équations, on obtient :

$$\frac{M_U}{U_{rf}} = -\frac{1}{1 + 3R \cdot C_1 j \omega + R^2 C_1 C_2 (j \omega)^2}$$

Par identification on obtient :

facteur d'amortissement : $z = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{C_1}{C_2}}$ et pulsation propre : $\omega_0 = \frac{1}{R \sqrt{C_1 C_2}}$.

En continu, la fonction de transfert de ce filtre est égale à -1.

Q36 Dimensionnement du filtre

On obtient un facteur d'amortissement proche de 1 avec $C_1 = 0,47 \mu F$

Filtre du second ordre, donc que l'ondulation soit atténuée de 100 au moins, il faut que la pulsation propre du filtre soit inférieure ou égale à la pulsation de l'ondulation divisée par 10 soit :

$$\omega_0 < \frac{300.2\pi}{10} \quad \text{donc} \quad \omega_0 < 188 \text{ rad.s}^{-1} \quad \text{or} \quad \omega_0 = \frac{1}{R\sqrt{C_1 C_2}}$$

$$\frac{1}{R\sqrt{C_1 C_2}} < 188 \text{ rad}^{-1} \Rightarrow R > \frac{1}{188\sqrt{C_1 C_2}} = 7,76.10^3 \Omega \quad \text{On prendra } R = 10 \text{ k}\Omega.$$

En continu, sortie et entrée sont deux tensions opposées.

II.B.3. Réalisation de l'atténuateur

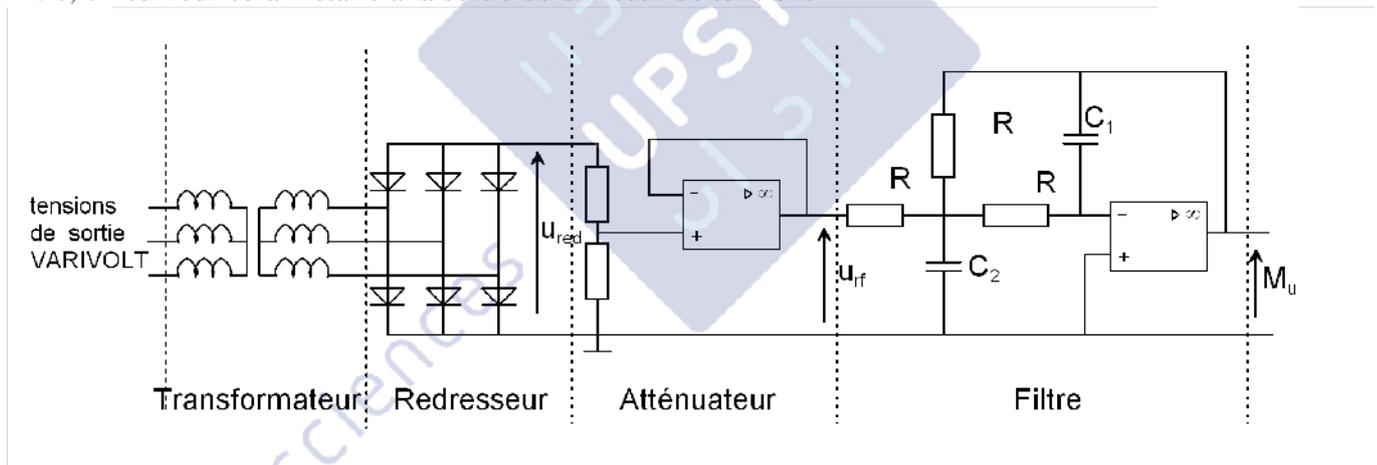
Q 37 Atténuateur

D'après les questions précédentes, la fonction de transfert du redresseur est $\frac{3\sqrt{2}}{\pi}$, celle du transformateur M . Notons H_{att} la fonction de transfert de l'atténuateur. On a alors :

$$M_U = M.U. \cdot \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot H_{att} \quad \text{d'où} : H_{att} = \frac{\pi \cdot M_U}{3\sqrt{2} \cdot M.U} = \frac{\pi \cdot M_{UMAX}}{3\sqrt{2} \cdot M.U_{MAX}} = 0,276$$

Soient R_1 et R_2 les résistances constituant l'atténuateur. $\frac{R_1}{R_1 + R_2} = 0,276 \Rightarrow R_1 = 0,382 R_2$

$R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ et $R_1 = 3,9 \text{ k}\Omega$ pourront convenir. Pour s'affranchir de l'impédance d'entrée du filtre, un suiveur sera installé à la sortie du diviseur de tension.



Autre solution : utiliser l'impédance d'entrée du filtre qui est la valeur de R choisie précédemment pour réaliser la résistance R_1 et adapter la valeur de R_2 . Il faudra alors $R_2 = 26,2 \text{ k}\Omega$.

Comme le filtre réalise une inversion, il faudra inverser le branchement du redresseur en branchant la masse du filtre sur les cathodes communes du pont.

