Concours Centrale-Supélec, France

# Session 2005, filière TSI

## Sciences industrielles 2

### Ce que traite le sujet

- Partie I : étude qualitative du laminage
- Partie II : dimensionnement des moteurs d'enrouleurs
- Partie III : dimensionnement des variateurs de vitesse
- Partie IV : commande des variateurs

**Sujet reproduit sans retouche à partir de la page suivante.**

Résumé des parties, chapitres de cours liés et autres années :
prepahelp.com/annales/centrale/tsi/2005/si2

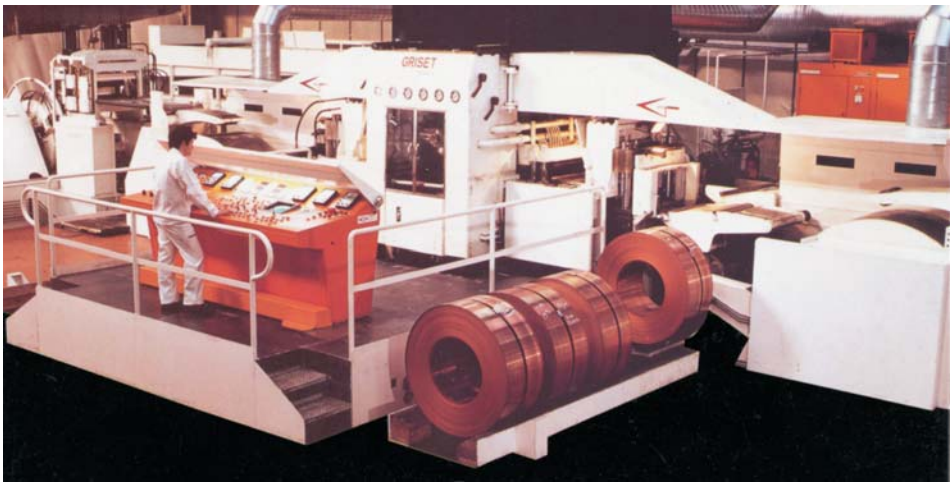
Prepa Help ne revendique aucun droit sur le sujet, propriété de l'organisateur du concours.

# SCIENCES INDUSTRIELLES POUR L'INGÉNIEUR II

## *Étude d'un système de laminage*

### Présentation du système de laminage

Le système étudié est constitué d'un laminoir à froid pour tôles de cuivre ou d'alliages de cuivre. Un seul laminoir, schématisé sur la figure « laminoir en mode quarto », assure la totalité de la réduction d'épaisseur par allers-retours successifs.



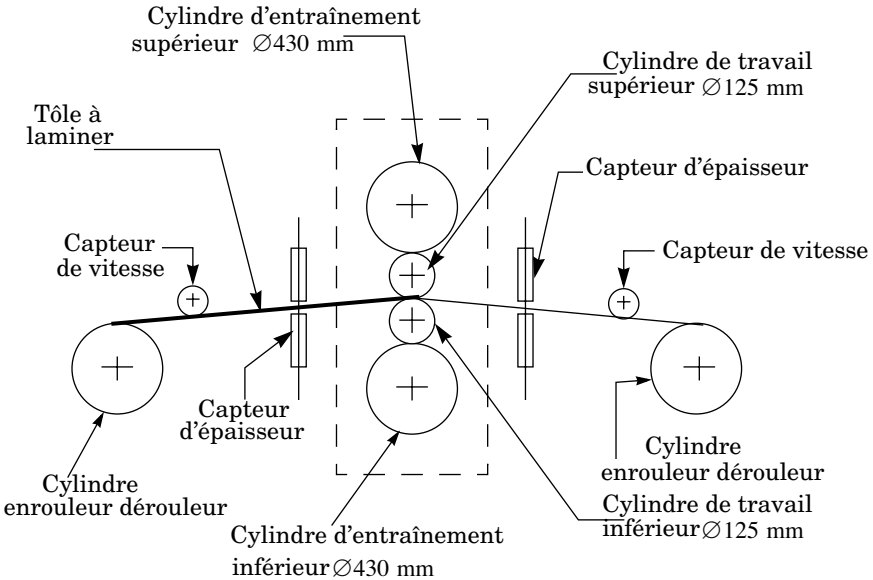

Le cas étudié est celui de la réalisation de tôles minces d'épaisseur $0,4 \pm 0,015$ mm et de largeur $L = 420$ mm, en alliage de cuivre $Cu\ Sn3\ Zn9$, destinées à la fabrication de composants électroniques. Ce laminage est effectué à partir de tôles laminées à chaud, d'épaisseur $20$ mm.

Les principales étapes de la gamme de fabrication sont :

- réduction d'épaisseur de $20$ mm à $2,3 \pm 0,086$ mm en $12$ passes de laminage (6 allers-retours) sur le laminoir configuré en mode « duo » ; seuls les cylindres de diamètre 430 mm sont présents et deviennent donc les cylindres de travail ;
- recuit pour annuler l'écrouissage ;

# Filière TSI

- réduction d'épaisseur de $2,3 \pm 0,086$ mm à $0,403 \pm 0,015$ mm en 6 passes sur le laminoir configuré en mode « quarto », tel que sur la figure ci-dessous.
- dégraissage ;
- « planage » à sec qui permet d'obtenir l'épaisseur finale de $0,4 \pm 0,015$ mm en 1 passe.




