

## CI 2 – SLCI : ÉTUDE DU COMPORTEMENT DES SYSTÈMES LINÉAIRES CONTINUS INVARIANTS

### CHAPITRE 5 – ÉTUDE DES SYSTÈMES FONDAMENTAUX DU SECOND ORDRE

#### TRAVAIL DIRIGÉ – ÉTUDE D'UN LAMINOIR

*D'après ressources de Jean-Pierre Pupier.*

## 1 Introduction

### 1.1 Présentation de l'étude

Une tôle est une plaque rectangulaire. Sa longueur est de l'ordre d'une centaine de mètres, sa largeur du mètre et son épaisseur du millimètre. Elle est conditionnée enroulée sur elle-même autour d'un fourreau (cf. figure 1). L'écrasement entre deux cylindres animés de mouvements de rotation antagonistes (cf. figure 2) permet de réduire l'épaisseur de la tôle. Cette opération s'appelle le laminage et la machine qui la réalise un laminoir. C'est un des plus importants procédés de mise en forme des métaux. Les produits issus du laminage sont utilisés en automobile, en électroménager, en emballage alimentaire...

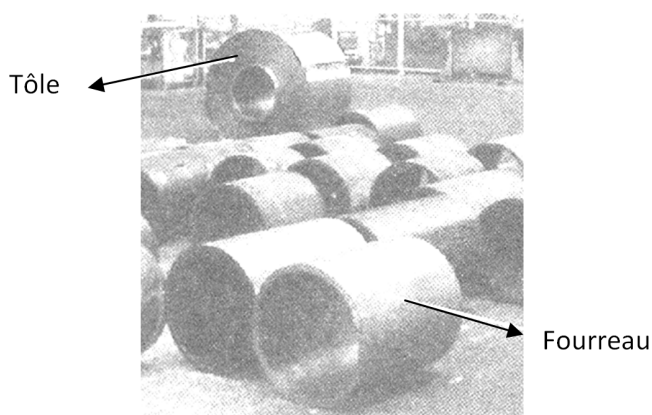


Figure 1 : Fourreaux et tôles conditionnées

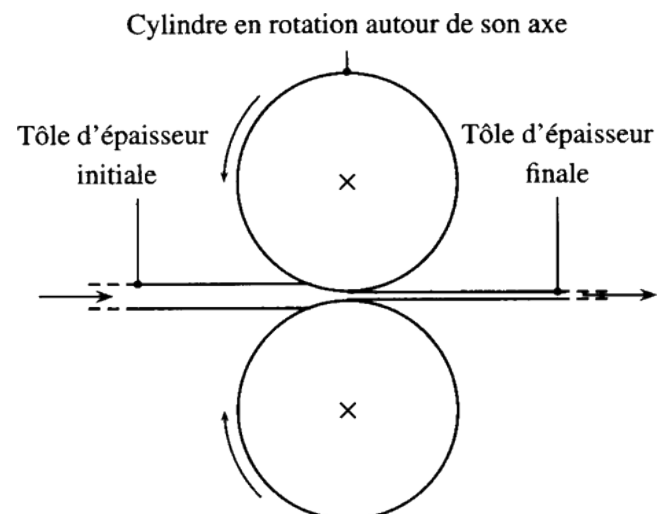


Figure 2 : Principe de base du laminage

## 1.2 Fonctionnement du laminoir Sendzimir

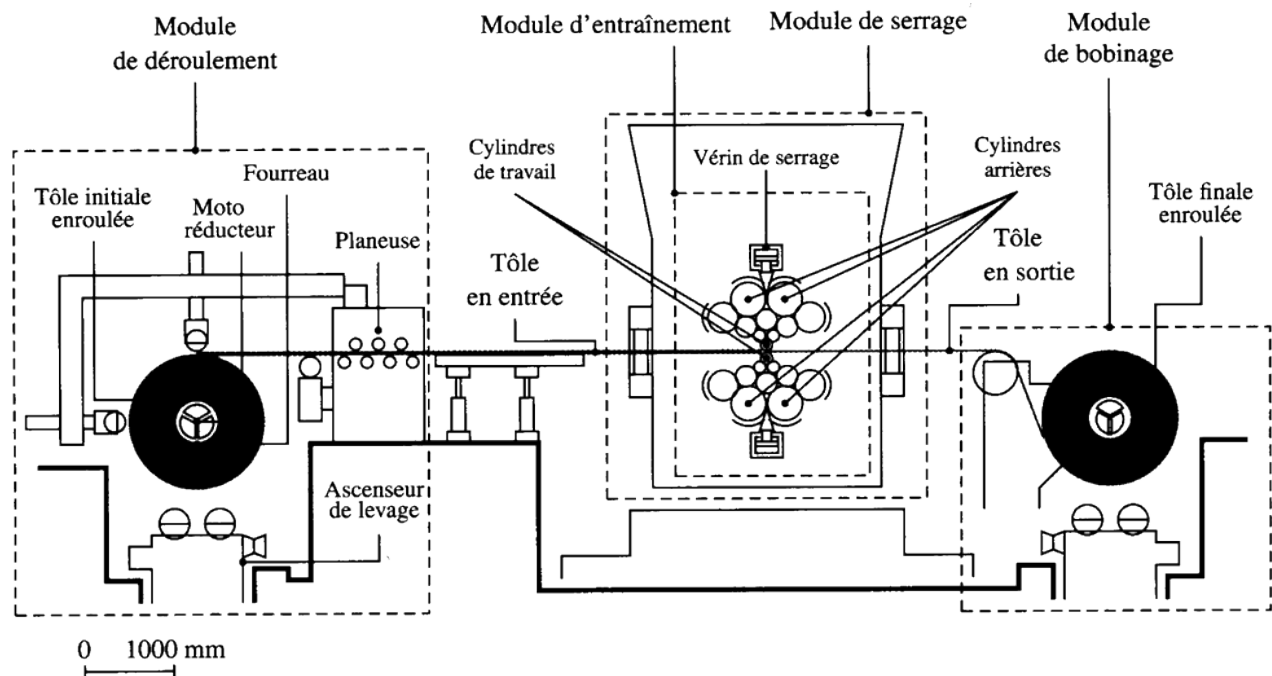


Figure 3 : Schéma d'un laminoir Sendzimir

Le laminoir de type Sendzimir (cf. figure 3) permet de laminier les tôles métalliques. Plusieurs passes successives sont réalisées pour écraser progressivement la tôle. Pour la première passe, ce laminoir met en œuvre quatre modules :

- le module de déroulement : il a pour fonction de dérouler la tôle d'épaisseur initiale. Il est constitué principalement d'un moto-réducteur qui entraîne en rotation le fourreau, asservi de manière à assurer un effort de tension constant dans la tôle en entrée du laminoir. Ce module comporte également une planeuse qui redresse la tôle pour la rendre plane et un ascenseur de levage qui permet de charger la tôle.
