

SESSION 2009

**CONCOURS INTERNE
DE RECRUTEMENT DE PROFESSEURS AGRÉGÉS
ET CONCOURS D'ACCÈS A L'ÉCHELLE DE RÉMUNÉRATION**

Section : GÉNIE ÉLECTRIQUE

**Options : ÉLECTRONIQUE ET INFORMATIQUE INDUSTRIELLE,
ÉLECTROTECHNIQUE ET ÉLECTRONIQUE DE
PUISSANCE**

ÉPREUVE PORTANT SUR L'ÉTUDE D'UN SYSTÈME D'AUTOMATISATION

Durée : 6 heures

Calculatrice électronique de poche - y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

Convertisseur en euros autorisé.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.

NB : Hormis l'en-tête détachable, la copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.

Tournez la page S.V.P.

A

Rattrapage de largeur de bande sur un train de laminage à chaud

Ce sujet comporte 3 dossiers distincts :

📁 Dossier de présentation, texte du sujet avec le travail demandé	19 pages
📁 Documents réponses	6 pages
📁 Dossier annexes	12 pages

Ce sujet comporte quatre parties indépendantes :

Partie I : Evaluation du besoin

Partie II : Contrôle en couple des boucleurs

Partie III : Positionnement des boucleurs

Partie IV : Synthèse et communication

Une lecture préalable et complète du sujet est indispensable.

Il sera tenu compte de la cohérence avec laquelle les candidats traiteront chaque partie, le jury préférant une réflexion d'ensemble de la partie abordée à un éparpillement des réponses.

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 différentes parties du problème sur feuilles séparées et clairement repérées. Chaque question est identifiée par un numéro.

Il leur est rappelé qu'ils doivent utiliser les notations propres au sujet, 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.

Il sera tenu compte de la qualité de rédaction, en particulier pour les réponses aux questions ne nécessitant pas de calcul. Le correcteur attend des phrases complètes respectant la syntaxe de la langue française.

Pour la présentation des applications numériques, il est rappelé que lors du passage d'une forme littérale à son application numérique, il est recommandé aux candidats de procéder comme suit :

après avoir rappelé la relation littérale, chaque grandeur est remplacée par sa valeur numérique en respectant la position qu'elle avait dans la relation puis le résultat numérique est donné sans calculs intermédiaires et sans omettre son unité.

Rattrapage de largeur de bande sur un train de laminage à chaud

ArcelorMittal Méditerranée dispose, sur le site de Fos-sur-Mer (Bouches-du-Rhône), d'installations de premier plan. Avec sa coulée verticale courbe et son unité de dégazage sous vide, ce site est l'une des aciéries de pointe en Europe pour la production d'aciers ultra bas carbone destinés à l'industrie automobile.

Dans la stratégie de développement d'ArcelorMittal au sud de l'Europe, le site de Fos occupe une place essentielle. En effet, Fos assure en amont l'essentiel de la production d'acier (4,5 millions de tonnes par an) qui est ensuite traitée et transformée sur d'autres sites (dans plus de 10 pays mais pour 75 % en France, Espagne et Italie).

La production du site de Fos se présente sous forme de bobines de feuille d'acier (les « coil »), de bobines refendues ou de paquets de feuilles.

Présentation de l'unité de production

L'annexe 1 présente le cycle de fabrication de l'acier à Fos. En fin de cycle, le train à bande (figure 1) permet la transformation des brames en feuilles puis en coil.

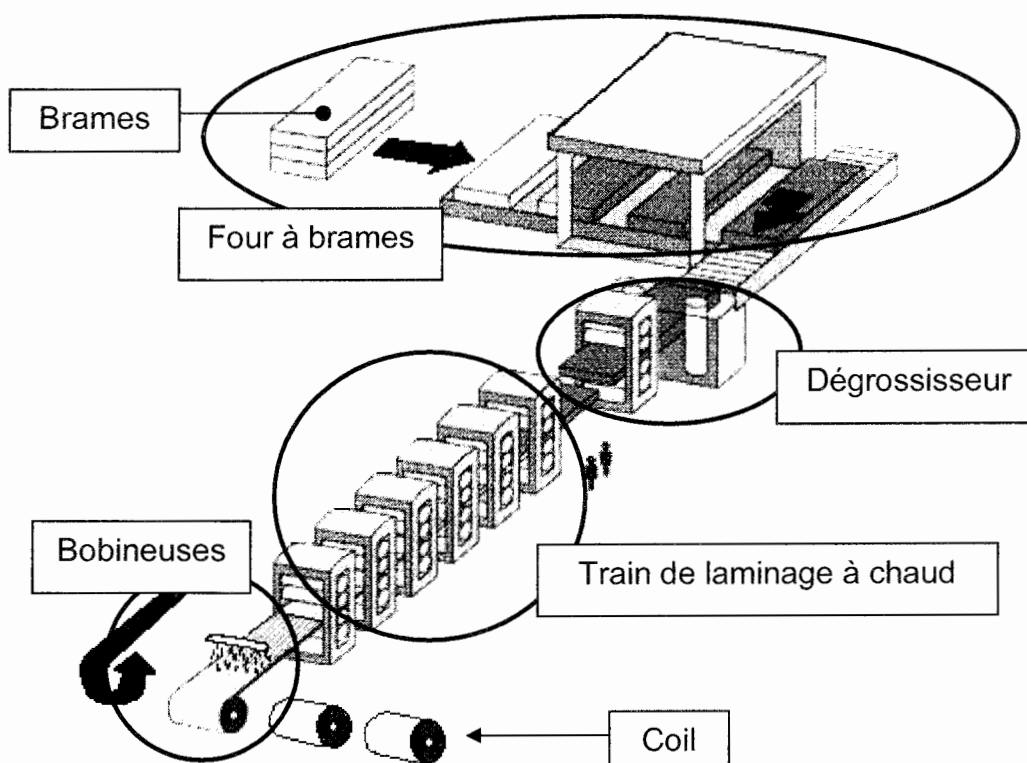


Figure 1 : le train à bande de Fos

Ce train à bande se compose :

- d'un four à brames à longerons décalés permettant de réchauffer les brames autour de 1100 °C à 1280 °C suivant la nuance de l'acier,
- d'un dégrossisseur permettant de transformer les brames (épaisseur de 170 mm à 225 mm) en ébauche (épaisseur de 30 mm à 50 mm) avec contrôle de largeur,
- d'un train de laminage à chaud capable de transformer une ébauche en feuille d'épaisseur programmée (de 1,2 mm à 28 mm) avec un état de surface et largeur satisfaisants (tolérances),
- de bobineuses capables d'enrouler la feuille d'acier pour en faire un coil.

Le train de laminage à chaud (appelé aussi finisseur) est le support de ce sujet, sa composition est donnée en figure 2. On y trouve une cisaille, une unité de décalaminage, 7 cages quarto (F1 à F7), une jauge de largeur et 6 boucleurs. Le rôle des boucleurs est de tendre la bande dans les intercages, ce qui permet de faciliter le laminage tout en contrôlant la largeur de la bande.

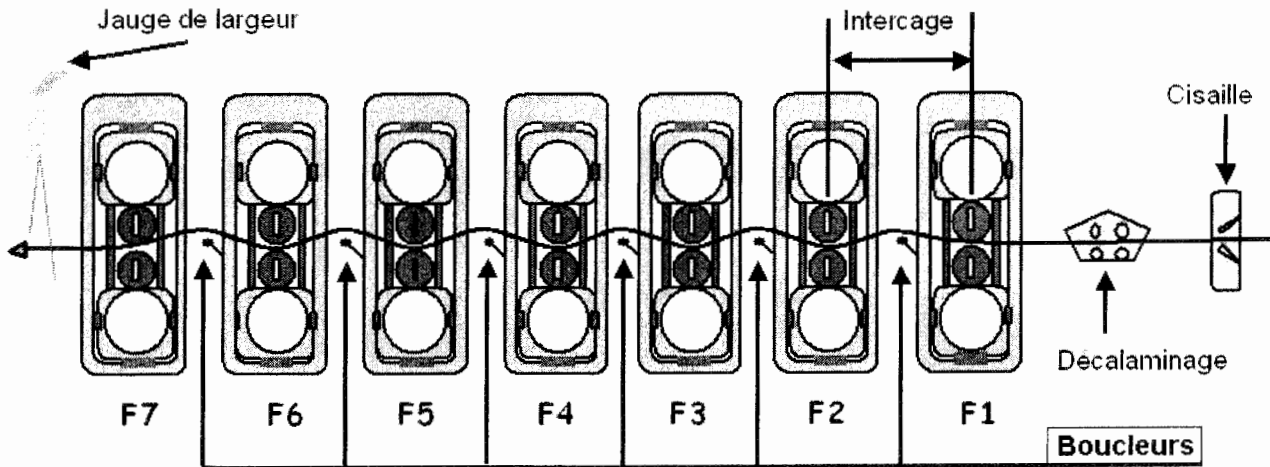


Figure 2 : le train de laminage à chaud

Organisation du sujet

Ce sujet se décompose en quatre parties :

- PARTIE I : Evaluation du besoin, on cherche à établir un lien pertinent entre le contrôle de largeur d'une bande en cours de laminage et la motorisation d'un boucleur.
- PARTIE II : Contrôle en couple des boucleurs, on justifie le dimensionnement du correcteur de courant dans la chaîne d'asservissement d'un boucleur.
- PARTIE III : Positionnement des boucleurs, on propose le dimensionnement du correcteur de position pour le contrôle des montées et descentes d'un boucleur.
- PARTIE IV : Synthèse et communication, on synthétise les parties précédentes et on étudie la communication inter-automates.

