

# **AGREGATION INTERNE 1999**

## **SECTION GENIE ELECTRIQUE**

### **Option A : Electronique et Informatique industrielle**

**Deuxième épreuve**

**Durée : 6 heures**

#### **RECOMMANDATIONS AUX CANDIDATS :**

Les candidats sont invités à numéroter chaque page de leur copie et à indiquer clairement le numéro de la question traitée.

Les candidats sont priés de rédiger les cinq parties du problème sur des feuilles séparées et clairement repérées. Il leur est rappelé qu'ils doivent utiliser les notations indiquées dans le texte, présenter clairement les calculs et dégager ou encadrer tous les résultats.

Tout résultat incorrectement exprimé ne sera pas pris en compte. En outre les correcteurs leur sauront gré d'écrire lisiblement et de soigner la qualité de leur copie.

#### **ORGANISATION DU DOSSIER :**

- |                        |                            |
|------------------------|----------------------------|
| ◆ SUJET :              | <b>PARTIE 1 A PARTIE 5</b> |
| ◆ DOCUMENTS ANNEXES :  | <b>ANNEXE 1 A ANNEXE 5</b> |
| ◆ DOCUMENTS REPONSES : | <b>DR1 A DR4</b>           |

# SUJET

## SUPER CALANDRE

### PRÉSENTATION

Le système étudié se situe en fin de ligne de fabrication de papier et permet la réalisation de papiers haut de gamme spécialement destinés à l'édition et à la publicité.

Le calandrage a pour but de donner de la brillance au papier. La calandre est constituée de plusieurs rouleaux placés en ligne sous une presse hydraulique. Certains rouleaux sont métalliques, les autres sont revêtus d'une fine couche de matériau plus tendre (carton par exemple). Le niveau de brillance est fonction du nombre de rouleaux de la calandre et la différence entre les deux faces dépend du mode de répartition de rouleaux durs et souples. Au cours du calandrage, deux paramètres ont une influence prépondérante sur les caractéristiques recherchées : la pression exercée sur la feuille et la température. Les rouleaux métalliques assurent le maintien en température et l'entraînement. Un écart de température de 1°C est le maximum tolérable pour maintenir une qualité homogène et éviter la formation de défauts sur le papier.

La calandre est alimentée en papier par un dérouleur, le papier calandré est stocké sur une bobine par un enrouleur. Ces deux dispositifs maintiennent la bande de papier tendue.

Un schéma d'une « super calandre » vue dans une usine à papier est représenté en annexe 1.

Une représentation très simplifiée de l'architecture de l'ensemble dérouleur + calandre + enrouleur est donnée en annexe 2.

L'ensemble est piloté, suivant le schéma représenté en annexe 3, par un Automate Programmable Industriel capable d'assurer les fonctions habituelles d'un A.P.I. mais aussi celles d'un puissant calculateur.

Le sujet proposé comporte 5 parties :

Partie 1 : Étude du capteur de traction et de l'enroulage.

Partie 2 : Étude du convertisseur à thyristors.

Partie 3 : Étude des capteurs de température.

Partie 4 : Étude de l'asservissement de température.

Partie 5 : Travail pédagogique.

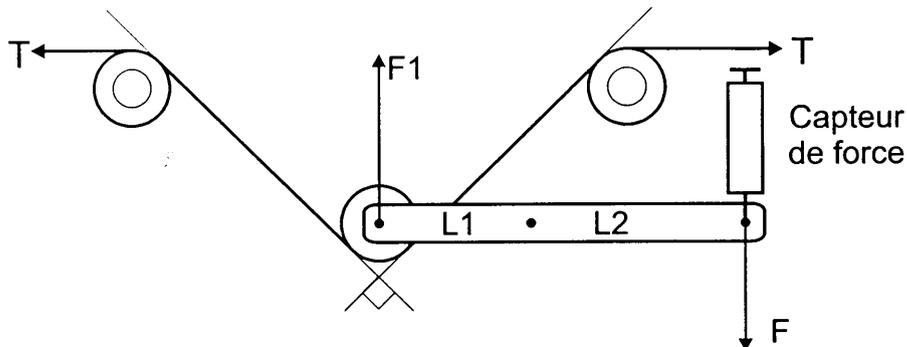
Les cinq parties sont indépendantes, cependant les candidats ont intérêt à lire tout le sujet et à essayer de traiter les différentes parties dans l'ordre proposé.

Les questions sont identifiées par une *police italique* et précédées d'un numéro.

# 1 ÉTUDE MÉCANIQUE DE L'ENROULEUR

## 1.1 Étude du capteur de traction et de l'enroulage

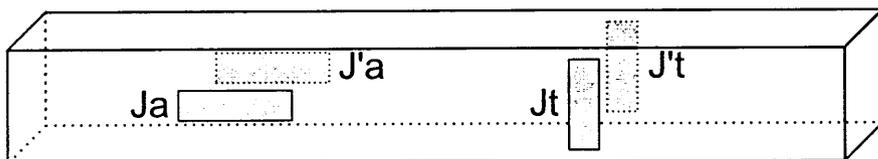
Pour mesurer la traction exercée sur la bande de papier, on utilise la structure ci-dessous.



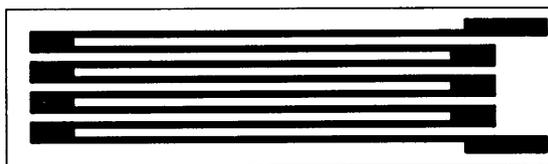
Les axes des rouleaux sont placés de sorte que l'ensemble soit symétrique et que les segments de bande compris entre les rouleaux soient à  $45^\circ$  de part et d'autre de la verticale. La force  $F_1$ , résultante des tractions sur la bande est transmise à un capteur de force par un système de levier présentant un rapport  $\frac{L_2}{L_1} = \sqrt{2}$ .