**Laminoir en mode quarto**

**Fonctionnement du laminoir**

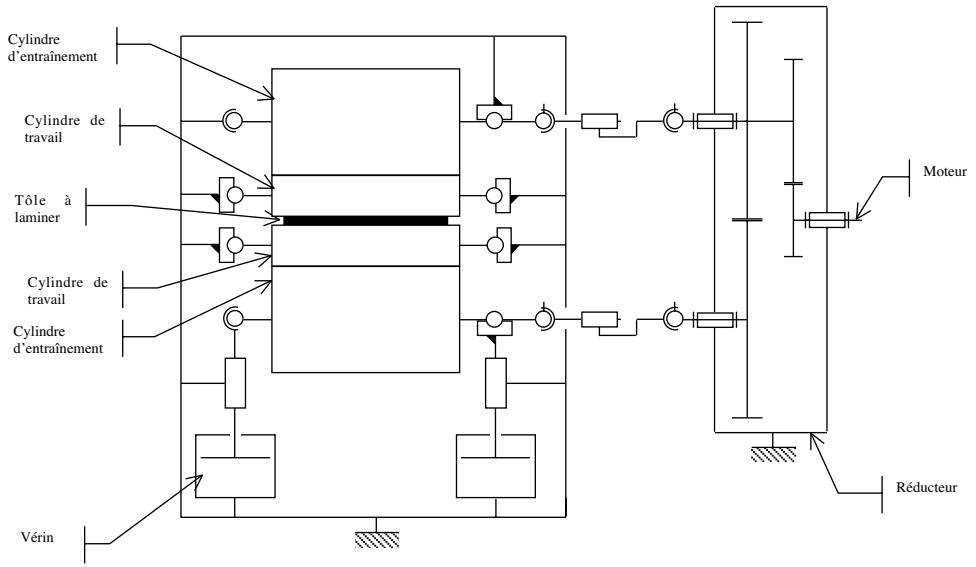
Le principe de conception de ce type de laminoir est de donner une forme « bombée » (ce qui correspond à un écart de cylindricité avec une circularité « parfaite ») aux cylindres de travail et d'entraînement pour que, lors du laminage, les déformations des cylindres permettent d'obtenir une ligne de contact rectiligne entre chaque cylindre de travail et la tôle. Le diamètre d'une section droite des cylindres est plus important au milieu du cylindre qu'aux extrémités.

Les diamètres des cylindres évoluent entre :

- $430$ et $430,03$ mm, pour le cylindre d'entraînement ;
- $125$ et $125,04$ mm, pour le cylindre de travail.

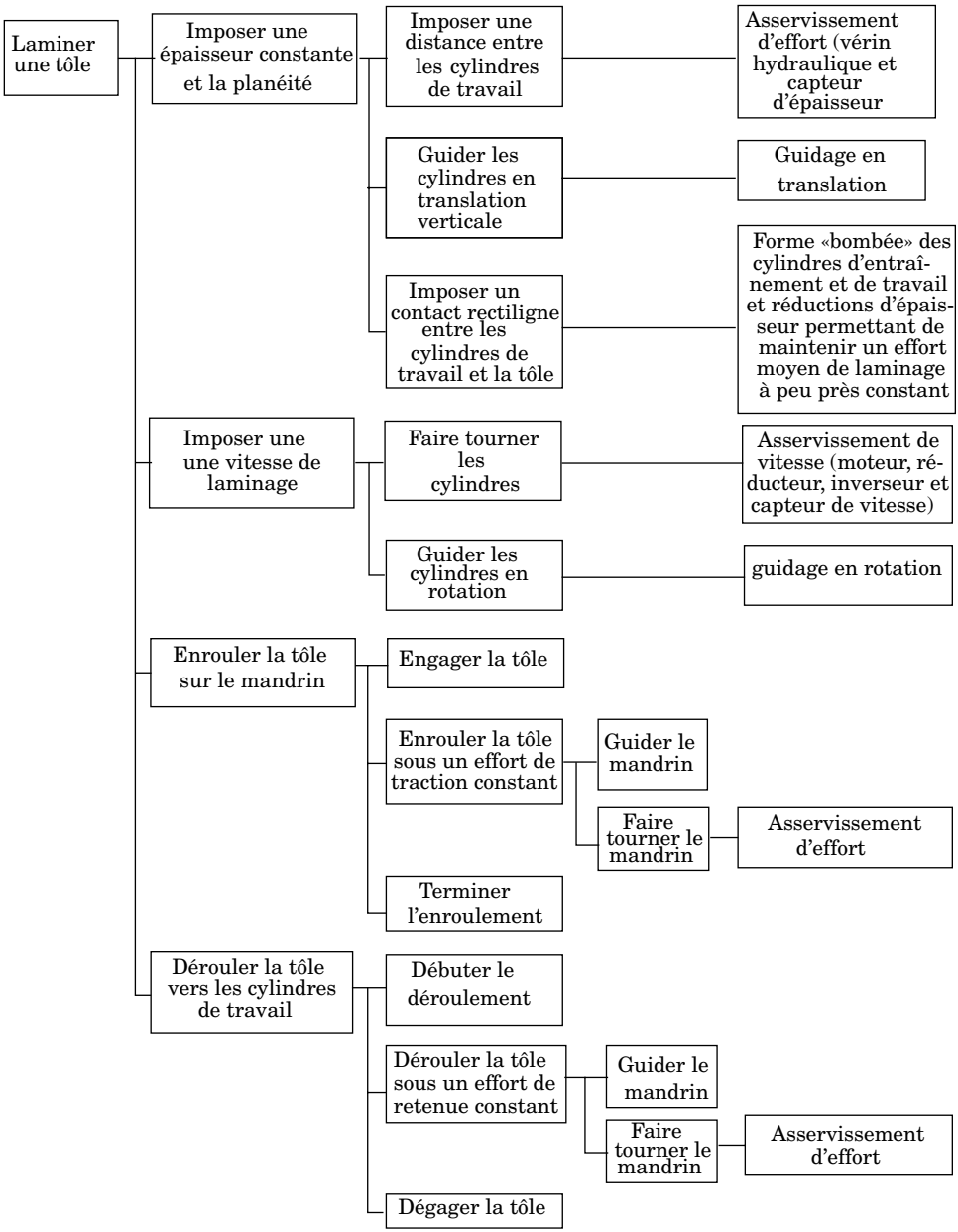
Pour respecter cette contrainte pour n'importe quelle passe de laminage, il faut donc que les déformations des cylindres soient constantes et donc que les efforts exercés par la tôle sur les cylindres de travail le soient aussi. Un modèle de calcul en plasticité permet de déterminer la réduction d'épaisseur pour chaque passe en respectant cette condition, la vitesse de laminage étant imposée.

Les efforts de laminage sont obtenus par un système d'asservissement d'effort utilisant 2 vérins hydrauliques (voir figure ci dessous), placés sous les paliers du cylindre de diamètre $430$ mm. Cet asservissement associé aux réductions d'épaisseur calculées permet de respecter une épaisseur imposée pour la tôle tout en conservant les efforts de laminage quasiment constants. L'intensité de ces efforts est de l'ordre de $6 \cdot 10^7$ N en mode duo et de $3 \cdot 10^7$ N en mode quarto.




**Réglage de l'effort de laminage - entraînement des cylindres**

Le diagramme FAST partiel ci-dessous résume les principales fonctions de service et quelques fonctions techniques du système de laminage.