Notations

Dans tout le sujet, on désigne par :

- p, la variable de Laplace
- t, le temps
- j, le nombre complexe tel que $j^2 = -1$
- g, l'accélération terrestre

PARTIE I : Evaluation du besoin

On désire, dans cette partie I, établir un lien entre le contrôle de largeur d'une bande en cours de laminage et la motorisation du boucleur.

I-A - Vitesse d'entraînement des cages

L'annexe 2 représente une cage quarto et la figure 3 reprend les deux cylindres de travail avec la bande à laminier au niveau de la cage F1.

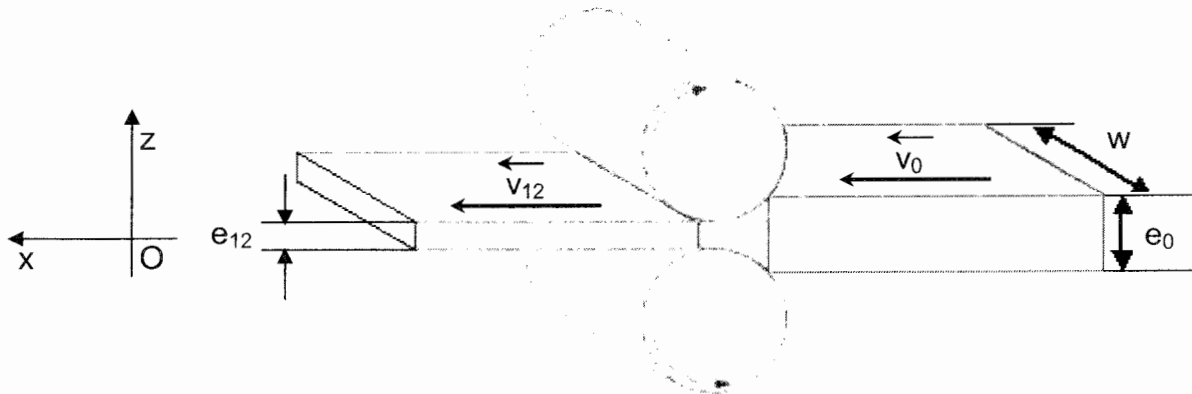


Figure 3 : cylindres de travail de la cage F1

On suppose, pour cette partie I-A, que la bande ne s'élargit pas lors du laminage (largeur de bande w constante), que sa section reste rectangulaire et que son volume reste constant.

I-A-1 Exprimer la relation qui relie les épaisseurs (e_0 et e_{12}) et les vitesses linéaires de translation (v_0 et v_{12}).

I-A-2 On donne, en document réponse 1, le chemin d'épaisseur pour une bande ainsi que sa vitesse d'entrée v_0 dans la cage F1. Compléter ce document réponse avec les vitesses linéaires (v_{12} à v_{67}) de la bande au niveau des intercages et au niveau de la sortie de la cage F7 (v_s).

I-A-3 Si l'ébauche à l'entrée de la cage F1 fait $L_0 = 60$ mètres de long, en déduire la longueur L_s de la bande à enrouler en sortie de la cage F7.

Sur l'arc de cercle AB (voir la figure 4 qui est symétrique par rapport à l'axe (O, \vec{X})), la vitesse de translation de l'acier évolue progressivement de v_0 à v_{12} . On appelle point neutre N, le point du cylindre de travail pour lequel la vitesse de glissement entre cylindre et bande est nulle.

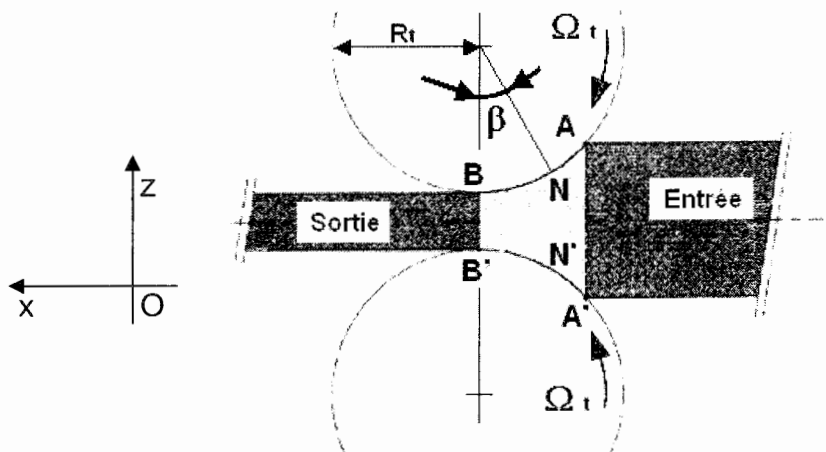


Figure 4 : points neutres (N et N') sur cylindres de travail

I-A-4 Exprimer $e_N = NN'$ (épaisseur de la bande en NN'), en fonction de e_{12} , R_t et β .

I-A-5 On appelle \vec{v}_N la vitesse de l'acier en N et \vec{v}_{Nx} sa projection sur (O, \vec{x}) . Exprimer $\|\vec{v}_{Nx}\|$ en fonction de v_{12} , e_{12} , R_t et β .

I-A-6 En déduire la vitesse de rotation du cylindre de travail Ω_t en fonction de v_{12} , e_{12} , R_t et β (R_t est le rayon du cylindre de travail).

I-A-7 On considère qu'il n'y a pas de glissement entre cylindre de travail et cylindre d'entraînement. En déduire la vitesse de rotation du cylindre d'entraînement Ω_e , en fonction de v_{12} , e_{12} , R_t , R_e et β (R_e est le rayon du cylindre d'entraînement).

I-A-8 Pour la cage F1, on donne $R_t = 350$ mm, $R_e = 750$ mm, $\beta = 7^\circ$. Calculer numériquement Ω_t et Ω_e .

Conclusion : La vitesse de translation de la bande d'acier à laminier est déterminée par les cylindres d'entraînement.

I-B - Rattrapage de sous-largeur

La tolérance sur la largeur de la bande w est de ± 1 mm. Lors du laminage de la bande d'acier, celle-ci s'élargit de manière non uniforme. On remarque en particulier qu'il apparaît une sous-largeur aux extrémités, sous-largeur due aux régimes transitoires (entrée de la bande dans les cylindres de travail puis sortie). On a donc intérêt à ce que la largeur de la tête de bande représente le plus possible celle du corps de la bande. Une jauge de largeur (voir figure 2) permet de connaître la largeur en tête de bande ainsi que la tendance en court de laminage. Ces données couplées à un modèle de connaissances permettent la correction aval de la largeur de bande par les boucleurs.

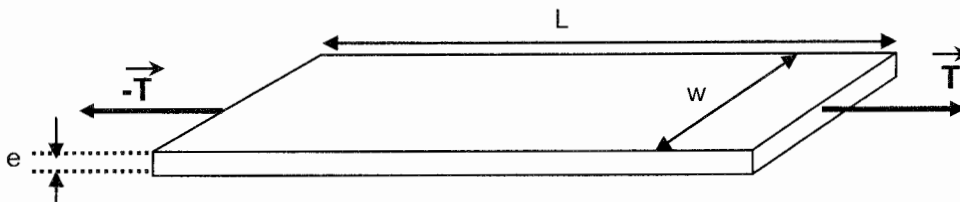


Figure 5 : bande d'acier avec traction

On soumet la bande d'acier à des forces de traction, normales à sa section $s = w \times e$, uniformément réparties sur cette section et de résultante T (figure 5). Sous l'action de ces forces, la bande s'allonge et sa section diminue.