1.1.1 Calculer  $F$  en fonction de  $T$ .

Le capteur de force est constitué d'un barreau d'aluminium travaillant en traction pure, il est muni de jauges de déformation (résistances déformables) comme le montre la figure ci-dessous. Son allongement relatif est de  $1,5 \cdot 10^{-7} / N$ .



Les jauges **Ja** et **J'a** sont soumises à l'allongement du barreau. Les jauges **Jt** et **J't** sont destinées à la compensation de température, elles ne sont pas soumises à déformation. La structure de chaque jauge est représentée ci-dessous.

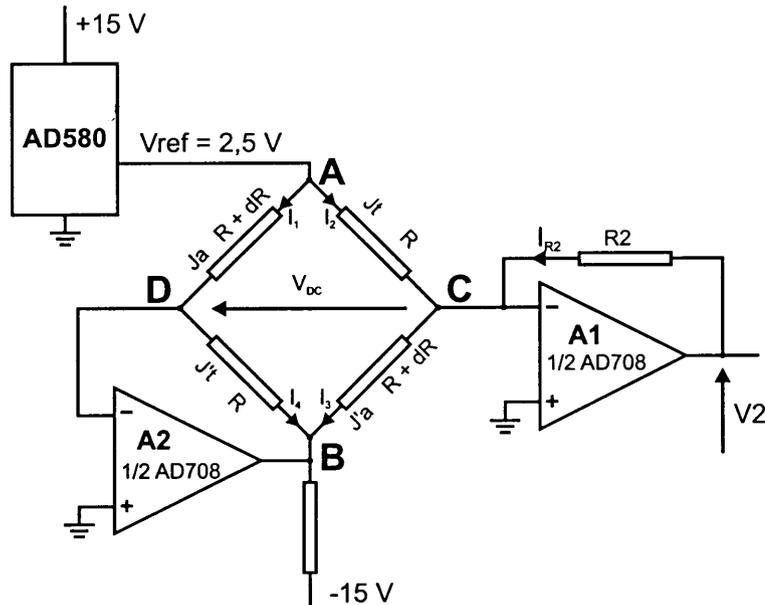


On admettra que le matériau qui les compose présente une résistivité indépendante des contraintes, et qu'il conserve un volume constant dans la plage d'emploi.

1.1.2 Montrer que la variation relative de résistance  $\frac{dR}{R}$  est proportionnelle à l'allongement relatif

$$\frac{dR}{R} = K \frac{dl}{l}. \text{ Calculer } K.$$

Les jauges sont montées en pont, comme l'indique la figure ci-dessous et  $dR$  est négligeable devant  $R$ . La résistance des jauges est de  $350 \Omega$ . Un circuit de régulation permet d'alimenter le point A du pont sous  $2,5 \text{ V}$ .



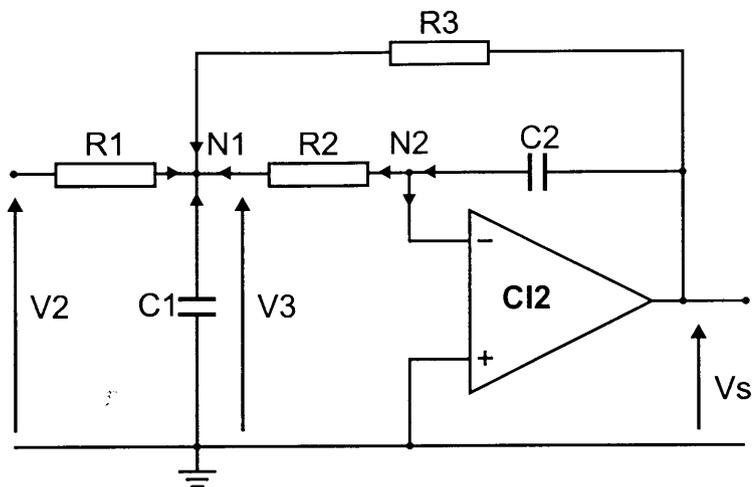
1.1.3 En supposant d'abord que les deux amplificateurs A1 et A2 sont idéaux (gain infini et pas de tension d'offset), établir la relation entre  $V_B$  et  $V_A$ . Quel est le rôle de l'amplificateur A2 ? Exprimer  $V_C$  et  $V_D$  en fonction de  $V_{ref}$ ,  $R$  et  $dR$ . En déduire la relation existant entre  $V_2$  et la traction  $T$ .

1.1.4 Calculer la valeur de  $R_2$  pour obtenir une tension  $V_2$  de  $-1 \text{ V/kN}$ .

La fiche de caractéristique du circuit AD708B indique que les amplificateurs présentent un écart maximal de tension d'offset ( $V_{off,match}$ ) de  $50 \mu\text{V}$ .

1.1.5 à partir des expressions  $V_C$  et  $V_D$  obtenues ci-dessus et en tenant compte de la différence de tension d'offset, calculer la nouvelle expression de  $V_2$  en faisant apparaître le terme dû à l'écart entre les offsets des deux amplificateurs. Donner sa valeur numérique et l'erreur relative sur  $V_2$  quand une force de traction de  $10 \text{ kN}$  est appliquée au papier. Prendre les valeurs  $R = 350 \Omega$  et  $R_2 = 230 \text{ k}\Omega$ .

On place en sortie un filtre passe bas du second ordre (structure de Rauch, dont le schéma est donné ci-dessous), de fréquence de coupure  $1 \text{ kHz}$  pour éliminer les conséquences des vibrations de la structure.