Laminer une tôle
Imposer une épaisseur constante et la planéité
Imposer une distance entre les cylindres de travail
Asservissement d'effort (vérin hydraulique et capteur d'épaisseur
Guider les cylindres en translation verticale
Guidage en translation
Imposer un contact rectiligne entre les cylindres de travail et la tôle
Forme «bombée» des cylindres d'entraînement et de travail et réductions d'épaisseur permettant de maintenir un effort moyen de laminage à peu près constant
Imposer une une vitesse de laminage
Faire tourner les cylindres
Asservissement de vitesse (moteur, réducteur, inverseur et capteur de vitesse)
Guider les cylindres en rotation
guidage en rotation
Enrouler la tôle sur le mandrin
Engager la tôle
Enrouler la tôle sous un effort de traction constant
Guider le mandrin
Faire tourner le mandrin
Asservissement d'effort
Terminer l'enroulement
Dérouler la tôle vers les cylindres de travail
Débuter le déroulement
Dérouler la tôle sous un effort de retenue constant
Guider le mandrin
Faire tourner le mandrin
Asservissement d'effort
Dégager la tôle

# *Partie I - Étude qualitative du laminage*

**I.A -** Représenter, sous la forme d'un croquis et en augmentant fortement la valeur de l'écart de cylindricité, l'ensemble {cylindre de travail ; cylindre d'entraînement} en mode quarto :

- avant laminage (les cylindres sont en contact mais ne sont soumis à aucun effort de laminage) ;
- en cours de laminage (les cylindres sont déformés par les efforts de laminage)

La transmission de puissance de chaque sortie du réducteur-inverseur vers les cylindres d'entraînement est réalisée par un double joint de Cardan.

**I.B -** Justifier, pour chaque cylindre, la présence de ce type de transmission.

## *Étude de la solution technique associée à la fonction « faire tourner le mandrin de l'enrouleur »*

# *Partie II - Dimensionnement des moteurs d'enrouleurs*

Lors d'un laminage de gauche à droite, l'enrouleur-dérouleur de droite est en fonction enrouleur, tandis que celui de gauche est en fonction dérouleur. Lors d'un laminage de droite à gauche leurs rôles respectifs sont inversés. Outre la fonction de stockage de la tôle laminée, les enrouleurs-dérouleurs assurent un effort de tension de la bande : tension de traction pour l'enrouleur, tension de retenue pour le dérouleur.

L'enroulement peut se faire sur mandrin (diamètre minimum $508\ \text{mm}$) pour des tôles fines qui peuvent être enroulées avec une grande courbure ou sur tambour pour des tôles plus épaisses (diamètre minimum $2000\ \text{mm}$). Une boîte de vitesse permet d'adapter les couples dans les deux cas. Nous nous intéresserons uniquement au cas de l'enroulement sur mandrin. La boîte de vitesse joue simplement dans ce cas le rôle de réducteur de vitesse comme indiqué sur la figure « Réglage de l'effort de laminage et entraînement des cylindres ».

On n'étudiera pas les phases d'engagement et de dégagement de la bande.

Le laminage étant réalisé à largeur de bande constante $(L)$, la vitesse de la bande est plus grande après réduction d'épaisseur qu'avant. La vitesse maximale, après laminage, de la ligne est $V_{\max} = 210\ \text{m} \cdot \text{min}^{-1}$, l'effort maximal de tension de bande à assurer est $T = 30\text{kN}$. Les diamètres minimum et maximum des bobines sont $D_{\min} = 508\ \text{mm}$ (début d'enroulement) et $D_{\max} = 1500\ \text{mm}$ (fin d'enroulement). La boîte de vitesse a, lors de la phase d'enroulement sur mandrin, un rapport $f = 16,36$ (moteur sur l'arbre grande vitesse). On suppose que la boîte de vitesse n'a pas de pertes (rendement de la réduction de vitesse :

100% ). Cette partie étudie plus particulièrement le mode enrouleur de l'enrouleur-dérouleur de droite sauf pour les deux dernières questions de cette partie II.E et II.F) où son mode dérouleur est envisagé.

### II.A - Puissance de traction

Déterminer la puissance mécanique maximale nécessaire pour assurer l'effort de traction.

### II.B - Plage de variation de vitesse

Pour la vitesse maximale de la ligne, déterminer la plage de variation de la vitesse de rotation $N$ du moteur (exprimée en $\text{tr} \cdot \text{min}^{-1}$ ).

Dans les gammes de puissance et de vitesse déterminées précédemment, l'entreprise utilise un moteur à courant continu à excitation séparée dont le moment d'inertie est $J_m = 11 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, la tension nominale $U_N = 420 \text{ V}$ et le courant nominal $I_N = 195 \text{ A}$. Toutes les pertes du moteur sont négligées, la résistance de l'induit l'est également. Les différents temps de cycle étant courts devant la constante de temps thermique du moteur, un dépassement de 80% est toléré sur le courant nominal.

La stratégie de variation de vitesse utilisée est la suivante :

Si la consigne vitesse de rotation du moteur (notée $N$ et exprimée en $\text{tr} \cdot \text{min}^{-1}$ ) est inférieure à la vitesse appelée vitesse de base (notée $N_b$ ), la variation de vitesse est réalisée en agissant sur la tension d'induit à flux magnétique maximal ($\phi = \phi_{\max}$). La vitesse de base est atteinte pour $U = U_N$.

Si la consigne vitesse est supérieure à la vitesse de base, la vitesse est commandée par le courant d'excitation à tension d'induit constante ($U = U_N$).

On donne $N_b = 822 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$.

On rappelle les relations suivantes :

$E = K\phi\Omega$ ; $C = K\phi I$ où $E$ et $C$ sont la fem et le couple électromagnétique du moteur, $I$ et $\Omega$ le courant d'induit et la vitesse de rotation exprimée en $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$, $\phi$ le flux magnétique sous un pôle et $K$ un coefficient de proportionnalité sans dimension. La résistance de l'induit est négligée.

### II.C - Réglage de la vitesse

Donner l'expression de la tension d'induit $U$ en fonction de $N$, $K$, et $\phi$.

Calculer numériquement le produit $K\Phi_{\max}$.

Déterminer, pour $N > N_b$, l'expression du flux magnétique $\phi$ en fonction de $\phi_{\max}$, $N$ et $N_b$.

Tracer $K\phi = f_1(N)$ et $U = f_2(N)$ pour $N$ variant de 0 à $2600 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$ (on précisera les coordonnées des points remarquables).