L'action des forces \vec{T} et $-\vec{T}$ soumet la bande à une contrainte σ . Tant que $0 < \sigma < \sigma_0$, la déformation de la bande est élastique, elle retrouve ses dimensions initiales si on supprime la contrainte. Quand $\sigma > \sigma_0$, la déformation de la bande est plastique, elle ne retrouve pas ses dimensions initiales si on supprime la contrainte, la déformation étant à volume constant. La figure 6 indique les zones de déformation élastique et plastique dans le plan $\sigma = f(\varepsilon)$ (σ exprimée en MPa, 1 mégapascal = 1 N/mm² et $\varepsilon = 100 \times \frac{dL}{L}$ exprimé en %).

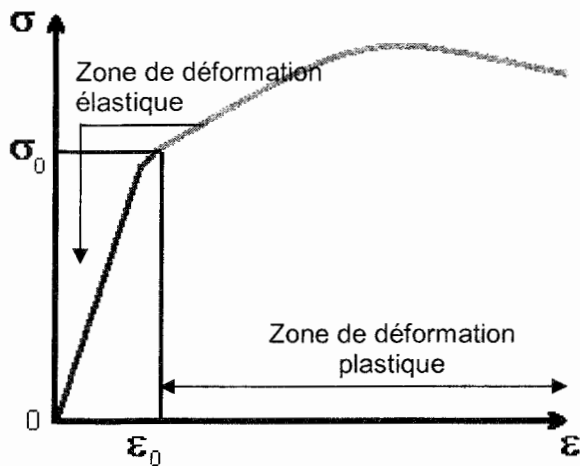


Figure 6 : zones de déformation élastique et plastique

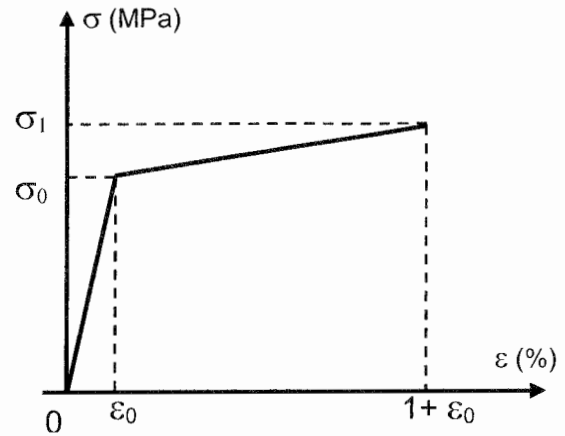


Figure 7 : modélisation

I-B-1 Le rattrapage d'une sous-largeur doit-il se faire en zone de déformation élastique ou plastique ?

I-B-2 Montrer alors que les variations relatives de s et L sont identiques au signe près.

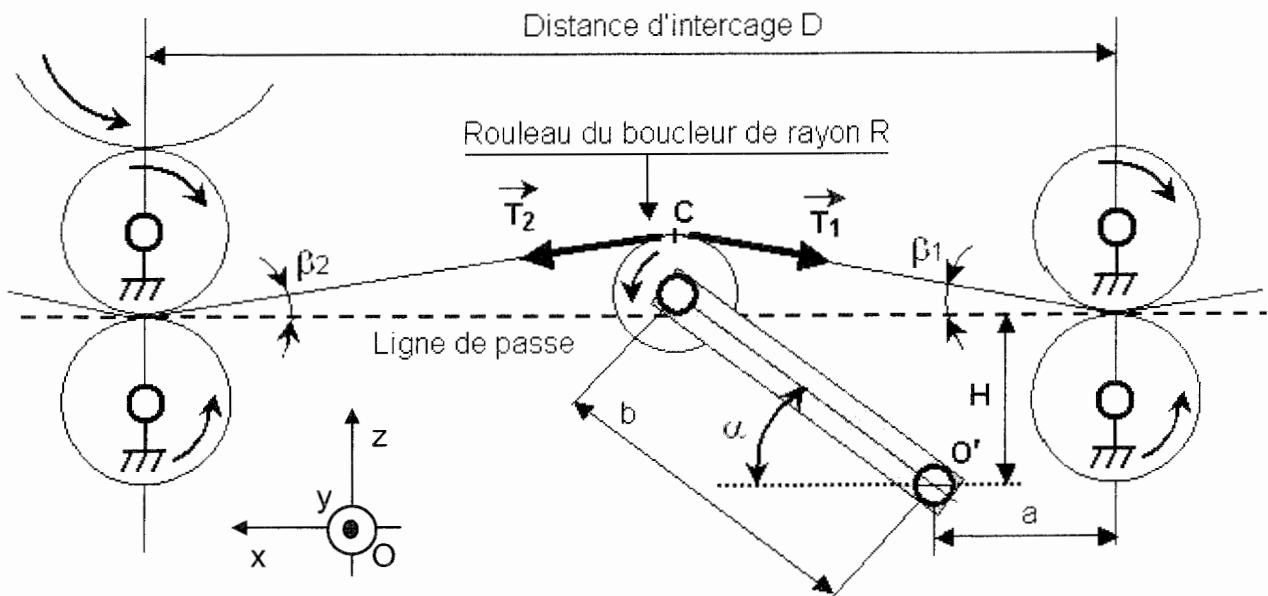
I-B-3 Montrer que $\frac{ds}{s} = \frac{dw}{w} + \frac{de}{e}$. Si la diminution de section est uniforme (même déformation relative dans toutes les directions), que peut-on dire de $\frac{dw}{w}$ et $\frac{de}{e}$? En déduire une relation entre $\frac{dw}{w}$ et $\frac{dL}{L}$.

La bande à laminier est à température relativement élevée (900°C à 1000°C). La zone de déformation élastique est alors très étroite ($\epsilon_0 \approx 0$) et on adopte la modélisation figure 7.

I-B-4 Le chemin d'épaisseur donné en document réponse 1 est celui d'une bande d'acier inox 316L de largeur $w = 1100$ mm. Pour cette nuance d'acier à la température de 900°C, on donne $\sigma_0 = 115$ MPa, $\sigma_1 = 140$ MPa. Il a fallu rattraper une sous-largeur (par réduction de la largeur de bande afin de la ramener à la largeur de la tête de bande) de 2 mm de chaque côté. Calculer la contrainte σ à appliquer à la bande. En déduire la tension T dans l'intercage 67 si l'on suppose que la totalité du rattrapage a été faite dans cet intercage.

La tension est appliquée par un boucleur, par rotation d'angle α autour de (O', \vec{y}) (figure 8). Les tensions \vec{T}_1 et \vec{T}_2 de part et d'autre du rouleau du boucleur sont de même module T et s'appliquent au point C (hypothèse de β_1 et β_2 faibles). La longueur de bande dans l'intercage est fixée par des réglages différentiels de vitesse des rouleaux d'entraînement. L'action du boucleur ne cause pas de glissements au niveau des rouleaux de travail. On suppose en outre la bande parfaitement tendue.

Les liaisons pivot représentées sont parfaites.



**Figure 8 : tension de la bande dans l'intercage
(le bras du boucleur est représenté sans son contre-poids)**

I-B-5 Exprimer β_1 et β_2 en fonction de a , b , α , R et H . Compléter le document réponse 2 pour $D = 6000$ mm, $a = 2400$ mm, $b = 700$ mm, $R = 175$ mm et $H = 365$ mm.

I-B-6 Exprimer C_T le moment exercé par les tensions \vec{T}_1 et \vec{T}_2 autour de l'axe (O', y) en fonction de T , R , b , α , β_1 et β_2 .

Pour $T = 265$ kN et les applications numériques précédentes, on obtient le tableau de valeurs suivant :

α (degrés)	C_T (Nm)
19	4432
20	5742
21	7025

Conclusion : Pour une tension déterminée de la bande dans les intercages, le couple développé par les boucleurs dépend fortement de l'angle α .

I-C - Charge de la motorisation des boucleurs

Le bras du boucleur est motorisé suivant (O', \vec{y}) (voir figure 8) par un moteur à courant continu à excitation séparée constante, à travers un réducteur de vitesse. On donne la chaîne cinématique en figure 9.