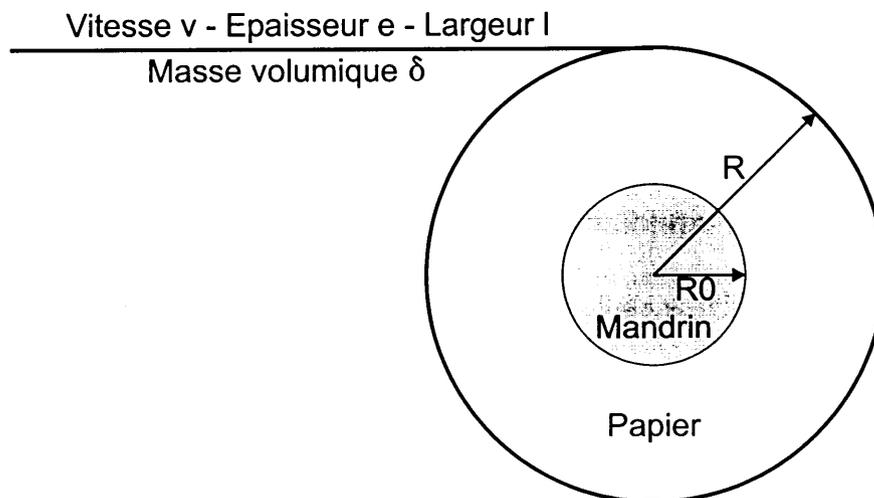


1.1.6 Calculer la fonction de transfert de ce filtre  $T_{(p)} = f(R_1, R_2, R_3, C_1, C_2, p)$ , si toutes les résistances valent  $100 \text{ k}\Omega$ , calculer  $C_1$  et  $C_2$  pour réaliser un filtre dont la fonction de transfert est :

$$T_{(p)} = \frac{-1}{1 + 2m\tau p + \tau^2 p^2}, \text{ avec } \tau = \frac{1}{\omega_0} \text{ et } m = \frac{\sqrt{2}}{2}.$$

## 1.2 Variation des caractéristiques de la bobine à vitesse linéaire constante

L'épaisseur du papier étant très faible devant les dimensions de la bobine, on pourra supposer une répartition uniforme de celui-ci. On se place dans le cas où  $v = v_{\max} = 17,5 \text{ m/s}$ .



- Bobine enrouleur vide : Diamètre  $0,5 \text{ m}$ , moment d'inertie  $140 \text{ kgm}^2$ . (Inertie totale Bobine + induit moteur ramené).
- Bobine enrouleur pleine : Diamètre  $2,5 \text{ m}$ .
- Vitesse max de calandrage :  $17,5 \text{ m/s}$ .
- Tension max à l'enroulage :  $8000 \text{ N}$ .
- Largeur de la bande :  $5,2 \text{ m}$ .
- Masse volumique du papier :  $840 \text{ kg/m}^3$ .
- Épaisseur du papier :  $0,095 \text{ mm}$ .

1.2.1 Établir les expressions temporelles du rayon  $R(t)$  et de la vitesse de rotation  $\Omega_M(t)$ , exprimée en  $\text{rd/s}$ , de la bobine en fonction de  $v$ ,  $e$ ,  $t$  et  $R_0$ .

- 1.2.2 En considérant la linéaire vitesse constante durant tout l'enroulement, en déduire le temps mis pour réaliser une bobine. Tracer  $R(t)$  et  $\Omega_M(t)$  sur le Document réponse DR1.
- 1.2.3 Établir l'expression du moment d'inertie du papier  $J_p$  par rapport à l'axe de rotation de l'ensemble en fonction de  $\delta$ ,  $l$ ,  $R$  et  $R_0$ . Tracer  $J_p(R)$  sur le Document réponse DR1.
- 1.2.4 En déduire l'expression temporelle du moment d'inertie du papier  $J_p(t)$ . Tracer  $J_p(t)$  sur le Document réponse DR1.
- 1.2.5 Des expressions temporelles de  $\Omega_M(t)$  et de  $J_p(t)$ , déduire l'expression du couple accélérateur  $C_{ACC}$  à exprimer en fonction de  $R$  ; on rappelle que  $C_{ACC} = \frac{d(J.\Omega)}{dt}$ .
- Calculer les valeurs numériques pour le rayon minimal et maximal.

### 1.3 Mise en vitesse et arrêt de la bobine

On se place **au tout début** de l'enroulage, la bande de papier est tendue à **8000 N** mais elle n'a pas encore commencé à s'enrouler. La force nécessaire à accélérer la bande de papier est négligée. L'accélération de la bande de papier est de **1 m/s<sup>2</sup>**.

1.3.1 Calculer la valeur du couple à appliquer au mandrin de la bobine.

On se place maintenant **à la fin** de l'enroulage, la bande de papier est toujours tendue à **8000 N**. Le couple dû à la variation du rayon de la bobine est négligé devant celui dû à la variation de la vitesse de la bande. L'accélération de la bande de papier est de **-1 m/s<sup>2</sup>**.

1.3.2 Calculer la valeur du couple à appliquer au mandrin de la bobine. Quelle est la conséquence de ce résultat ?

### 1.4 Dimensionnement du moteur d'entraînement de l'enrouleur

L'axe du mandrin est entraîné par un moteur à courant continu, à travers un réducteur de rapport

$$\frac{\Omega_{mandrin}}{\Omega_{moteur}} = \frac{1}{R_E} = \frac{1}{3}$$

1.4.1 Donner les caractéristiques mécaniques maximales (Couple en Nm et vitesse en tr/min) du moteur d'entraînement.

Le moteur retenu a les caractéristiques suivantes :

- Couple maximum en régime permanent . . . . . : 3576 Nm.
- Vitesse à tension et excitation nominales . . . . . : 1250 min<sup>-1</sup>
- Vitesse mécanique maximale . . . . . : 2100 min<sup>-1</sup>

1.4.2 Déterminer la plage de fonctionnement à flux nominal et celle à flux réduit en fonction du rayon  $R$ . Préciser la valeur numérique de la frontière.