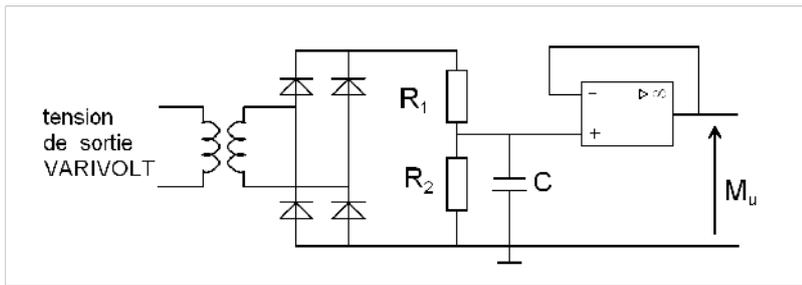
Q38 Le transformateur assure l'adaptation de tension et l'isolation galvanique entre les tensions issues du transformateur de puissance et la commande.

Autres solutions

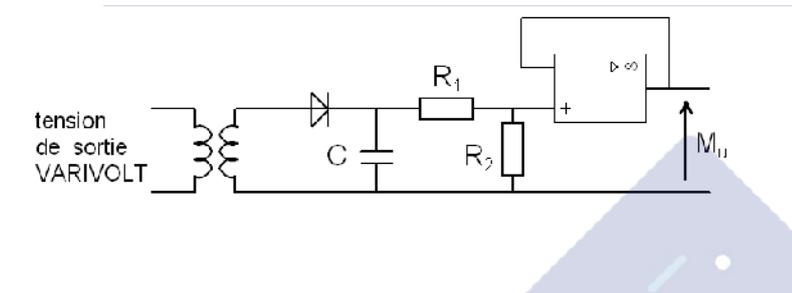
Solution 2 (voir figure ci-dessous) : Un redressement monophasé.

Avantage : plus simple

Inconvénient : ondulation résiduelle plus importante sur M_U . Temps de réponse plus important car filtrage d'une ondulation à 100 Hz avec un premier ordre seulement. Les fonctions atténuation et filtrage sont réalisées par R_1 , R_2 et C . Le suiveur assure une impédance de sortie faible du montage.



Solution 3 : Un transformateur monophasé de mesure entre deux phases du transformateur de puissance, suivi d'un détecteur de crête (voir schéma : 1 diode, 2 résistances et condensateur). Le montage est plus simple encore, il réalise également une isolation galvanique. Son temps de réponse est plus long mais ce n'est pas vraiment gênant au vu des constantes de temps du système commandé.



II.B.4. Réalisation de l'atténuateur

- Q39 En régime stabilisé, la sortie $\theta(p)$ de l'intégrateur étant constante, l'entrée $\Omega(p)$ de l'intégrateur est nécessairement nulle. On a donc : $K_p \varepsilon_s H_{U0} - H_{CR0} C_{r0} = 0$ donc :
- $$\varepsilon_s = \frac{K_p H_{U0}}{H_{CR0} C_{r0}} = 0,032V.$$
- Pour éviter cet écart, il faudra mettre un correcteur PI en $C_U(p)$ au lieu du proportionnel initial.

II.B.5. Obtention de la puissance

Q40 Puissance de chauffe : $P_e = \frac{3U^2}{R}$

Q41 $dP_e = \frac{6U_0}{R} dU$

Q42 $P_e(p) = \frac{6U_0}{R} U(p)$ donc $\frac{P_e(p)}{U(p)} = \frac{6U_0}{R}$

Q43 Grâce au correcteur PI, en régime permanent, l'erreur ε_p sera nulle.

Pour une consigne W_{p0} constante, on aura donc en régime établi, $m_p(t) = M_{p0} = B_{p0} P_{e0} = W_{p0}$, d'où $P_{e0} = \frac{W_{p0}}{B_{p0}}$, qui est indépendant de la fonction de transfert $H_p(p)$ et qui ne dépend donc pas du point de fonctionnement.

Q44 Le terme $e^{-T_1 p}$ représente un retard d'un temps T_1 .

$|e^{-jT_1 \omega}| = 1$, ce terme a donc un gain nul. $\arg(e^{-jT_1 \omega}) = -T_1 \omega$, il crée par contre un retard de phase proportionnel à la fréquence. Le retard jouera un rôle sur la stabilité du système car il diminuera la marge de phase du système, donc la stabilité sera moins bonne.

Q45 Si la boucle de température de voûte n'intervient pas, cela signifie d'une part que $Y_v > Y_f$, d'autre part que la boucle de température de voûte est en saturation donc que $W_v > M_v$.

Q46 Mode dégradé

Le système est en mode dégradé lorsque $Y_v < Y_f$ et que de ce fait $Y = Y_v$, donc entre 300000 et 460000 secondes (environ)

A $t_1 = 154.10^3 s$, une augmentation de la consigne de température four a été effectuée. On voit que la température effective du four augmente.

A $t_2 = 301.10^3 s$, une interruption de l'alimentation en poudre froide a lieu. La température de la voûte augmente la régulation de température voûte intervient et la chauffage est interrompu pendant un temps, puis reprend quand la température voûte redescend.

A $t_3 = 452.10^3 s$, l'alimentation en poudre reprend. La régulation de température four reprend progressivement.

Lors de cet essai, la consigne de température voûte utilisée est d'environ 700°C. En effet, pendant la phase de fonctionnement dégradé pendant laquelle, la régulation de température voûte est active, la température de celle-ci se stabilise à 700°C.

Q47 Cette régulation parallèle ne suffit pas car la température voûte dépasse 900°C. Des mesures complémentaires devront être prises. Dans ce cas, les panneaux latéraux amovibles du four sont ouverts limitant la montée de la température de la voûte à moins de 900°C.