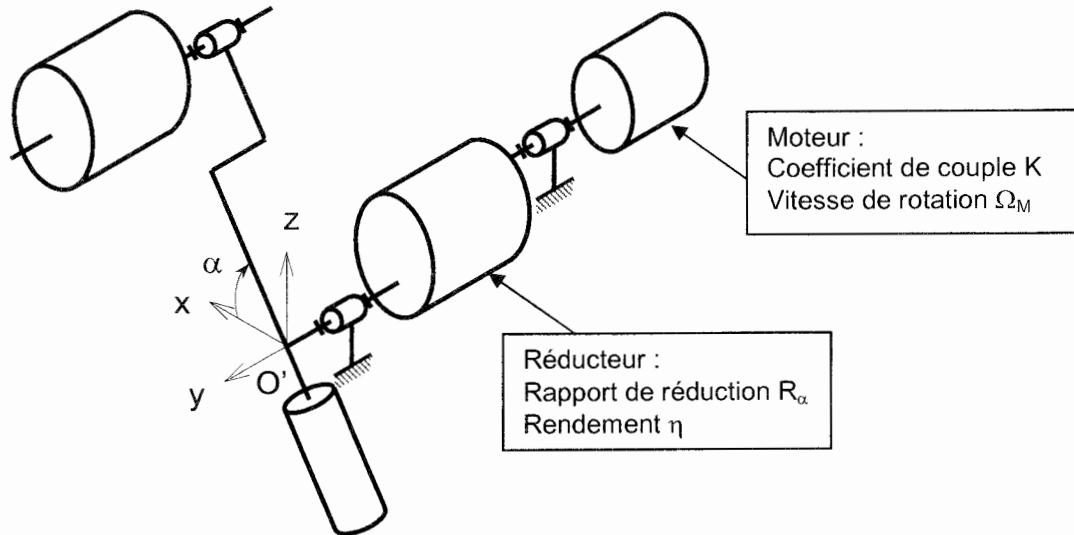


Figure 9 : chaîne cinématique

I-C-1 Quand la bande est tendue comme sur la figure 8, on suppose que le boucleur supporte la totalité du poids de cette bande dans l'intercage. Calculer C_P le moment du couple exercé par le poids de la bande sur l'axe (O', \vec{y}) en fonction de la masse M de la bande dans l'intercage, g l'accélération terrestre, b et α .

La figure 10 donne la composition du boucleur. (G_1, M_1) , (G_2, M_2) et (G_3, M_3) sont respectivement les centres de gravité et les masses du contre-poids, du bras et du rouleau.

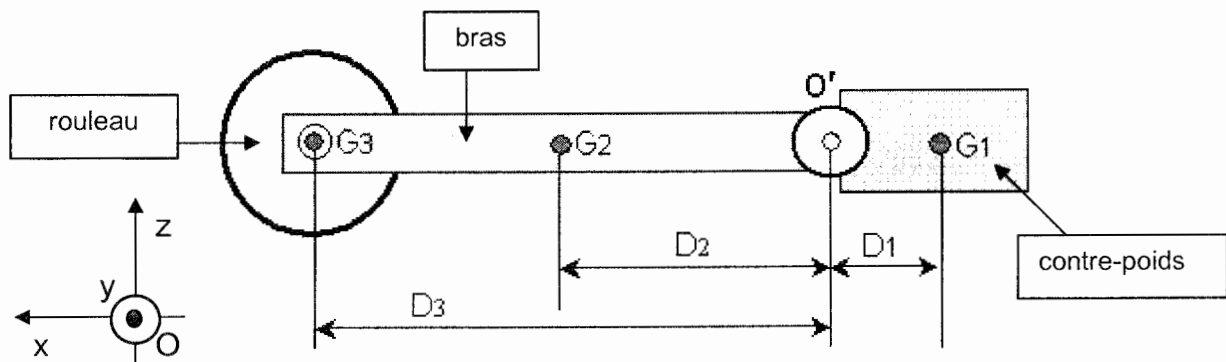


Figure 10 : composition du boucleur (en position $\alpha = 0$)

I-C-2 Calculer C_B le couple exercé par le poids total du boucleur autour de l'axe (O', \vec{y}) en fonction de M_1 , M_2 , M_3 , g l'accélération terrestre, D_1 , D_2 , D_3 et α .

I-C-3 On assimile le couple électromagnétique C_{em} du moteur à son couple utile. Pour α fixe, exprimer C_{em} en fonction de C_T , C_P , C_B , R_α et η . En déduire le courant induit i du moteur en fonction de K , C_T , C_P , C_B , R_α et η .

Le pilotage du train est fait autour de $\alpha = 20^\circ$ ce qui impose des valeurs de β_1 et β_2 très faibles (de l'ordre d'un degré).

I-C-4 Pourquoi a-t-on intérêt à ce que les valeurs de β_1 et β_2 soient faibles ?

I-C-5 Pour α proche de 20° , on peut supposer $\beta_1 \approx \beta_2 \approx 0$. On donne $\rho = 8000 \text{ kg/m}^3$ (ρ la densité de l'acier inox 316L), $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, $D_1 = 280 \text{ mm}$, $D_2 = 400 \text{ mm}$, $D_3 = 700 \text{ mm}$, $M_1 = 1700 \text{ kg}$, $M_2 = 500 \text{ kg}$, $M_3 = 910 \text{ kg}$, $K = 8,4 \text{ Nm/A}$, $R_\alpha = 10,62$ et $\eta = 0,8$.

Dans l'intercage 67 et pour le chemin d'épaisseur donné en document réponse 1 (largeur $w = 1100 \text{ mm}$, épaisseur $e = 1,8 \text{ mm}$), calculer M puis compléter le document réponse 3.

Conclusion : On impose la tension de la bande T par l'intermédiaire du courant d'induit i dans le moteur. La valeur de i est déterminée par un calculateur en fonction de la sous largeur à rattraper, de la nuance de l'acier et de α .

Conclusion générale de cette PARTIE I : le rattrapage de sous largeur d'une bande d'acier se fait en soumettant cette bande à une contrainte. Cette contrainte est appliquée par les boucleurs. La motorisation des boucleurs, pilotée en couple, permet le contrôle de cette contrainte donc du niveau de rattrapage.

PARTIE II : Contrôle en couple des boucleurs

On se propose, dans cette partie II, de dimensionner le correcteur de la boucle de courant permettant le contrôle du courant induit de la motorisation d'un boucleur.

II-A - Motorisation des boucleurs

Le moteur à courant continu présent en figure 9 est commandé par un convertisseur alternatif continu (SILTROL de General Electric) composé de deux ponts PD3 à thyristors tête-bêche à logique d'inversion (les deux ponts ne peuvent pas être amorcés ni conduire en même temps). Compte-tenu du poids du boucleur, on admettra que la conduction est continue au niveau du pont en conduction. On appelle ψ_1 le retard à l'amorçage du pont 1 et ψ_2 le retard à l'amorçage du pont 2.

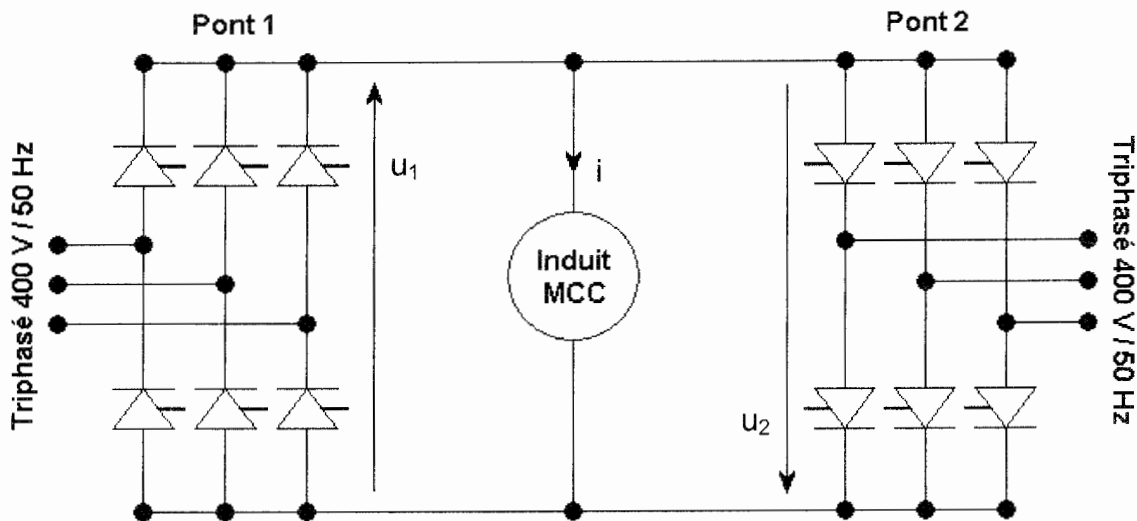


Figure 11 : alimentation de la motorisation du boucleur

II-A-1 Le pont 1 est commandé avec un retard à l'amorçage ψ_1 et le pont 2 est bloqué. Tracer $u_1(t)$ sur le document réponse 4 pour $\psi_1 = 60^\circ$ puis, sur le document réponse 5, pour $\psi_1 = 120^\circ$. Quelle est la fréquence de $u_1(t)$?