- le module d'entraînement de la tôle, appelé cage d'entraînement : il a pour fonction de faire avancer la tôle dans le laminoir. Il est constitué d'un mécanisme à plusieurs cylindres, entraînés en rotation par un moteur à courant continu, asservi en vitesse. Les cylindres de travail entraînent la tôle par adhérence.
- le module de serrage : il a pour fonction de contrôler l'écrasement de la tôle. Il est constitué de plusieurs vérins hydrauliques asservis en position, appuyant sur les cylindres arrières.
- le module de bobinage : il a pour fonction d'enrouler la tôle finale d'épaisseur réduite. Il est constitué d'un moto-réducteur, asservi de manière à assurer un effort de tension constant dans la tôle en sortie du laminoir.

## 2 Étude de la fonction «assurer l'entraînement de la tôle»

Pour assurer cette fonction il est nécessaire de réaliser le contrôle continu de la vitesse d'entraînement de la tôle dans le module d'entraînement du laminoir.

### 2.1 Performance attendues

Les performances attendues sont données par le tableau suivant.

Critères	Niveaux
Stabilité	marge de gain $M_g \geq 8dB$ marge de phase $M_\phi \geq 60^\circ$
Précision	erreur statique inférieure à 1% pour une entrée en échelon
Rapidité	temps de réponse à 5% de l'ordre de 0,6 s temps du premier maximum de l'ordre de 0,3 s
Amortissement	dépassement maximal $D = 10\%$
Régulation	insensibilité aux perturbations en régime permanent

### Question 1

Donner la définition d'un système stable. A quelle condition cela est-il vérifié ?

Correction

### Question 2

Donner la grandeur physique permettant de définir la rapidité d'un système. A l'aide d'une représentation graphique expliquer que la faculté d'un système à atteindre vite la grandeur physique souhaitée n'est pas forcément un gage de rapidité.

Correction

### Question 3

Donner la valeur de dépassement maximum qui ne pénalise pas le temps de réponse.