1.4.3 Sans calcul, en raisonnant sur les proportionnalités, tracer les allures des caractéristiques suivantes :

- $I_{\text{INDUIT}} = f_1(t)$ ,
- $\Phi = f_2(t)$ ,
- $I_{\text{INDUCTEUR}} = f_3(t)$ .

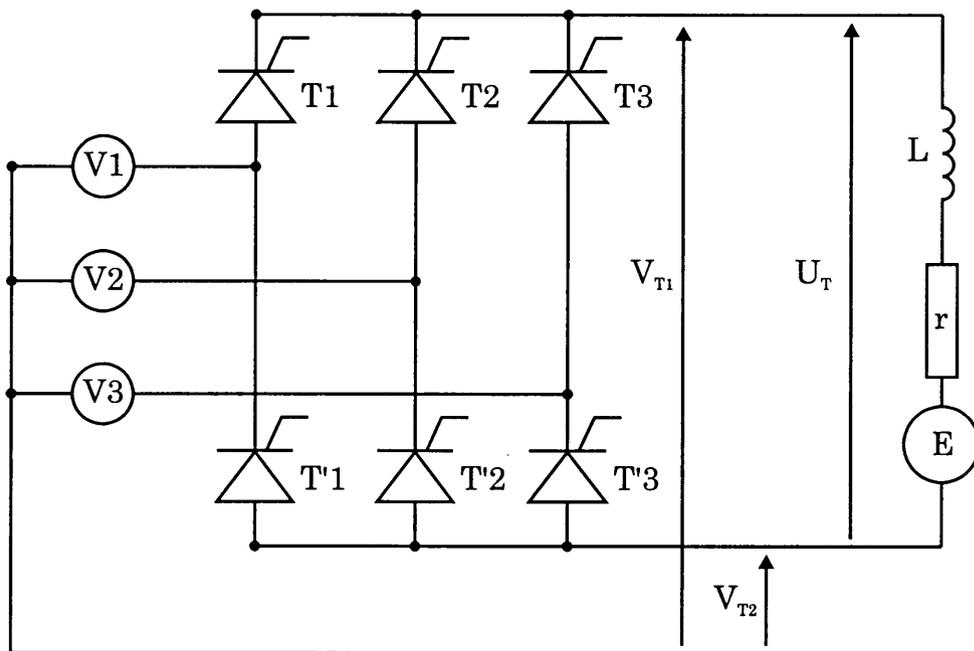
## 2 ÉTUDE DU CONVERTISSEUR À THYRISTORS

Les moteurs d'enroulage et de déroulage sont alimentés à partir de variateurs quatre quadrants à thyristors. Les chutes de tension et l'empîement sont négligés.

### 2.1 Rappel sur les thyristors

2.1.1 En nommant les électrodes d'un thyristor classique, préciser le sens du courant et ses règles d'allumage (amorçage) et d'extinction. Représenter le diagramme idéal  $I(V)$  d'un tel composant.

### 2.2 Étude du pont tête seul



$$V1 = \hat{V} \cdot \sin(\theta)$$

$$V2 = \hat{V} \cdot \sin\left(\theta - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right)$$

$$V3 = \hat{V} \cdot \sin\left(\theta + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right)$$

avec  $\theta = \omega \cdot t$

2.2.1 En vous servant du document réponse DR2, représenter sur le graphe (a), la tension partielle  $V_{T1}$ , obtenue entre la partie supérieure du pont (T1, T2 et T3) et le neutre, pour l'angle de retard à l'amorçage,  $\psi_T$  indiqué sur la figure. De la même façon, représenter la tension partielle  $V_{T2}$ , obtenue entre la partie inférieure du pont et le neutre.

2.2.2 Indiquer sur le graphe (b) de DR2, les conductions des thyristors de la partie supérieure du pont et celles de la partie inférieure. Quelles précautions faut-il prendre pour être sûr qu'initialement un courant circule dans le pont ?

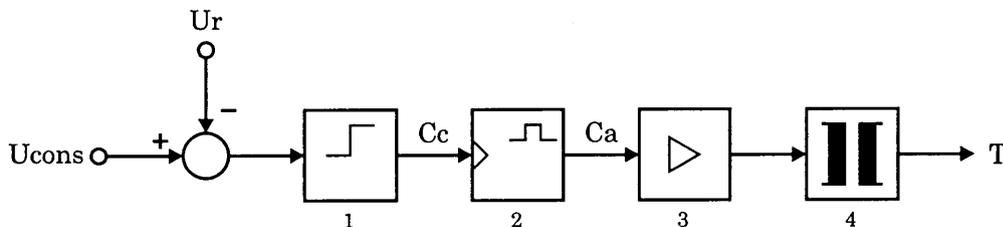
2.2.3 Montrer que la tension de sortie  $U_T$ , est obtenue à partir d'un système hexaphasé, dessiné sur le graphe (c) de DR2. Représenter  $U_T$  sur le graphe (c). Quelle est sa période ?

2.2.4 Calculer l'expression de la valeur moyenne de la tension de sortie  $\langle U_T \rangle$ , en fonction de l'angle de retard à l'allumage,  $\psi_T$ . En déduire la valeur crête  $\hat{V}$  des tensions d'alimentation qui permettrait d'obtenir  $\langle U_T \rangle_{MAX} = 720 \text{ V}$ .

2.2.5 Le pont tête est commandé à partir d'une tension  $U_{cons} = \pm 12 \text{ V}$ . Indiquer la fonction qu'il faut introduire dans la commande pour que  $\frac{\langle U_T \rangle}{U_{cons}}$  soit linéaire.