II-A-2 On appelle U la tension composée efficace (400 V) d'alimentation des ponts. Exprimer $\langle u_1 \rangle$, tension moyenne de $u_1(t)$, en fonction de U et ψ_1 .

II-A-3 Compléter le tableau sur le document réponse 6.

Le convertisseur est commandé par une tension unique u_c . La loi de commande impose $\Psi_1 = \text{Arccos}(-0,05 u_c)$.

II-A-4 Montrer que $\langle u_1 \rangle = \lambda \times u_c$ et déterminer numériquement λ .

II-A-5 On définit par u_{f1} , la valeur moyenne de u_1 calculée dans une fenêtre temporelle de largeur $T_{rés}/6$ (avec $T_{rés}$ la période réseau). En régime statique $\langle u_1 \rangle = u_{f1}$. On suppose que la transformée de Laplace de u_{f1} vaut $u_{f1}(p) = \lambda \times u_c(p)$. La nature du convertisseur impose un retard T_c entre une variation de la commande u_c et sa prise en compte sur la tension u_{f1} . Borner T_c . Comment se modifie alors la relation entre u_{f1} et u_c si l'on tient compte de T_c ?

II-A-6 Lors de la tension de la bande, ψ_1 varie faiblement autour de ψ_{10} proche de 90° et on peut statistiquement considérer que $T_c = 1,67$ ms. Pour l'étude d'asservissement, on prendra dans l'espace de Laplace $\frac{u_{r1}(p)}{u_c(p)} = \frac{\lambda}{1+T_cp}$. A partir du résultat de la question précédente, expliciter cette approximation.

II-A-7 On appelle R la résistance de l'induit et L l'inductance de l'induit. Le moteur étant à l'arrêt lors de la tension de la bande, on pourra écrire $\frac{i(p)}{u_{r1}(p)} = \frac{1}{R+Lp}$, avec $i(p)$ la transformée de Laplace du courant induit.

On aura donc $\frac{i(p)}{u_c(p)} = \frac{\lambda}{1+T_cp} \times \frac{1}{R+Lp}$. Quelle relation doit-on avoir entre u_c et ψ_2 pour que cette relation reste vraie quand le pont 2 est commandé avec un retard à l'amorçage ψ_2 et le pont 1 bloqué ?

II-B - Asservissement en courant

Le schéma-blocs de l'asservissement en courant est donné figure 12 avec $K_r > 0$.

Ω_M est la vitesse de rotation du moteur et K est sa constante de force contre électromotrice.

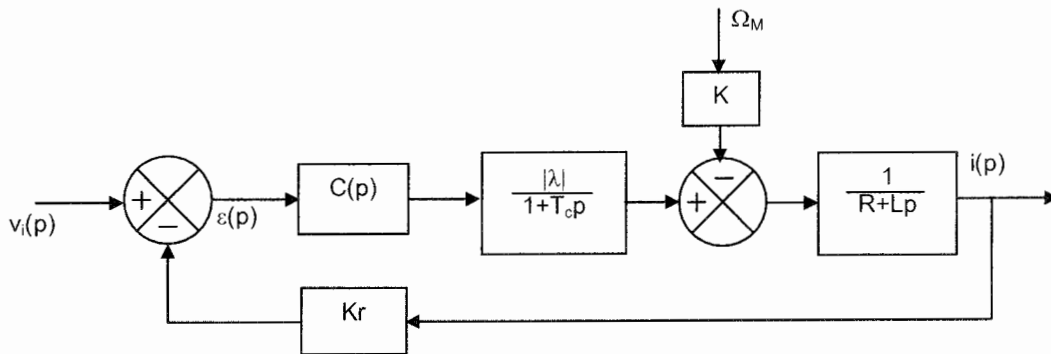


Figure 12 : schéma-blocs de l'asservissement de courant

La tension de la bande se fait moteur à l'arrêt d'où $\Omega_M = 0$ rd/s dans toute cette partie II.

II-B-1 Exprimer $H_{BO}(p)$, fonction de transfert en boucle ouverte de cet asservissement, en fonction des éléments du schéma-blocs.

On impose une correction proportionnelle, on a donc $C(p) = C_1 > 0$.

II-B-2 On donne $H_{BO}(p) = \frac{18 \times C_1}{(1 + \frac{p}{30})(1 + \frac{p}{600})}$. Pour $C_1 = 1$, tracer sur le document réponse 7 les diagrammes

de Bode asymptotiques (gain et phase) de $H_{BO}(p)$.

II-B-3 Compléter le document réponse 7 avec les courbes réelles du gain et de la phase de $H_{BO}(p)$.

II-B-4 Estimer C_1 pour avoir une marge de phase de 45° .

II-B-5 Exprimer $\varepsilon(p)$ en fonction de $v_i(p)$ et des éléments du schéma-blocs. Pour une entrée échelon d'amplitude 1, calculer l'erreur statique ε_0 compte tenu du réglage effectué en question précédente. Comment interpréter cette erreur ? (On rappelle que $1/p$ est la transformée de Laplace de l'échelon d'amplitude 1)

On désire améliorer la précision, on impose alors un correcteur $C(p) = \frac{C_1(1 + \tau_1 p)}{\tau_1 p}$.

II-B-6 Quel est ce type de correcteur ?

II-B-7 On donne $H_{BO}(p) = \frac{18 \times C(p)}{(1 + \frac{p}{30})(1 + \frac{p}{600})}$. On règle le correcteur en fixant la marge de phase du système

asservi à 45° avec compensation du pôle dominant. Calculer C_1 et τ_1 .

II-B-8 Exprimer $\varepsilon(p)$ en fonction de $v_i(p)$ et des éléments du schéma-blocs. En déduire l'erreur statique ε_0 . Pour une consigne en rampe $v_i(t) = t.u(t)$ (avec $u(t)$ échelon de Heaviside), calculer l'erreur de traînage ε_1 compte tenu du réglage effectué en question précédente (on rappelle que $1/p^2$ est la transformée de Laplace de la rampe de pente 1).

Pour éviter les strictions en tête de bande, la consigne de courant v_i n'est pas appliquée sous forme d'un échelon mais sous forme d'une rampe (voir l'annexe 3). L'asservissement doit donc être suffisamment rapide pour suivre cette rampe.

Toutefois le courant i est la superposition de sa valeur moyenne et d'une ondulation à 300 hertz. On veut asservir la valeur moyenne, la bande passante de l'asservissement doit donc être faible devant 300 hertz.

Il faut donc trouver un compromis entre rapidité de réponse et limitation de la bande passante. On le trouve en imposant au système asservi, un comportement du second ordre avec pulsation propre limitée (limitation de la bande passante) et coefficient d'amortissement faible.

On désire avoir un comportement du second ordre $\frac{i(p)}{v_i(p)} = \frac{1}{Kr \times (1 + 2m \frac{p}{\omega_0} + \frac{p^2}{\omega_0^2})}$ avec un coefficient

d'amortissement $m = 0,28$ et une pulsation propre $\omega_0 = 80$ rd/s. Pour cela, on adopte le schéma-blocs figure 13 où l'on corrige la mesure de courant tout en conservant $C(p) = \frac{C_1(1 + \tau_1 p)}{\tau_1 p}$.

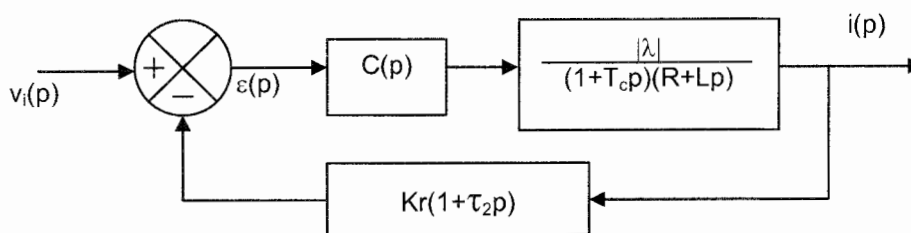


Figure 13 : schéma-blocs de l'asservissement de courant avec retour corrigé

II-B-9 On impose $\tau_1 = T_c$, exprimer m et ω_0 en fonction de R , L , Kr , $|\lambda|$, C_1 , T_c et τ_2 .

II-B-10 En déduire C_1 et τ_2 en fonction de R , L , Kr , $|\lambda|$, T_c , ω_0 et m .

II-B-11 On donne $R = 0,15 \Omega$, $L = 5,5$ mH et on rappelle que $T_c = 1,67$ ms. Exprimer alors C_1 en fonction des seuls paramètres $|\lambda|$ et Kr et calculer numériquement τ_2 .