## II.D - Étude d'une passe de laminage

Si le contrôle de la vitesse de la ligne est entièrement de la responsabilité de l'opérateur, le profil idéal reste un profil trapézoïdal de vitesse notamment pour la précision sur l'épaisseur du produit obtenu. Nous envisagerons ici l'enroulement d'une bande de $2\ \text{mm}$ d'épaisseur sur le mandrin. Le matériau est du cuivre (masse volumique $\rho = 8900\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Le diamètre initial d'enroulement est $D_{\min}$, le diamètre final $D_{\max}$. Le profil est défini par une montée en vitesse avec une accélération linéaire de la bande (notée $\Gamma$) de $0,4\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ jusqu'à atteindre la vitesse de $2\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ puis une vitesse constante puis enfin un freinage en fin de bande avec une accélération de $-0,4\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$. Pendant toutes ces phases l'effort de traction est égal à $T = 30\ \text{kN}$.

II.D.1) Moment d'inertie résultant sur l'arbre rapide (axe du moteur)

En négligeant le moment d'inertie du mandrin et en ne tenant donc compte que de la masse de la tôle enroulée, déterminer le moment d'inertie $J_b$ de la bobine par rapport à l'arbre lent en fonction de $D$ diamètre de la bobine.

Exprimer le moment d' inertie de la bobine ramenée à l'axe rapide $J_{br}$ en fonction de $D$ diamètre de la bobine.

En déduire le moment d'inertie $J$ résultant sur l'axe rapide en fonction de $D$ diamètre de la bobine.

Application numérique : déterminer les valeurs $J_{\min}$ et $J_{\max}$ de $J$ respectivement obtenues pour $D = D_{\min}$ et pour $D = D_{\max}$.

Pour la suite du problème, on prendra $J_{\min} = 11\ \text{kg} \cdot \text{m}^2$ et $J_{\max} = 25\ \text{kg} \cdot \text{m}^2$.

On supposera que les phases d'accélération et de freinage sont suffisamment courtes pour que le moment d'inertie et le diamètre de la bobine puissent être considérés comme constants pendant celles-ci.

II.D.2) Variation de la vitesse de rotation du moteur avec le diamètre

a) Fonctionnement à vitesse linéaire établie $(2\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$.

Déterminer à quel diamètre $D_b$ de la bobine, le moteur atteint la vitesse $N_b$.

Déterminer la vitesse de rotation $N_i$ du moteur à la fin de l'accélération initiale (le diamètre est supposé encore égal à $D_{\min}$)

Déterminer la vitesse de rotation $N_f$ du moteur au début du freinage final (le diamètre est supposé déjà égal à $D_{\max}$).

b) Fonctionnement à vitesse linéaire quelconque

Rappeler l'expression de la vitesse $\Omega$ (en $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$) du moteur en fonction de la vitesse linéaire $V$ (en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) de la bande laminée.

Exprimer l'accélération angulaire $A = \dfrac{d\Omega}{dt}$ en fonction de l'accélération linéaire de la bande $\Gamma = \dfrac{dV}{dt}$ et de $\dfrac{dD}{dt}$ variation du diamètre de la bobine.

Par la suite ce deuxième terme, en général faible, sera toujours négligé. Le principe fondamental de la dynamique appliqué à l'axe rapide s'écrira : $\sum \text{couples sur l'arbre} = J \cdot A$

II.D.3) Étude de l'accélération

Justifier que l'accélération commence à flux constant (pendant un temps $t_1$) et se termine à tension d'induit constante (pendant un temps $t_2$)

Déterminer les durées $t_1$ et $t_2$. Calculer la valeur $I_1$ du courant $I$ pendant la durée $t_1$.

Déterminer l'expression du courant $I$ en fonction du temps pendant la durée $t_2$.

II.D.4) Fonctionnement à vitesse linéaire constante

Justifier que cette phase commence à tension d'induit constante et se termine à flux constant.

Exprimer le débit massique laminé $DM$ (la masse d'alliage laminée par seconde) en fonction de $V$, $L$, $e$ et $\rho$.
Quelle est la masse d'alliage laminée pendant le fonctionnement à tension d'induit constante ? En déduire la durée $t_3$ de cette phase puis le courant d'induit pendant cette phase (Les variations de la vitesse angulaire et du moment d'inertie sont supposées suffisamment lentes pour qu'on puisse les négliger dans l'écriture du principe fondamental de la dynamique) Quelle est la masse d'alliage laminée pendant le fonctionnement à flux constant ? En déduire la durée $t_4$ de cette phase. En déduire l'expression du courant d'induit pendant cette phase (même remarque que précédemment).

II.D.5) Étude du freinage

Justifier que durant cette phase, le flux reste constant. Déterminer le courant d'induit durant cette phase. Quelle est la durée $t_5$ de cette phase ?

II.D.6) Dresser l'allure du profil du courant pendant cette passe de laminage. Vérifier que le courant d'induit reste toujours en deçà des limites autorisées.

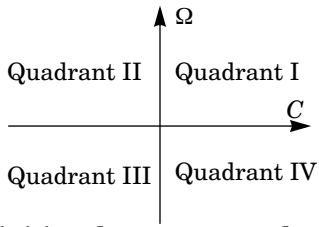
### II.E - Freinage en fonctionnement dérouleur après le dégagement de la bande

On envisage maintenant le freinage en mode dérouleur de cet enrouleur-dérouleur, lorsque la bande est totalement déroulée du mandrin. Ce freinage est toujours réalisé avec le même couple de freinage. Il doit durer au maximum $1,5\ \text{s}$ et est réalisé à flux maximum et à courant constant. Déterminer le courant à imposer dans le moteur.

### II.F - Fonctionnement quatre quadrants

On s'intéresse plus particulièrement à l'enrouleur-dérouleur de droite.