## 2.3 Électronique de commande des thyristors

Dans le système que nous étudions ici, les circuits de commande de la gâchette des thyristors sont analogiques. Le schéma d'un circuit de commande d'un seul thyristor est représenté ci dessous.



Le circuit reçoit la tension de consigne  $U_{cons}$ , et une tension de référence sinusoïdale,  $U_r = \hat{U}_r \cos(\omega t)$ , provenant du réseau alternatif alimentant le pont triphasé ; son origine de phase est la même que celle de l'angle  $\psi_T$  du document réponse DR2. La différence entre les deux tensions  $U_{cons}$  et  $U_r$  alimente un comparateur (1). Ce dernier commande un monostable (2). Après amplification (3), l'impulsion est transmise au thyristor à travers un transformateur d'impulsion (4).

2.3.1 Représenter sur le document DR3 (a), les formes des signaux  $C_c$  et  $C_a$ . Donner l'expression de  $\psi$  en fonction de  $U_{cons}$  et de  $\hat{U}_r$ . Montrer que la loi mentionnée au paragraphe 2.2.5 est satisfaite par cette équation. Peut-on obtenir la pleine dynamique des angles de retard avec ce système ? Justifier.

Le système de commande complet des thyristors du pont triphasé est représenté sur le document réponse DR3 (b). Au schéma d'une voie, on ajoute 6 portes OU, afin de tenir compte des conditions initiales évoquées au paragraphe 2.2.2.

2.3.2 Représenter sur le document réponse DR3 le réseau de connexions existant entre les sorties des monostables et les entrées des portes OU. Établir les relations existant entre les tensions de références  $U_{r1}$ ,  $U_{r2}$ ,  $U_{r3}$ ,  $U'_{r1}$ ,  $U'_{r2}$ ,  $U'_{r3}$  et les tensions  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  de l'alimentation du pont. Donner les valeurs numériques. Comment peut-on pratiquement réaliser ce dispositif ?

2.3.3 En guise de conclusion, que pensez-vous du système de commande décrit ci-dessus ? Un microprocesseur (micro-contrôleur) est-il utilisable pour réaliser un système de commande numérique ? Quelles difficultés faudra-t-il résoudre dans ce cas ?

### 3 ÉTUDE DE CAPTEURS

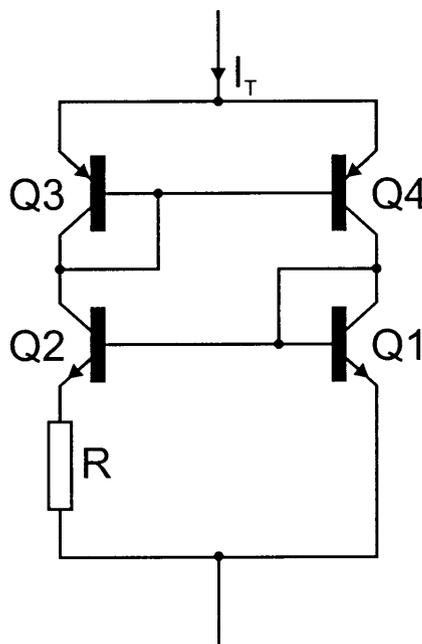
Comme indiqué dans l'introduction, l'opération de calandrage nécessite le maintien des rouleaux acier de la calandre à une température constante. Il est donc indispensable de la mesurer de façon précise. Plusieurs méthodes sont utilisées, selon les machines : sondes résistives, sondes à semi-conducteurs, oscillateurs, capteurs infrarouge, etc. Dans le cadre de ce problème, nous étudierons deux techniques : un capteur au silicium et un oscillateur à quartz.

Outre l'obtention de la tension du papier, étudiée dans la partie I, d'autres mesures sont indispensables : la vitesse du papier, son épaisseur, son grammage, sa blancheur, son taux d'humidité, etc. certaines mesures sont forcément effectuées en ligne (la vitesse !), tandis que d'autres font parties des contrôles hors ligne, au laboratoire. Dans le cadre de ce problème, nous laisserons ces mesures de côté.

#### 3.1 Capteur de température des cylindres en acier : capteur au silicium. Étude du circuit AD590

Les techniques de la micro-électronique permettent la fabrication en circuits intégrés de transistors appairés qui sont parfaitement adaptés à la réalisation de capteurs de température basés sur la mesure de l'évolution thermique de la différence de leurs tensions  $V_{BE}$ . Ces capteurs qui délivrent un courant ou une tension proportionnelle à la température absolue, avec une linéarité excellente, ont comme intérêt majeur la simplicité de leur mise en œuvre ; ils ont cependant une plage de fonctionnement limitée :  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Le capteur étudié est un circuit intégré ; il se comporte comme une source de courant variant linéairement en fonction de sa température absolue. Un schéma simplifié de sa constitution interne est donné ci-dessous.



Les transistors Q3 et Q4 sont appairés. Le transistor Q2 est en réalité un ensemble en parallèle de 8 transistors identiques à Q1.

3.1.1 Rappeler la relation donnant le courant d'émission d'un transistor à jonction en fonction de  $kT/q$ ,  $I_s$ ,  $\beta$  et de sa tension base émetteur  $V_{BE}$ , lorsqu'il est en conduction directe.

3.1.2 Exprimer les courants d'émetteur de Q3 et Q4 en fonction de  $I_T$ . En déduire les courants d'émetteur de Q1 et de l'ensemble des transistors Q2.

3.1.3 Exprimer  $V_{BE1}$  en fonction de  $kT/q$ , et de  $I_T$ . De même exprimer  $V_{BE2}$  en fonction des mêmes grandeurs. Montrer que  $V_{BE1} - V_{BE2} = a \cdot \frac{kT}{q}$ , où  $a$  est une constante dont vous donnerez la valeur.