II-B-12 Quel est le type de correction appliquée sur la mesure de courant ? Ce type de correction est-il utilisable en pratique ?

II-C - Asservissement en courant, cas réel

On propose ci-contre (figure 14) un schéma partiel de l'asservissement.

v_i est la consigne de courant, v_{mi} est la tension issue du capteur de courant intégré au pont tête-bêche SILTROL (- 5 V pour 275 A) et u_c est la tension de commande du pont tête-bêche SILTROL.

On suppose l'amplificateur linéaire parfait.

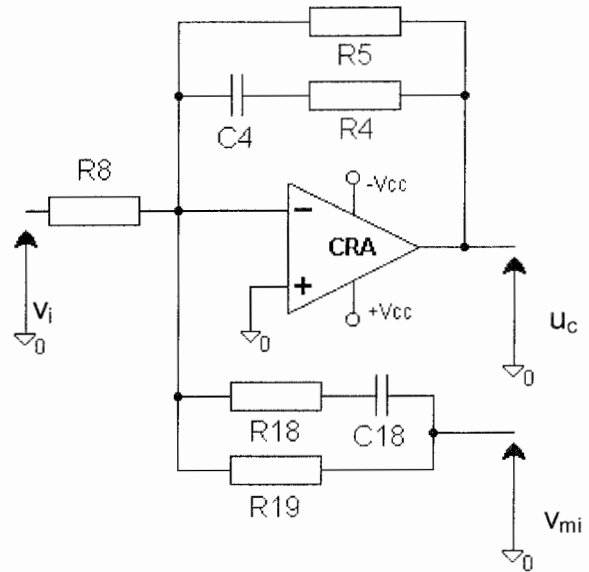


Figure 14 : montage à amplificateur

II-C-1 En régime sinusoïdal de pulsation ω , on note \underline{v}_i , \underline{v}_{mi} et \underline{u}_c les représentations complexes des signaux temporels $v_i(t)$, $v_{mi}(t)$ et $u_c(t)$. Hors saturation, exprimer \underline{u}_c en fonction de \underline{v}_i , \underline{v}_{mi} et des composants du montage.

II-C-2 Pour une étude harmonique, on pose $p = j\omega$. Compléter le document réponse 8 avec des expressions littérales.

On donne $R_4 = 3,3 \text{ k}\Omega$, $C_4 = 1,22 \text{ }\mu\text{F}$, $R_5 = 820 \text{ k}\Omega$, $R_8 = 50,2 \text{ k}\Omega$, $R_{18} = 2,2 \text{ k}\Omega$, $C_{18} = 0,22 \text{ }\mu\text{F}$, $R_{19} = 10 \text{ k}\Omega$ et le gain du capteur de courant $G_i = \frac{-5}{275} \text{ V/A}$.

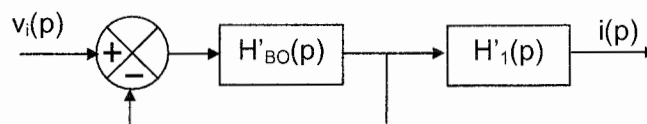
II-C-3 En comparant le document réponse 8 et la figure 13, préciser, dans le cas réel, la valeur numérique de K_r , le type du correcteur $C(p)$ et le type de correction appliquée à la mesure de courant.

Le document réponse 9 donne le diagramme de Bode asymptotique de la fonction de transfert H'_{BO} en boucle ouverte relative au document réponse 8.

II-C-4 En déduire la valeur en dB du gain statique de la fonction de transfert en boucle ouverte puis l'erreur de position pour une entrée en échelon unitaire.

II-C-5 Calculer la marge de phase de l'asservissement en courant.

II-C-6 Montrer, en déterminant l'expression de $H'_1(p)$, que le schéma-blocs du document réponse 8, peut se mettre sous la forme :



II-C-7 Représenter le diagramme asymptotique correspondant au module de H'_1 sur le document réponse 9.

II-C-8 En précisant votre méthodologie, compléter le document réponse 9 avec une évaluation de la fonction de transfert en boucle fermée $H_{BF}(p) = \frac{i(p)}{v_i(p)}$.

Conclusion : Le correcteur réel correspond sensiblement à celui étudié à partir de la question II-B-9. Il permet de suivre une consigne en rampe.

PARTIE III : Positionnement des boucleurs

On se propose, dans cette partie III, de dimensionner le correcteur de la boucle de position permettant le contrôle de la montée et de la descente d'un boucleur. La position des boucleurs est repérée par l'angle α (voir figures 8 et 9).

III-A - Asservissement de position des boucleurs

L'asservissement de position s'effectue par une chaîne comprenant plusieurs boucles internes dont celle de courant étudiée en partie II. Pour cet asservissement de position, on adopte le schéma-blocs figure 15. Le schéma cinématique de la chaîne de transmission a été donné figure 9.

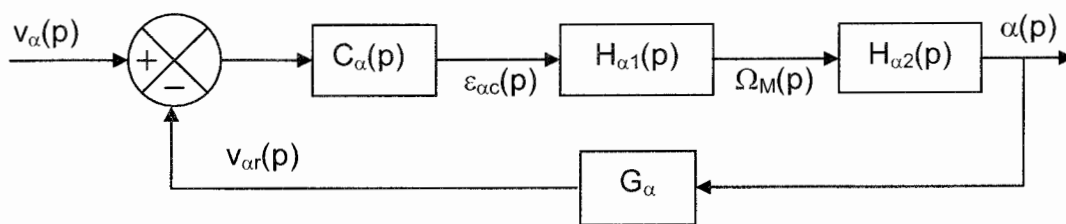


Figure 15 : schéma-blocs de l'asservissement de position

Le travail effectué en partie II ne peut pas être utilisé ici puisque les conditions de fonctionnement de la motorisation sont différentes (vitesse non nulle du moteur et déplacement sans supporter la bande).

III-A-1 On a effectué un essai indiciel de mise en vitesse d'un boucleur en l'absence de bande. Le résultat est donné en annexe 5. Identifier $H_{\alpha 1}(p)$ par la méthode de Broïda rappelée en annexe 4 en donnant les valeurs numériques de G_s , θ et τ_0 .

III-A-2 Si la vitesse du moteur Ω_M est exprimée en rd/s et l'angle α en degrés, exprimer $H_{\alpha 2}(p)$ en fonction du rapport de réduction R_α et p .

Sur le document réponse 10, on a tracé \mathcal{L} le lieu de $G_\alpha \cdot H_{\alpha 1}(p) \cdot H_{\alpha 2}(p)$ pour $p = j\omega$ avec $\omega \in [0, +\infty[$. On rappelle que $R_\alpha = 10,62$ et on donne le gain du capteur de position $G_\alpha = \frac{1}{6}$ V / degré.

III-A-3 Sur le document réponse 10, préciser le sens de parcours du lieu \mathcal{L} lorsque ω croît.

III-A-4 Calculer le gain et la phase de $G_\alpha \cdot H_{\alpha 1}(p) \cdot H_{\alpha 2}(p)$ pour les pulsations $\omega_1 = 4,3$ rd/s et $\omega_2 = 9,8$ rd/s. Sur le document réponse 10, reporter les points P_1 et P_2 correspondants.

III-A-5 $C_{\alpha 1}$ est une constante réelle. Comment déduire de \mathcal{L} le lieu de $C_{\alpha 1} \cdot G_\alpha \cdot H_{\alpha 1}(p) \cdot H_{\alpha 2}(p)$ si $C_{\alpha 1} > 1$? Comment déduire de \mathcal{L} le lieu de $C_{\alpha 1} \cdot G_\alpha \cdot H_{\alpha 1}(p) \cdot H_{\alpha 2}(p)$ si $0 < C_{\alpha 1} < 1$?

III-A-6 On choisit un correcteur proportionnel, $C_\alpha(p) = C_{\alpha 1}$. Régler $C_{\alpha 1}$ pour que le gain de $\frac{\alpha(p)}{v_\alpha(p)}$ présente une résonance de 2 dB. Tracer \mathcal{L}_c le lieu correspondant.

III-A-7 Déduire graphiquement de \mathcal{L}_c la marge de phase M_ϕ et la marge de gain M_g du système asservi, en reportant ces grandeurs sur le document réponse 10.

III-A-8 A partir de \mathcal{L}_e , comment peut-on retrouver le gain statique G_2 de ce système asservi ainsi que son erreur de position ε_2 ?