La vitesse de son moteur est comptée positivement lorsque la bande est laminée de gauche à droite. Le quadrant *I* correspond à un fonctionnement moteur. Déterminer les quadrants de fonctionnement du moteur pour les fonctionnements suivant :




**Définition des quatre quadrants**

Laminage de gauche à droite (phase à vitesse constante)

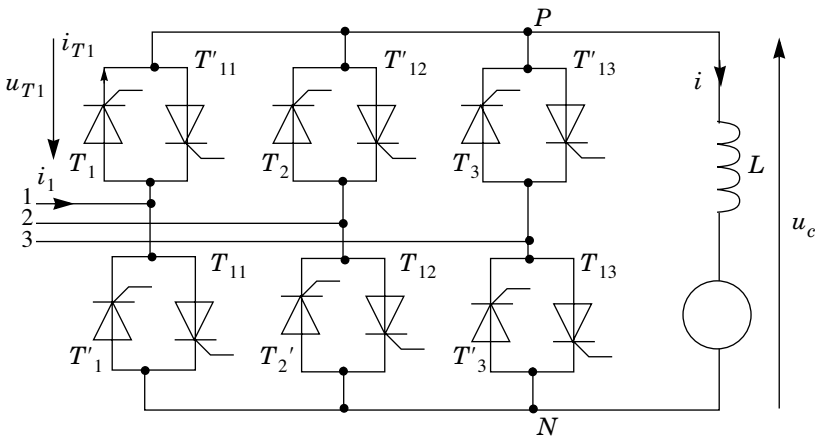
Laminage de droite à gauche (phase à vitesse constante)

Freinage après dégagement de la bande après un laminage de droite à gauche.

Sachant que le flux reste toujours de même signe, conclure sur le type de réversibilité que devra assurer le modulateur d'énergie.

## *Partie III - Dimensionnement des variateurs de vitesse*

Qu'il s'agisse des moteurs d'enrouleurs dérouleurs ou du moteur principal, les modulateurs d'énergie choisis sont constitués de deux ponts triphasés tous thyristors têtes bêches (voir figure). Ces variateurs permettent de contrôler soit le courant soit la vitesse du moteur. Les consignes de courant et de vitesse sont fournies par un *API* .




**Modulateur d'énergie**

Le pont « tête » est constitué des thyristors $T_1$ , $T'_1$ , $T_2$ , $T'_2$ , $T_3$ et $T'_3$ . Le pont « bêche » est constitué des thyristors $T_{11}$ , $T'_{11}$ , $T_{12}$ , $T'_{12}$ , $T_{13}$ et $T'_{13}$ . Ces deux ponts ne fonctionnent jamais ensemble. Le pont commandé est fonction du signe de la consigne courant du variateur.

Les trois tensions simples ont pour expression :

$$v_1(t) = V\sqrt{2}\,\sin\omega\cdot t \;;\; v_2(t) = V\sqrt{2}\,\sin\left(\omega\cdot t - \frac{2\pi}{3}\right) \;;\; v_3(t) = V\sqrt{2}\,\sin\left(\omega\cdot t - \frac{4\pi}{3}\right).$$

On posera $\theta = \omega\cdot t$.

On notera $u_{12} = v_1 - v_2$, $u_{23} = v_2 - v_3$ et $u_{31} = v_3 - v_1$. La fréquence du réseau est de $50$ Hz. Le montage est alimenté directement par le réseau. La valeur efficace de la tension composée est $U = 400$ V.

Comme pour les ponts monophasés, on parle pour les ponts triphasés d'un angle de retard à l'amorçage des thyristors par rapport à la commutation naturelle de ces composants. Cet angle (que nous noterons $\alpha$ pour le pont tête et $\alpha'$ pour le pont bêche) mesure le décalage angulaire entre le début de la conduction d'un thyristor et le début de la conduction d'une diode qui serait à la même place. Il varie de $0$ à $\pi$.

Pour la suite des questions, la conduction est supposée ininterrompue (Pour tout $t$, $i(t) \neq 0$).

### III.A - Pont en conduction

Préciser le pont en conduction lorsque le courant moteur est positif et, ensuite, lorsqu'il est négatif.

### III.B - Tension $u_c(t)$

III.B.1) Pont tête

On étudie une phase de fonctionnement ou le pont tête fonctionne à $\alpha$ constant. Le tableau ci-dessous précise les composants en conduction à chaque instant d'une période des tensions secteurs

| $\theta$(en rad) | $\alpha+\pi/6$ | $\alpha+\pi/2$ | $\alpha+5\pi/6$ | $\alpha+7\pi/6$ | $\alpha+3\pi/2$ | $\alpha+11\pi/6$ | $\alpha+\pi/6+2\pi$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Thyristors cathodes communes | $T_1$ | | | $T_2$ | | | $T_3$ |
| Thyristors anodes communes | $T'_2$ | | $T'_3$ | | | $T'_1$ | $T'_2$ |

Préciser dans chacun des 6 intervalles de temps apparaissant dans le tableau ci-dessus, l'expression de $u_c(t)$ et de $u_{T1}(t)$ en fonction des tensions composées $u_{12}$, $u_{23}$ et $u_{31}$.

Représenter ces tensions, sur une période de la tension secteur pour $\alpha = \frac{\pi}{3}$ sur le document réponse joint.

Quelle est la période de $u_c(t)$ ? Exprimer la valeur moyenne $<u_c>$ de $u_c(t)$ en fonction de $\alpha$. Mettre cette tension sous la forme $<u_c> = U_{co}\cos\alpha$. Donner la valeur numérique de $U_{co}$.

III.B.2) Pont bêche

Lorsque le pont bêche fonctionne, déduire des questions précédentes l'expression de $<u_c>$ en fonction de $U_{co}$ et de $\alpha'$.

### III.C - Quadrants de fonctionnement

Par la convention d'orientation choisie, une vitesse est positive si $<u_c>$ l'est. Déterminer pour chaque quadrant de fonctionnement, le pont en conduction et l'intervalle dans lequel évolue l'angle $\alpha$ ou l'angle $\alpha'$.

### III.D - Allure des courants

Le courant dans la charge est supposé positif et parfaitement lissé. On donne $I = +200$ A.

Sur le document réponse, représenter $i_{T1}(t)$ et $i_1(t)$ sur une période de la tension secteur. Calculer la valeur efficace $I_1$ de $i_1$.

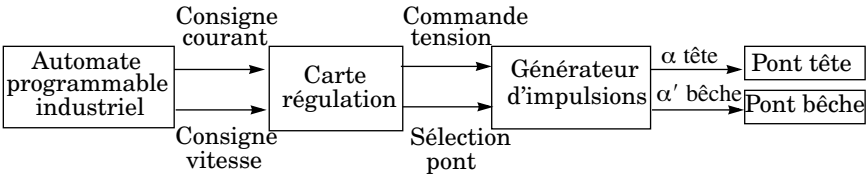
### III.E - Choix des thyristors

Quelle est la valeur maximale de la tension inverse aux bornes du thyristor ?

Exprimer le courant moyen dans un thyristor en fonction du courant dans la charge.