3.1.4 Exprimer le courant induit par la différence de potentiel  $V_{BE1} - V_{BE2}$ , dans la résistance  $R$ . En déduire la relation entre  $I_T$  et les grandeurs  $kT/q$ ,  $a$ , et  $R$ . Calculer  $R$  pour que  $\frac{I_T}{T} = 1 \mu A/K$ .

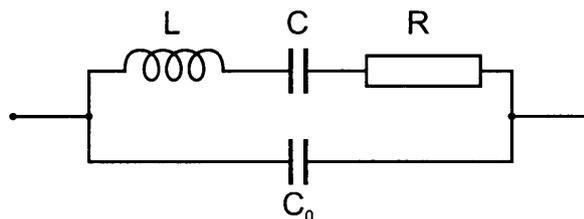
## 3.2 Capteur de température à quartz

Les quartz sont habituellement utilisés dans la réalisation d'oscillateurs de très grande stabilité, thermique en particulier. À cette fin, la lame de quartz est taillée selon une orientation cristallographique qui minimise les variations thermiques de la fréquence de l'oscillateur piloté.

Par contre, dans son utilisation en capteur de température, la lame de quartz est orientée cristallographiquement en sorte que la fréquence de l'oscillateur soit une fonction quasi linéaire de la température de la lame.

Autour de l'une de ses fréquences de résonance mécanique, la lame de quartz se comporte, du point de vue électrique, comme un dipôle constitué de deux branches en parallèle (voir schéma ci-dessous) :

- Une branche formée d'une capacité  $C_0$  qui est la capacité associée aux électrodes métalliques et dont la valeur est de 1 à 100 pF.
- Une branche L, C, R dont les éléments ont des valeurs déterminées par les caractéristiques géométriques, mécaniques et cristallographiques de la lame.



Ce dipôle présente deux résonances électriques :

- la résonance série de la branche L, C, R à la fréquence  $f_s$

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

- la résonance parallèle, entre capacité  $C_0$  et branche L, C, R, à la fréquence  $f_p$

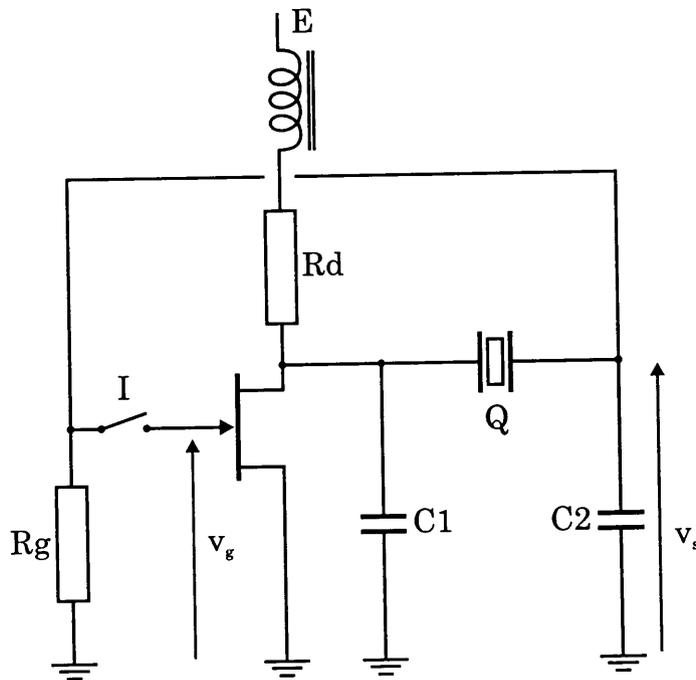
$$f_p = f_s \cdot \sqrt{1 + \frac{C}{C_0}}$$

L'impédance  $Z_q$  du dipôle équivalent à la lame de quartz peut être mis sous la forme (on ne demande pas de l'établir).

$$Z_q = \frac{\frac{\omega_p}{\omega} \cdot Q \left( \eta - \frac{1}{\eta} \right) - j \cdot \left\{ 1 + Q^2 \left[ 1 - \left( \frac{\omega_p}{\omega} \right)^2 \right] \left[ \eta^2 \left( \frac{\omega}{\omega_p} \right)^2 - 1 \right] \right\}}{\omega C_0 \left[ 1 + Q^2 \eta^2 \left( \frac{\omega_p}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_p} \right)^2 \right]}$$

où l'on pose  $\eta = \frac{\omega_p}{\omega_s}$  et  $Q = \frac{L\omega_s}{R}$

Le quartz est utilisé dans un oscillateur à transistor à effet de champ, de type Colpitts. Son schéma figure ci-dessous. La résistance de grille  $R_g$  est supposée très grande devant les autres impédances vues en parallèle. La self d'arrêt présente une impédance infinie aux fréquences de travail. On suppose que les fréquences sont suffisamment basses pour utiliser le schéma équivalent basse fréquence du transistor. Enfin, pour simplifier on suppose que sa conductance de sortie est nulle.



3.2.1 Établir le schéma équivalent à petits signaux et en boucle ouverte du montage ; on notera  $g_m$  la transconductance du transistor et  $Z_q = R_q + j.X_q$  l'impédance du dipôle constitué par le quartz. Donner

l'expression du gain  $\frac{v_s}{v_g}$ . En déduire, quand le montage fonctionne en oscillateur (boucle fermée),

l'équation donnant la pulsation des oscillations et l'inégalité qui traduit l'aptitude à leur démarrage.

Les expressions obtenues ci-dessus sont très complexes avec l'expression de  $Z_q$  donnée ci-dessus. Pour exploiter la relation donnant la pulsation des oscillations, on cherche une forme simplifiée de  $Z_q$ , dans un cas particulier.