III-B - Numérisation

Le correcteur $C_\alpha(p)$ est synthétisé par ordinateur intégré dans un automate programmable (figure 16). On appelle T_e la période d'échantillonnage des convertisseurs numérique-analogique (C.N.A) et analogiques-numérique (C.A.N). $\{v_{an}\}$ représente une séquence de valeurs (consigne numérique imposée par l'automate).

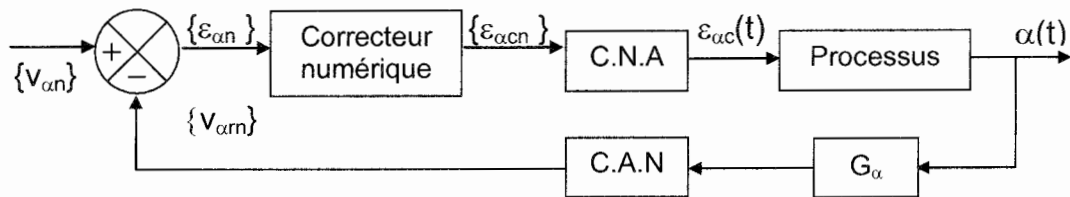


Figure 16 : asservissement numérisé

III-B-1 La valeur $\varepsilon_{ac}(t)$ est issue d'un module convertisseur numérique-analogique 12 bits dont la caractéristique est donnée en annexe 6. Exprimer, en mV, la résolution δ de ce convertisseur dans sa zone linéaire. En déduire le gain k_{CNA} de ce convertisseur dans sa zone linéaire.

III-B-2 Exprimer une condition sur k_{CNA} et le gain du convertisseur analogique-numérique k_{CAN} pour que ces deux gains n'entrent pas dans l'étude de stabilité de l'asservissement numérisé ? Qu'est-ce que cela implique sur la résolution des convertisseurs ?

On fixe $T_e = 15$ ms.

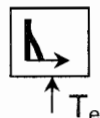
III-B-3 En identifiant le C.N.A à un retard pur statistique $T_e/2$, trouver la nouvelle marge de phase du système asservi figure 16 avec le réglage effectué en question III-A-6 et en supposant la condition énoncée en III-B-2 remplie. Le système est-il toujours stable ?

Conclusion : Le correcteur réel correspond à un correcteur proportionnel de gain plus important ($C_{\alpha 1} = 5$) où l'on limite la dynamique en écrêtant la sortie corrigée (voir l'annexe 7).

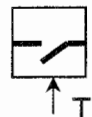
III-C - Correction à réponse pile

On se propose maintenant de synthétiser numériquement le correcteur. L'asservissement numérisé figure 16 est repris en figure 17 où l'on introduit les transformées en z des séquences de valeurs, $v_{an}(z)$, $v_{arm}(z)$, $\varepsilon_{an}(z)$ et $\varepsilon_{ancn}(z)$, du correcteur numérique, noté $C_\alpha(z)$ et les modèles des convertisseurs.

Représentation d'un échantillonneur à impulsions de période T_e .



Représentation d'un interrupteur à sortie numérique de période T_e .



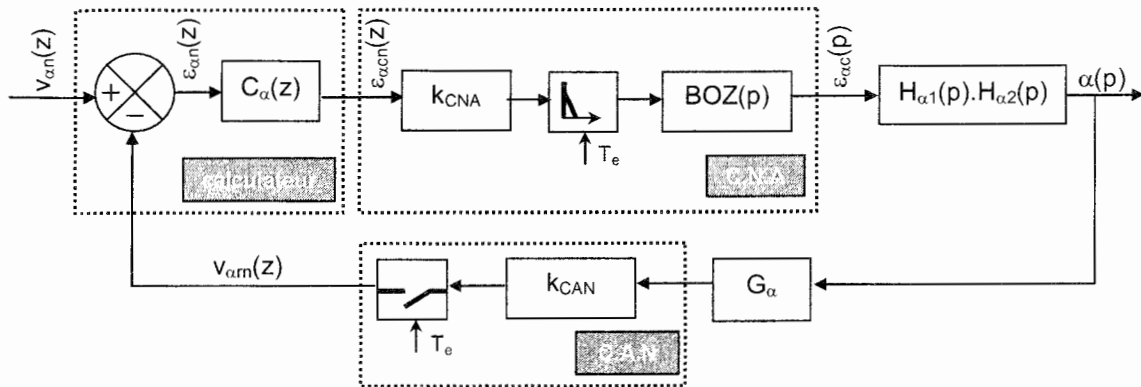


Figure 17 : asservissement numérisé

Le convertisseur numérique-analogique est modélisé par son gain, un échantillonneur à impulsions et un bloqueur d'ordre zéro (BOZ(p)).

III-C-1 Tracer la réponse impulsionnelle du bloqueur d'ordre zéro.

III-C-2 En déduire BOZ(p), la transformée de Laplace du bloqueur d'ordre zéro.

On donne $BOZ(p) \cdot H_{\alpha_1}(p) \cdot H_{\alpha_2}(p) \cdot G_{\alpha} = H_{BOT}(p) = \frac{G_T \cdot e^{-\tau_0 p} \cdot (1 - e^{-T_e p})}{(1 + \theta p) p^2}$ et on considère la condition énoncée en III-B-2 remplie.

III-C-3 Décomposer $\frac{1}{(1 + \theta p) p^2}$ en éléments simples.

Dans notre étude τ_0 et T_e sont sensiblement identiques. On fixera donc $T_e = \tau_0$ pour toute cette partie III-C.

III-C-4 A l'aide de l'annexe 8, exprimer $H_{BOT}(z)$, transformée en z de $H_{BOT}(p)$, en fonction de G_T , T_e et θ .

III-C-5 Ecrire $H_{BOT}(z)$ sous la forme $\frac{G_{BOT}(z - z_0)}{z(z - 1)(z - z_1)}$ où l'on exprimera G_{BOT} , z_0 et z_1 en fonction de G_T , T_e et θ .

L'asservissement numérisé de la figure 17 est alors représenté figure 18.

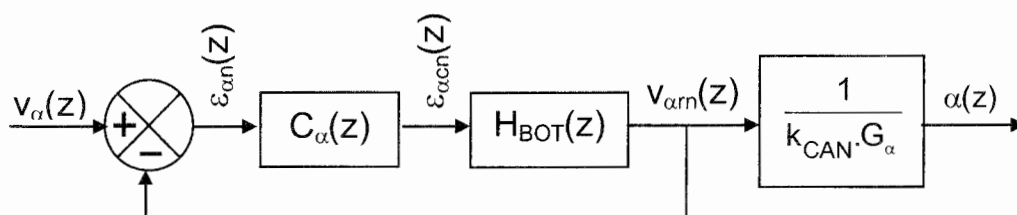


Figure 18 : asservissement numérisé

Pour dimensionner un correcteur à réponse pile, on fixe une erreur $\varepsilon_{\alpha n}(z)$, nulle au $n^{\text{ième}}$ échantillon, pour une entrée $v_{\alpha}(z)$ donnée, en général un échelon.

III-C-6 Exprimer $C_{\alpha}(z)$ en fonction de $\varepsilon_{\alpha n}(z)$, $v_{\alpha}(z)$ et $H_{\text{BOT}}(z)$. Si la consigne est un échelon unitaire, $v_{\alpha}(z) = \frac{z}{z-1}$. Dans ce cas, exprimer $C_{\alpha}(z)$ en fonction de $\varepsilon_{\alpha n}(z)$, G_{BOT} , z_0 et z_1 .

III-C-7 On pose $C_{\alpha}(z) = \frac{N_{\alpha}(z)}{D_{\alpha}(z)}$ où $N_{\alpha}(z)$ et $D_{\alpha}(z)$ sont des polynômes en z . Quelle inégalité doivent respecter les degrés de $N_{\alpha}(z)$ et $D_{\alpha}(z)$ pour que $C_{\alpha}(z)$ soit causal ?

III-C-8 On pose $\varepsilon_{\alpha n}(z) = \sum_{k=0}^{n-1} \varepsilon_{\alpha n}(kT_e) \cdot z^{-k}$. Montrer que la condition de causalité appliquée au correcteur trouvée en III-C-4 impose $\varepsilon_{\alpha n}(0) = \varepsilon_{\alpha n}(T_e) = 1$.

III-C-9 Si $\varepsilon_{\alpha n}(z) = 1 + z^{-1}$, préciser à partir de quel échantillon l'erreur est-elle nulle ? Calculer $C_{\alpha}(z)$ en fonction de G_{BOT} , z_0 et z_1 .

Les applications numériques donnent $G_{\text{BOT}} = \frac{1}{150}$, $z_0 = -0,932$ et $z_1 = 0,810$. On a simulé le fonctionnement et reporté les résultats en annexe 9. On remarque que la valeur de l'angle α est pseudo-oscillante peu amortie.