Correction

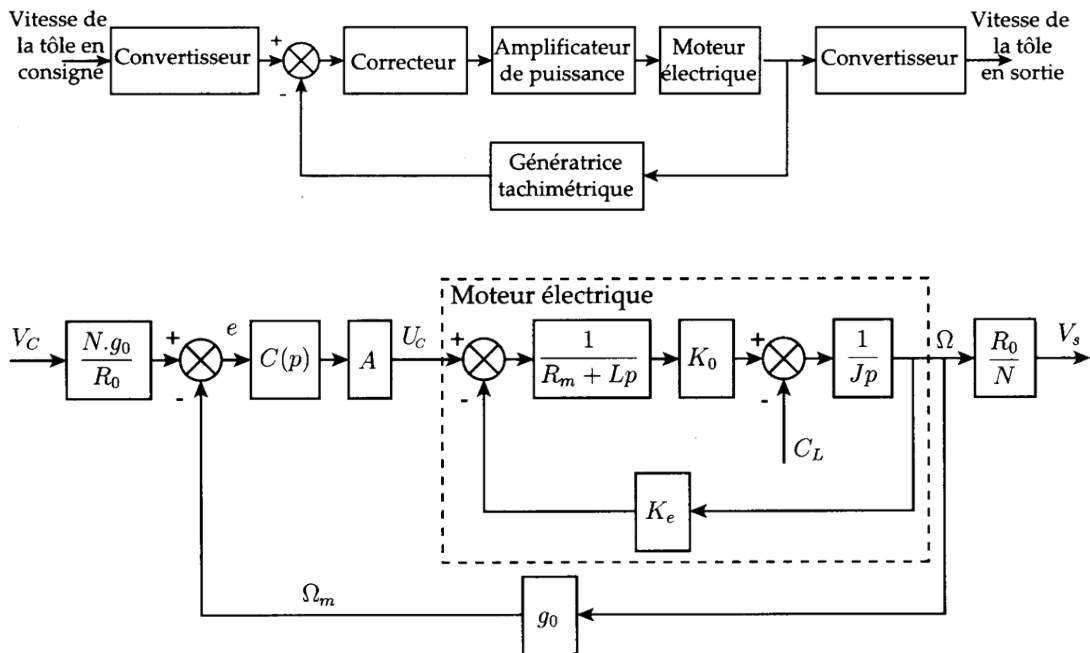
### Question 4

Expliquer la phrase «insensibilité aux perturbations en régime permanent».

Correction

## 2.2 Chaîne fonctionnelle sans correcteur

La chaîne fonctionnelle de l'asservissement en vitesse de l'entraînement de la tôle est schématisée par les schémas fonctionnels suivants. Le couple perturbateur  $C_L$  modélise l'action d'entraînement de la tôle.



Notation	Désignation	Valeur numérique
$\Omega$	vitesse angulaire du moteur	
$\Omega_m$	vitesse mesurée de la rotation du moteur	
$V_c$	vitesse consigne d'entraînement	
$V_s$	vitesse réelle d'entraînement	
$C_L$	couple de laminage	
$R_m$	résistance de l'induit du moteur	$7,5 \cdot 10^{-2} \Omega$
$L$	inductance de l'induit du moteur	$3 \times 10^{-3} \text{ H}$
$K_0$	constante du flux du moteur	$15 \text{ N.m/A}$
$K_e$	constante de force contre électromotrice du moteur	$15 \text{ V/rad/s}$
$A$	gain de l'amplificateur de puissance	200
$J_m$	inertie du moteur	$110 \text{ kg.m}^2$
$J_{ch}$	inertie de la charge	$70 \text{ kg.m}^2$
$J = J_m + J_{ch}$	inertie totale du système	$180 \text{ kg.m}^2$
$R_0$	rayon du cylindre de travail équivalent	$20 \times 10^{-3} \text{ m}$
$g_0$	gain de la génératrice tachymétrique	$0,1 \text{ V/rad/s}$
$N$	rapport de réduction	0,65

Pour le moment le système est sans correcteur c'est à dire que  $C(p) = 1$ .

On considère dans un premier temps que le couple de laminage  $C_L$  est nul.

### Question 5

Exprimer la fonction de transfert relative au moteur électrique  $H_{mot} = \frac{\Omega(p)}{U_C(p)}$  et la mettre sous la forme  $H_{mot} = \frac{K_{mot}}{a_1 p^2 + a_0 p + 1}$  en précisant clairement l'expression littérale de  $K_{mot}$ ,  $a_0$  et  $a_1$ .