Citer une autre grandeur pouvant intervenir dans le choix d'un thyristor. Cette grandeur est-elle importante dans le cas étudié ici ?

## *Partie IV - Commande des variateurs*




**Commande des modulateurs d'énergie**

L'automate fournit les consignes courant et vitesse du moteur, ces consignes sont transmises à la carte régulation. Cette dernière génère la commande des générateurs d'impulsions. Des deux grandeurs - courant et vitesse - seule l'une sera régulée en fait. Ce sera la plus « limitante » : si la vitesse atteint la valeur

demandée avec un courant inférieur au seuil fixé par la consigne courant, c'est la vitesse qui sera régulée. Si par contre le courant atteint la valeur demandée lorsque la vitesse est encore inférieure à sa valeur de consigne, c'est le courant qui sera régulé. Ainsi pour le moteur principal qui règle la vitesse de défilement de la bande laminée, c'est la régulation de vitesse qui sera effective. La consigne courant permet alors une protection contre les sur-couples accidentels. Par contre, la régulation de courant prend le pas dans le cas des enrouleurs dérouleurs. La consigne vitesse permet dans ce cas d'éviter que le moteur parte trop vite si le couple résistant diminue brutalement.

On étudiera dans cette partie uniquement les fonctionnements à flux constant (noté $\phi_{max}$) des machines à courant continu.

On va s'intéresser plus particulièrement à la carte régulation et à ses paramétrages pour les moteurs d'enrouleurs dérouleurs.

On supposera dans cette question que la relation entre la tension moyenne et l'angle $\alpha$ de retard à l'amorçage des thyristors est : $U_c = \langle u_c \rangle = 535\cos\alpha$. La grandeur de sortie du bloc « Générateur d'impulsions+Ponts » est la valeur moyenne $U_c$ de la tension $u_c(t)$ de sortie du pont sur une période de cette dernière.

Le moment d'inertie total ramené à l'arbre rapide (celui du moteur) varie, en fonction du remplissage de la bobine, de 11 à 25 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$.

Le capteur de courant et son électronique associée fournissent un signal $m_i$ proportionnel au courant dans le moteur. On a $m_i = 1,5$ V lorsque $i = 100$ A.

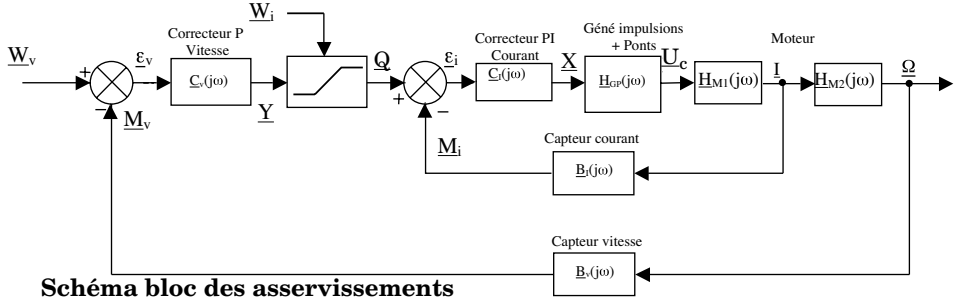



**Schéma bloc des asservissements**

## IV.A - Étude de la boucle de courant.

La deuxième partie a montré qu'il était fondamental, pour la conduite du procédé, de contrôler précisément le couple moteur. Le contrôle du couple s'effectuant par celui du courant, l'objet de cette partie est d'optimiser le réglage des correcteurs de la boucle de courant.

IV.A.1) Générateurs d'impulsions + Ponts

Les générateurs d'impulsions commandant les thyristors sont commandés en tension : l'angle $(\alpha)$ de retard à l'amorçage des thyristors est commandé par la tension $x$ et on a $U_c = 38 \cdot x$. Déterminer $\underline{H}_{GP}(j\omega)$. Exprimer l'angle de retard $\alpha$ en fonction de la tension $x$. Comment appelle-t-on ce type de commande ? La relation $U_c = 38 \cdot x$ laisse à penser qu'une variation de la commande $x$ provoque une variation immédiate de $\alpha$ et donc de la tension moyenne $U_c$. Est ce rigoureusement vrai ?

IV.A.2) Fonction $\underline{H}_{M1}(j\omega)$

On rappelle pour les moteurs les données suivantes : À flux maximum, la vitesse de base $(N_b = 822 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1})$ est obtenue en charge $(I = 400 \text{ A})$ pour une tension $U_c = 420 \text{ V}$. On précise également que la résistance de l'induit du moteur est $R = 40 \text{ m}\Omega$. Les frottements visqueux sont supposés nuls et le couple de charge constant. L'inductance totale de l'induit du moteur de sa bobine de lissage est $L = 200 \text{ µH}$.

Déterminer le coefficient de proportionnalité $\lambda$ entre la fem et la vitesse angulaire du moteur exprimée en $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$.

Déterminer $\underline{H}_{M1}(j\omega)$ Mettre cette fonction de transfert sous la forme

$$\underline{H}_{M1}(j\omega) = \beta \frac{\tau_m j\omega}{1 + j\omega\tau_m + (j\omega)^2 \tau_m \tau_e}$$

et exprimer $\beta$, $\tau_m$ et $\tau_e$ en fonction des paramètres de la machine et de sa charge. Réaliser l'application numérique et donner les deux valeurs extrêmes $\tau_{m1}$ et $\tau_{m2}$ $(\tau_{m1} < \tau_{m2})$ de $\tau_m$.

Mettre cette fonction de transfert sous forme canonique et exprimer la pulsation propre (notée $\omega_0$) et le facteur d'amortissement (noté $z$) en fonction de $\tau_m$ et $\tau_e$.

Déterminer numériquement les valeurs $\omega_{01}$ et $\omega_{02}$ de $\omega_0$, pour les deux valeurs extrêmes du moment d'inertie. Déterminer numériquement les valeurs $z_1$ et $z_2$ de $z$, pour les deux valeurs extrêmes du moment d'inertie. Pour le moment d'inertie minimum, montrer que $\underline{H}_{M1}(j\omega)$ peut se mettre sous la forme

$\underline{H}_{M1}(j\omega) = \beta \frac{\tau_{m1} j\omega}{(1 + j\omega\tau)^2}$. Calculer numériquement $\tau$.