III-C-10 En explicitant votre réponse, préciser si choisir une erreur nulle au $n^{\text{ième}}$ échantillon est un gage de stabilité.

Pour mieux amortir la réponse angulaire, on peut choisir une erreur tendant plus lentement vers 0, ce qui augmente aussi les temps de calculs.

III-C-11 Proposer, en accord avec ce qui précède, $\varepsilon_{\alpha n}(z)$ imposant une erreur nulle au $6^{\text{ième}}$ échantillon, une erreur de 5 % au $5^{\text{ième}}$ échantillon et le suivi d'une loi exponentielle de constante de temps T_e entre $2^{\text{ième}}$ et $5^{\text{ième}}$ échantillons.

III-C-12 Si on choisit $\varepsilon_{\alpha n}(z) = 1 + z^{-1} + 0,5z^{-2}$, calculer numériquement $C_{\alpha}(z)$. En déduire la relation de récurrence qui lie les valeurs de $\{\varepsilon_{\alpha cn}\}$ et $\{\varepsilon_{\alpha n}\}$.

Les résultats de la simulation sont reportés en annexe 10. La validation du correcteur demande des simulations sur modèle complet du système électromécanique. Une simulation est reportée en annexe 11, uniquement pour la montée du bras.

III-C-13 Pour une consigne de faible amplitude (0,1 V), on observe sur la vue en zoom que l'erreur $\varepsilon_{\alpha n}$ correspond à ce qui est prévu. Pour une consigne de grande amplitude (1 V), l'erreur $\varepsilon_{\alpha n}$ ne correspond pas du tout à ce qui est prévu. Proposer une justification à partir des courbes données en annexe 11.

PARTIE IV : Synthèse et communication

L'annexe 12 représente le réseau de communication du train à bande. Il y a vingt cinq (25) stations interconnectées par double câble coaxial blindé. Chaque station est repérée par son nom et son adresse.

L'ordinateur VAX 1 sert à élaborer les références des équipements pour un coil donné (le VAX 2 est une copie du VAX 1 utilisé en cas de défaillance de ce dernier). Les références sont envoyées aux automates (les DMC) et traitées pendant le laminage, ce sont les consignes.

Parmi les automates DMC ;

Le DMC-RAWC assure le positionnement des cages verticales dans le dégrossisseur.

Le DMC I / O fait l'acquisition de données générales au train, non spécifiques à une fonction ou à un équipement donné, pour le compte de tous les DMC qui en ont besoin. C'est aussi un outil de diagnostic en cas de panne.

Le DMC-FAWC assure le pilotage des 6 boucleurs (montée, descente, tension de la bande, ...).

Les DMC-MSB et DMC-MSA assurent le pilotage des 7 cages F1 à F7 (vitesse d'entraînement, ...).

Avant le laminage d'une bande, le VAX 1 envoie les consignes « intensité i » et « lien intensité-position » au DMC-FAWC et les consignes de « translation linéaire » et « position α » aux DMC-MSB et DMC-MSA.

Une fois le boucleur en contact avec la bande, la position α sera fixée par la vitesse des cages :

- si la mesure de position est inférieure à la référence position, on accélère les cages amont.

- si la mesure de position est supérieure à la référence position, on ralentit les cages amont.

IV-A - Synthèse

En annexes 13 et 14, on donne les schémas des cartes analogiques pour les régulations abordées en parties II et III. En fonctionnement normal, cas de notre étude, le contact CRS est ouvert et le contact [C38] est fermé (annexe 13).

Les cartes sont alimentées en $\pm V_{cc} = \pm 50 \text{ V}$.

IV-A-1 Sur l'annexe 13, quel est le rôle des diodes zéner CRCR2 et CRCR3 ? Déduire de la relation donnée en partie II-A ($\psi_1 = \text{Arccos}(-0,05 \times u_c)$) l'angle de garde des ponts à thyristors.

IV-A-2 Le signal v_{mv} (annexe 14) est une mesure de la tension instantanée u_1 ($v_{mv} = G_v \cdot u_1$ avec $G_v = 15/400$). Quel est le rôle de l'ensemble [LVR1, CVR1] ?

IV-A-3 L'amplificateur VRA synthétise un soustracteur-correcteur pour la boucle d'asservissement de tension. En vous aidant de la partie II-C, préciser de quel type de correcteur il s'agit lorsque les diodes CRVR1 et CRVR2 sont bloquées ?

On appelle $q \cdot RVR4$ la résistance entre pattes 35 et 36 de RVR4 et $(1-q) \cdot RVR4$ la résistance entre pattes 34 et 35 de RVR4, avec $0 \leq q \leq 1$. On note $-V_{cc} = -50 \text{ V}$.

IV-A-4 Exprimer v_{35} , le potentiel de la patte 35 de RVR4, en fonction de V_{cc} , v_A et q si CRVR2 est bloquée. En supposant les éléments du montage parfait, en déduire une relation entre V_{cc} , v_A et q à la limite de conduction de CRVR2. Calculer numériquement q pour que CRVR2 conduise lorsque $v_A \geq 30 \text{ V}$. Que peut-on dire de la limite de conduction de CRVR1 si on adopte le même réglage q sur RVR2 ($q \cdot RVR2$ la résistance entre pattes 30 et 31 de RVR2) ?

La consigne de courant v_i (figures 12, 13 et 14) est obtenue avec un élément non linéaire NL à partir des signaux v'_i et v_A (voir la figure 19). On précise que v'_i est toujours négatif et que le potentiomètre R0E de $100 \text{ k}\Omega$ permet d'ajuster l'amplification en tension du montage autour de « ERSE 22 ».

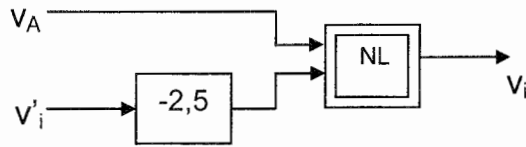


Figure 19 : relation entre v_i , v'_i et v_A

IV-A-5 Quel composant électronique introduit l'élément non linéaire NL. Quelle relation a-t-on entre v_i , v'_i et v_A ?

Dès qu'une bande est présente entre deux cages finisseuses, on lève le boucleur situé dans l'intercage correspondant. Pour cela, le DMC-FAWC fait passer la consigne numérique de position α de 0° à 60° et délivre sur v'_i une rampe de tension (voir l'annexe 3 où la rampe est traduite en courant induit désiré). Dès que le boucleur est en contact avec la bande, l'ensemble DMC-MSB et DMC-MSB impose les vitesses des cages finisseuses pour avoir $\alpha = 20^\circ$.

IV-A-6 Les réglages des potentiomètres RVR2 et RVR4 étant ceux définis en question IV-A-4, expliciter comment, lors de la montée du boucleur, on bascule d'un asservissement de position à un asservissement de courant ?

IV-B - Communication

Les 25 stations échangent des informations via le réseau local industriel CSF (voir annexe 12), avant le laminage, lors du laminage et après le laminage (des envois de consignes du VAX 1 vers les DMC, des retours d'informations des DMC vers les VAX pour le suivi de produit, des échanges inter-DMC en cours de laminage, ...). Le protocole utilisé par le réseau CSF est le protocole CSF pour la couche application du modèle OSI et le protocole Arcnet pour les couches physique et liaison du modèle OSI.

IV-B-1 Le protocole Arcnet définit une liaison par bus à jeton. Ce protocole est-il déterministe ou probabiliste ? Préciser ce que cela implique du point de vue de l'accès au réseau pour les stations.

Deux types de messages sont échangés. Les messages directs entre deux stations (pour le chargement d'un programme par exemple). Les messages globaux émis par une station et réceptionnés par toutes les autres stations, ces messages se font en mode diffusion (partiellement décrit en annexe 15).

IV-B-2 Avant le laminage, le VAX 1 envoie les consignes aux automates DMC dans une trame PAC en mode diffusion. Donner, en binaire, les trente neuf (39) premiers bits de cette trame en précisant les champs.

IV-B-3 Une fois la trame PAC envoyée, le VAX 1 transmet le jeton à la station suivante à l'aide d'une trame ITT. Donner cette trame en binaire en précisant les champs.

IV-B-4 Le débit est de 2 Mbps. Le temps intertrame est de l'ordre de $16 \mu s$ (latence imposée par le protocole et temps de propagation dans la ligne). Si toutes les stations éditent une trame PAC en mode diffusion à tour de rôle, calculer le temps maximum que devra attendre le VAX 1 pour éditer une nouvelle trame PAC.