3.2.2 Montrer que  $Z_q$  tend vers une limite purement réactive quand  $Q \rightarrow \infty$  :

$$Z_q \rightarrow jX_q = -j \frac{1}{\omega C_0} \cdot \frac{(\omega^2 - \omega_s^2)}{(\omega^2 - \omega_p^2)}$$

3.2.3 Dans ces conditions, montrer que la pulsation des oscillations est donnée par :

$$\omega_0^2 = \omega_s^2 \cdot \left(1 + \frac{C}{C_0 + C_{ext}}\right).$$

Où  $C_{ext}$  est équivalent à la mise en série des deux capacités extérieures,  $C_1$  et  $C_2$ . Représenter sur l'axe des pulsations, les positions respectives de  $\omega_s$ ,  $\omega_p$  et  $\omega_0$  et l'allure de  $X_q$  dans ce voisinage.

Des mesures sur un quartz ont donné les valeurs suivantes :

- $f_s = 28,205$  Mhz,
- $R = 1$  k $\Omega$ ,
- $Q = 8000$ ,
- $C_0 = 3,5$  pF

Le montage comporte par ailleurs les composants :

- $C_1 = 100$  pF,
- $C_2 = 46$  pF.

3.2.4 Calculer en fraction de  $f_s$  les fréquences  $f_p$  et  $f_0$ .

Toute variation de température entraîne un changement des dimensions de la lame, de sa densité, etc., d'où une variation des fréquences de résonance. Par une coupe convenable de la lame dans le cristal (coupe LC), on peut obtenir une loi linéaire de variation de fréquence avec la température :

$$f(T) = f_0(1 + aT) \quad \text{avec } T \text{ en } ^\circ\text{C}.$$

Pour le quartz donné en exemple ci-dessus,  $a = 35,45 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ .

3.2.5 Déterminer la sensibilité  $S = \frac{\Delta f}{\Delta T}$  de ce quartz. En déduire la sensibilité relative du système de mesure de fréquence, pour mesurer des températures à 0,1 °C près.

### 3.3 Conditionnement, transmission des grandeurs et reconversion

En général, la distance entre le lieu de la mesure et l'endroit d'utilisation de la grandeur mesurée, est grande et très souvent la liaison est soumise à des perturbations électromagnétiques. Ces raisons conduisent les ingénieurs à conditionner de façon appropriée les signaux issus des capteurs. Ici, nous nous intéresserons au traitement du courant fourni par le capteur au silicium AD590 étudié au paragraphe 3.1. rappelons que ce circuit génère un courant de 1  $\mu\text{A/K}$ . Cette grandeur est convertie en fréquence par un circuit AD654. Le convertisseur courant fréquence est constitué d'un amplificateur d'entrée, d'un oscillateur de précision et d'un étage de sortie à collecteur ouvert (T2). L'annexe 4 fournit de plus amples précisions sur ce circuit. Le montage mettant en œuvre le capteur et le convertisseur est représenté ci-dessous. Il est constitué de deux parties reliées par une paire torsadée :

- sur la partie gauche se trouve le capteur et le circuit de conversion ; cet ensemble sera appelé



## 4 ÉTUDE DE L'ASSERVISSEMENT DE TEMPÉRATURE DES CYLINDRES DE CALANDRAGE

Chaque cylindre, supposé massif et en acier, a un rayon  $R_c$  de 0,25 m et une longueur  $L_c$  de 6 m. Pour limiter les variations de ses dimensions, sa température doit être régulée à  $80\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$  au maximum. En fonctionnement, on supposera que le papier ne modifie pas les pertes par convection du cylindre, en revanche il faudra prendre en compte la puissance nécessaire à l'élévation de la température du papier. On s'intéresse à la régulation de température du seul premier cylindre. Le papier y entre à température ambiante de  $20\text{ °C}$ , supposée constante, et en sort à  $28\text{ °C}$ .

### Données :

- **Cylindre en acier**

Masse volumique . . . . .	$M_C$ . . . . .	7,9 kg/dm <sup>3</sup>
Chaleur massique . . . . .	$C_C$ . . . . .	420 J/(°C.kg)
Pertes par convection . . . . .	$K_C$ . . . . .	3,5 W/(°C.m <sup>2</sup> )

- **Papier**

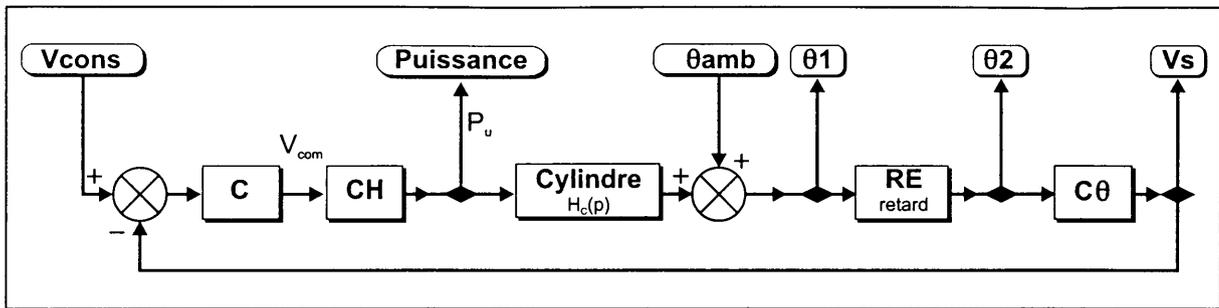
Masse volumique . . . . .	$M_{VP}$ . . . . .	0,84 kg/dm <sup>3</sup>
Chaleur massique . . . . .	$C_P$ . . . . .	1200 J/(°C.kg)
Vitesse nominale . . . . .	$v_n$ . . . . .	13 m/s
Masse surfacique . . . . .	$M_{SP}$ . . . . .	80 g/m <sup>2</sup>
Largeur de la bande . . . . .	$L_P$ . . . . .	5,2 m.