IV.A.3) Filtrage de l'information courant

a) Déterminer $B_{I0}$, gain statique du capteur.

b) (Pour répondre à cette question il faut avoir traité au moins partiellement la partie II). Le courant moteur est ondulé, or c'est d'une information sur sa valeur moyenne dont on a besoin. Un filtre passe-bas du premier ordre est utilisé pour

limiter l'ondulation sur la mesure de courant. La fonction de transfert du capteur de courant est donc :

$$\underline{B}_i(j\omega) = \frac{B_{I0}}{1 + j\tau_f\omega}.$$

Rappeler la fréquence de $u_c(t)$ et de $i(t)$. Déterminer la valeur à donner à $\tau_f$ pour que le filtre introduise une atténuation d'un facteur $10$ du fondamental de $i(t)$ par rapport à sa composante continue. Pour la suite du problème, on prendra $\tau_f = 5$ ms.

IV.A.4) Correcteur PI courant

a) Réglage de la stabilité de la boucle de courant.

Ce réglage est effectué pour le moment d'inertie minimal. Le correcteur PI courant a pour fonction de transfert :

$$\underline{C}_I(j\omega) = A_I\frac{1 + T_i j\omega}{T_i j\omega} \text{ avec } A_I = 0,1.$$

Justifier l'appellation « correcteur proportionnel intégral ». On règle le temps d'intégration $T_i$ du correcteur tel que $T_i = \tau$. Déterminer la fonction de transfert en boucle ouverte $\underline{H}_{BOV}(j\omega)$ lorsque le moment d'inertie est minimum. Déterminer la pulsation $\omega_2$ pour laquelle le module de $\underline{H}_{BOV}(j\omega)$ est égal à $1$. En déduire la marge de phase du système.

b) Influence de $J$ sur la stabilité de la boucle de courant.

Calculer la fonction de transfert en boucle ouverte $\underline{H}_{BOP}(j\omega)$ lorsque le moment d'inertie est maximum et la mettre sous la forme $\underline{H}_{BOP}(j\omega) = \underline{H}_{BOV}(j\omega)\underline{D}(j\omega)$ et donner l'expression de $\underline{D}(j\omega)$. Évaluer le gain et la phase de $\underline{D}(j\omega)$ pour $\omega = \omega_2$ (on pourra se servir à ce propos du tableau donné en annexe). Montrer que la variation de $J$ ne devrait pas modifier beaucoup la marge de phase.

IV.A.5) Erreur statique de la boucle de courant

Déterminer l'erreur statique (exprimée en pour cent) du système pour $J$ minimum.

Quelle variation $\Delta Q_1$ de $Q$ permet d'obtenir une variation $\Delta I$ de $I$ de $100$ A lorsque $J$ est minimum ?

Quelle variation $\Delta Q_2$ de $Q$ permet d'obtenir une variation $\Delta I$ de $I$ de $100$ A lorsque $J$ est maximum ?

Dans le cas des commandes d'enrouleurs dérouleurs, l'automate envoie au variateur à chaque instant une consigne courant calculée en fonction des paramètres imposés par l'opérateur : tension de bande, vitesse, accélération mais aussi de l'état du système à un instant donné : diamètre d'enroulement, vitesses

d'entrée et de sortie, etc... Il est donc impératif d'avoir un contrôle précis du courant.

Proposer une solution permettant de répondre à cette exigence.

**IV.B - Boucle de vitesse**

Il s'agit dans cette question de déterminer un réglage convenable du correcteur de la boucle de vitesse. On suppose dans cette partie que l'écrêteur n'est pas actif $(q = y)$.

Convenablement corrigée, la boucle de courant (entrée $q$, sortie $i$) se comporte comme un système du premier ordre de constante de temps $\tau_i = 5\ \text{ms}$ et de gain statique $36,5\ \text{dB}$ quelle que soit la valeur de $J$.

IV.B.1) Identification des éléments de la boucle de vitesse

Déterminer l'expression de la fonction de transfert

$$\underline{H}_I(j\omega) = \frac{\underline{I}(j\omega)}{\underline{Q}(j\omega)}.$$ (On pourra poser $H_I(0) = H_{I0}$).

Déterminer l'expression de la fonction de transfert $\underline{H}_{M2}(j\omega)$.

IV.B.2) Capteur de vitesse

Le capteur de vitesse est très rapide, car il est également utilisé pour le contrôle de la pression de laminage. Sa constante de temps est très faible, on négligera son effet devant les autres constantes de temps du système. La fonction de transfert de ce capteur est donc un réel positif : $\underline{B}_v(j\omega) = B_v$. En supposant que la boucle de vitesse n'a pas d'erreur, déterminer la valeur de $B_v$ permettant d'obtenir une vitesse de $1000\ \text{tr} \cdot \text{min}^{-1}$ pour une consigne d'entrée $w_v$ de $5\ \text{V}$.

IV.B.3) Réglage du correcteur proportionnel

Le correcteur est de type proportionnel. Déterminer la valeur $C_{v0}$ de $\underline{C}_v(j\omega)$ donnant au système une marge de phase de $65°$ au moins, quel que soit le moment d'inertie.

Annexe : Table des valeurs de gain et de phase $\underline{H}_2(j\omega) = \dfrac{1}{1 + 2z\dfrac{j\omega}{\omega_0} + \left(\dfrac{j\omega}{\omega_0}\right)^2}$ pour différentes valeurs de $z$

| z | $\frac{\omega}{\omega_0}$ (en rad.s$^{-1}$) | 0,1 | 0,5 | 0,8 | 1 | 1,2 | 1,5 | 1,8 | 2 | 2,4 | 2,8 | 3 | 4 | 5 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,5 | G (en dB) | 0,0 | 0,9 | 1,1 | 0,0 | -2,1 | -5,8 | -9,2 | -11,1 | -14,5 | -17,4 | -18,6 | -23,8 | -27,8 | -40,0 |
| | φ (en °) | -6 | -34 | -66 | -90 | -110 | -130 | -141 | -146 | -153 | -158 | -159 | -165 | -168 | -174 |
| 1 | G (en dB) | -0,1 | -1,9 | -4,3 | -6,0 | -7,7 | -10,2 | -12,5 | -14,0 | -16,6 | -18,9 | -20,0 | -24,6 | -28,3 | -40,1 |
| | φ (en °) | -11 | -53 | -77 | -90 | -100 | -113 | -122 | -127 | -135 | -141 | -143 | -152 | -157 | -169 |
| 1,5 | G (en dB) | -0,3 | -4,5 | -7,7 | -9,5 | -11,2 | -13,4 | -15,3 | -16,5 | -18,7 | -20,7 | -21,6 | -25,7 | -29,0 | -40,3 |
| | φ (en °) | -17 | -63 | -81 | -90 | -97 | -106 | -113 | -117 | -123 | -129 | -132 | -141 | -148 | -163 |
| 2 | G (en dB) | -0,6 | -6,6 | -10,2 | -12,0 | -13,7 | -15,7 | -17,5 | -18,6 | -20,6 | -22,4 | -23,2 | -26,8 | -29,9 | -40,6 |
| | φ (en °) | -22 | -69 | -84 | -90 | -95 | -102 | -107 | -111 | -116 | -121 | -124 | -133 | -140 | -158 |
| 5 | G (en dB) | -3,0 | -14,1 | -18,1 | -20,0 | -21,6 | -23,6 | -25,2 | -26,1 | -27,8 | -29,2 | -29,8 | -32,6 | -34,9 | -43,0 |
| | φ (en °) | -45 | -81 | -87 | -90 | -92 | -95 | -97 | -99 | -101 | -104 | -105 | -111 | -116 | -135 |

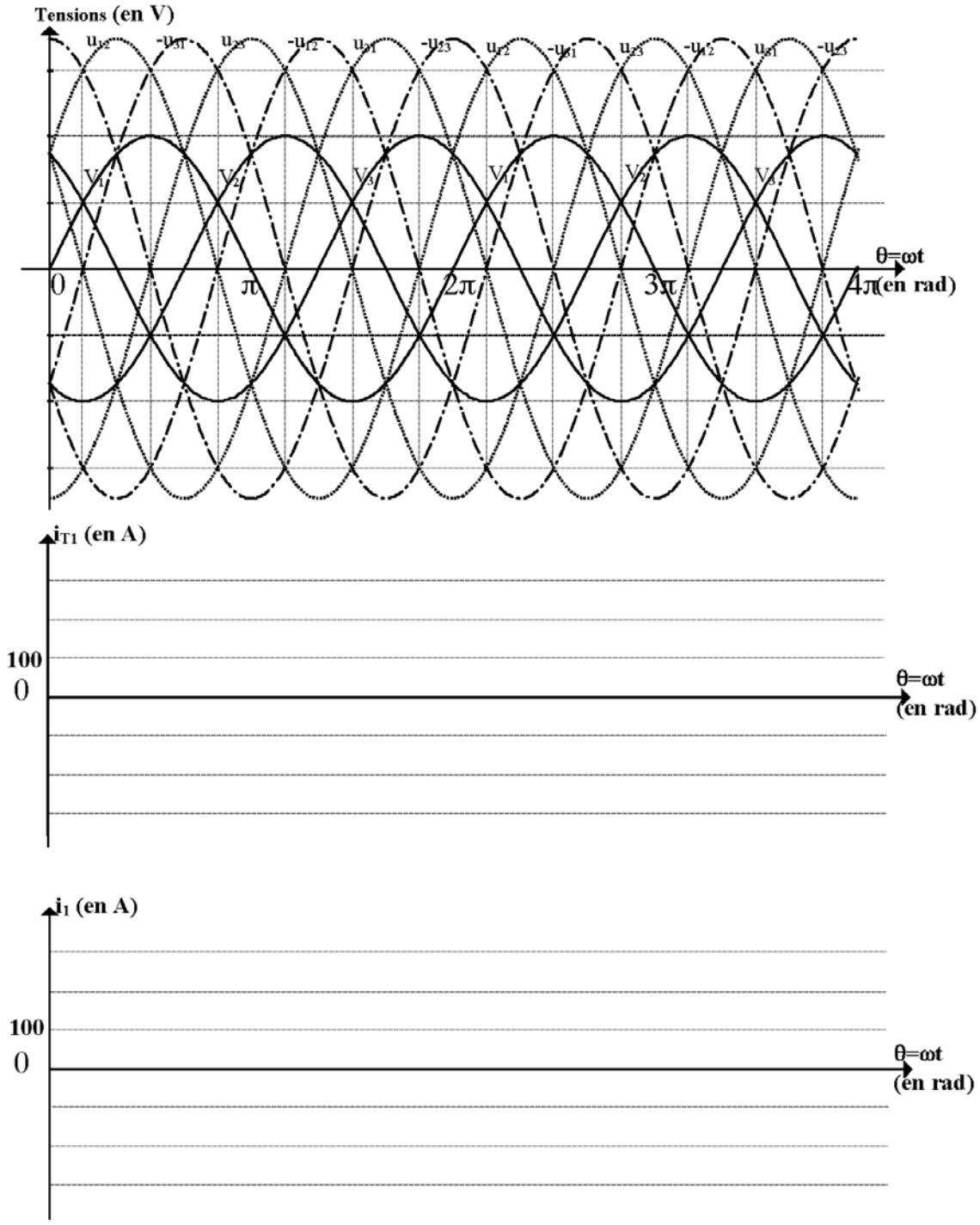
**••• FIN •••**

# Annexe du sujet de Sciences Industrielles pour l'Ingénieur II

***Annexe du sujet de S2I II, filière TSI***

***Document réponse***

Document réponse



# Travailler les chapitres de ce sujet

Prepa Help suit le programme de TSI chapitre par chapitre : cours détaillé, méthodes, pièges, exercices et problèmes corrigés pas à pas, tirés des concours. L'essai gratuit donne accès aux chapitres offerts de ta filière, sans carte bancaire.

## Chapitres liés à ce sujet

- Architecture fonctionnelle et structurelle : chaînes d'information et de puissance
- Cinétique : torseurs cinétique et dynamique, énergie cinétique, inertie équivalente
- Énergétique : puissances, théorème de l'énergie cinétique, rendement
- Dynamique des systèmes de solides : principe fondamental, stratégie d'isolement, équilibrage
- Correction des systèmes asservis : correcteurs P, PI et à avance de phase
- Modélisation des systèmes asservis : structure, SLCI, transformée de Laplace, schéma-blocs
- Performances des systèmes asservis : stabilité, précision, rapidité
- Réponse fréquentielle et diagrammes de Bode

## Ouvrir l'essai gratuit

Scanne le code ou clique sur le bouton.

**prepahelp.com/#essai**

Une question sur le concours ou sur ta filière :
**écrire sur WhatsApp**

Les autres années et épreuves : prepahelp.com/annales/centrale/tsi