### 4.1 Puissance nécessaire au maintien de la température du cylindre

- 4.1.1 *Établir l'expression de la puissance  $P_1$  évacuée par le papier, pour la vitesse nominale de 13 m/s. Donner sa valeur numérique.*
- 4.1.2 *La convection s'effectue sur toute la surface du cylindre. Établir l'expression de la puissance  $P_2$  nécessaire au maintien de sa température  $\theta$ . Donner sa valeur numérique pour  $\theta = 80\text{ °C}$ .*
- 4.1.3 *En déduire la puissance totale à fournir au cylindre dans les conditions de fonctionnement données ci-dessus.*

### 4.2 Mise en température du cylindre et régulation avant fonctionnement en calandrage

Le chauffage du cylindre est réalisé par circulation de vapeur fournissant une puissance proportionnelle au débit de vapeur. L'entrée de vapeur est assurée par une vanne proportionnelle contrôlée par une tension  $V_{com}$  dont la dynamique est 0-10 V. Vanne pleinement ouverte, la puissance est de 80 kW. Le schéma du montage est le suivant :



- C : Correcteur.  
 CH : Ensemble de chauffage (Vanne proportionnelle et circuit de vapeur).  
 RE : Retard pur dû à la propagation de la chaleur, du cylindre au capteur. RE = 10 s.  
 C $\theta$  : Capteur de température. C $\theta$  = 0,1 V/°C.

- 4.2.1 Que devient ce schéma si on raisonne en variation de température (modèle dynamique) ?
- 4.2.2 Etablir l'expression de la fonction de transfert du bloc « cylindre »  $H_c(p)$ . Faire l'application numérique.
- 4.2.3 On suppose  $C = 1$  et  $H_c(p) = \frac{0,03}{1 + (10^5 \cdot p)}$ . Cette valeur sera prise pour toute la suite.
- À quelles valeurs de  $K_C \cdot S$  et de  $M \cdot C_C$  correspondent les coefficients retenus ? (où  $S$  et  $M$  sont respectivement la surface et la masse du cylindre).
  - Calculer la fonction de transfert en boucle ouverte de l'ensemble.
  - Tracer le diagramme de Bode de l'ensemble, en faisant apparaître l'influence du retard.
- 4.2.4  $C$  est un gain pur, déterminer sa valeur maximale pour une marge de phase de  $45^\circ$ .
- Calculer la valeur de  $C$  donnant une précision de 1% de la réponse indicielle.
  - Conclure.

### 4.3 Régulation de température en mode « tout ou rien », avant calandrage

On envisage maintenant une régulation de température en mode « tout ou rien », ce qui permettra d'utiliser une vanne du même type. On raisonne toujours en dynamique, on appelle  $\theta$  l'écart de température ( $\theta_{\text{cylindre}} - \theta_{\text{ambiant}}$ ). Le thermostat est réglé sur  $80 \pm 0,5$  °C. Le retard pur est toujours de 10 s.

- 4.3.1 Établir l'expression temporelle de la montée en température.
- Calculer le temps mis pour passer de 20 à 80,5 °C, et compte tenu du retard, la température maximale atteinte.
- 4.3.2 Établir l'expression temporelle de la descente en température. En prenant comme nouvelle origine ( $t = 0$ ) l'instant pour lequel la température maximale ( $\theta_{\text{MAX}}$ ) a été atteinte.
- Calculer le temps mis pour passer de  $\theta_{\text{MAX}}$  à 79,5 °C, et compte tenu du retard, la température minimale ( $\theta_{\text{MIN}}$ ) atteinte.
- 4.3.3 En régime établi, calculer le temps de chauffe et le temps total de cycle. Justifier le rapport entre ces valeurs compte tenu du  $K_C \cdot S$  déduit de la fonction de transfert  $H_c(p)$  donnée en 4.2.3.

#### 4.4 Régulation en mode « tout ou rien » de la température du cylindre en calandrage

On se place en calandrage, à vitesse nominale. On suppose que la puissance  $P_e$  évacuée par le papier est de 52 kW. Le thermostat reste réglé sur  $80 \pm 0,5$  °C. Le retard pur est toujours de 10 s.

4.4.1 Donner le schéma bloc correspondant.

4.4.2 Établir les relations de la croissance et de la décroissance de la température, les linéariser autour de 80 °C. Calculer le temps de chauffe et le temps de cycle. Calculer la puissance moyenne sur un cycle et justifier la valeur obtenue.

4.4.3 Représenter  $\theta(t)$  en précisant les valeurs aux points caractéristiques.

## 5 TRAVAIL PÉDAGOGIQUE

L'objectif de cette partie est de proposer une séquence pédagogique concernant les mesures de température. La ressource méthodologique et les techniques pédagogiques utilisées seront tout particulièrement développées. Le niveau de cet enseignement est fixé en section de BTS électronique.

Il est notamment demandé :

- *De fixer les prérequis nécessaires.*
- *De donner les articulations et les plans des différents éléments composant la séquence pédagogique.*
- *De rédiger le texte d'un TP, illustrant un dispositif de mesure à choisir parmi les différentes solutions théoriques.*

Le dispositif est un sous-système de régulation de température comportant la chaîne de mesure et de conditionnement du signal, dans un environnement industriel.

On prendra en compte les éléments suivants :

- Les différents types de capteurs, selon les gammes de température et la précision souhaitée de la mesure ; on envisagera notamment les problèmes des très hautes températures.
- Le conditionnement local (près du capteur) du signal : amplification, linéarisation, etc.
- Le conditionnement en vue de la transmission à distance de façon s'affranchir ou minimiser les dégradations.
- Le traitement à distance : les éventuelles reconversions.
- Les techniques d'affichage.

Les systèmes micro programmés seront bien sûr envisagés.