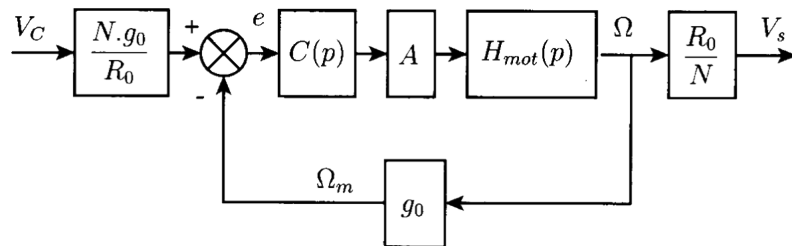
Correction

### Question 6

Calculer les valeurs numériques de  $K_{mot}$ ,  $a_0$  et  $a_1$ . Vous préciserez (évidemment) les unités.

Correction

La fonction de transfert du moteur étant connue, le schéma fonctionnel du système étudié se met alors sous la forme suivante.



### Question 7

Exprimez littéralement, en faisant intervenir  $K_{mot}$ ,  $a_0$  et  $a_1$  la fonction de transfert en boucle ouverte  $\frac{\Omega_m(p)}{e(p)}$ .

Correction

### Question 8

Calculer la fonction de transfert en boucle fermée  $\frac{V_s(p)}{V_C(p)}$ .

Correction

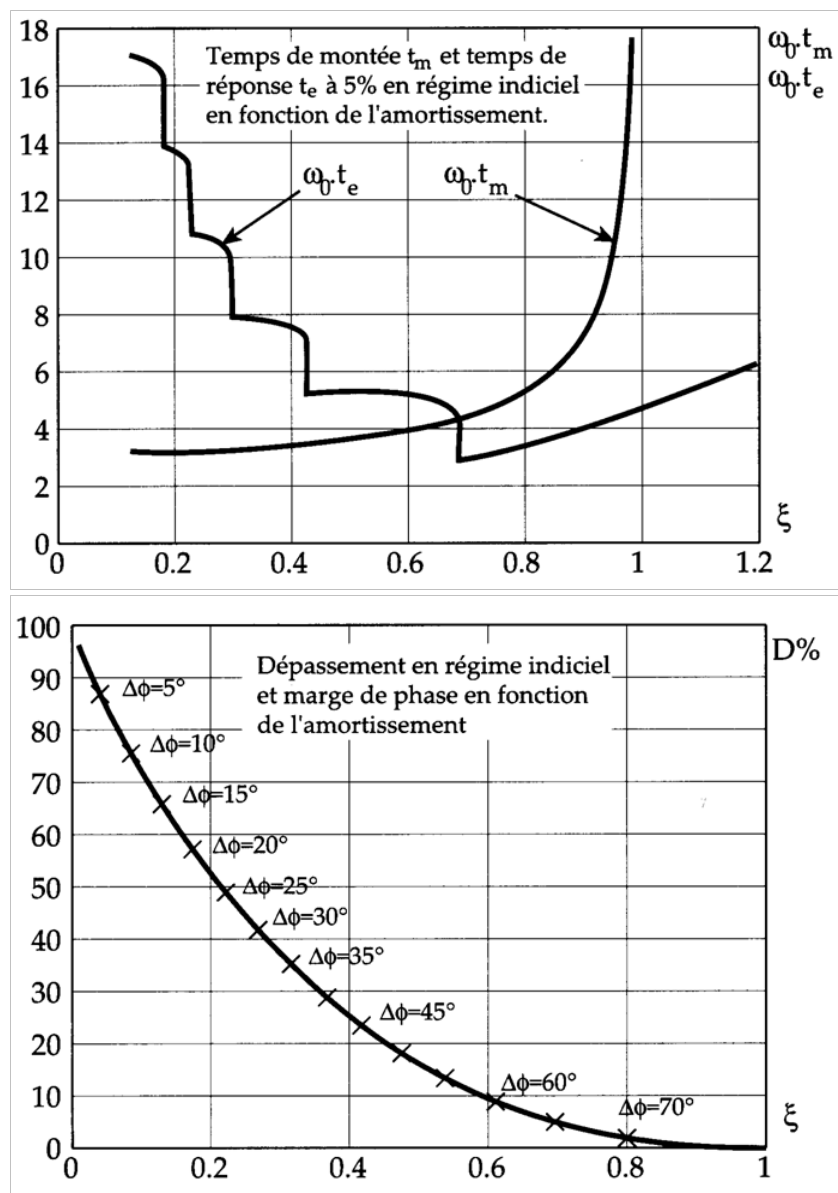
### Question 9

Calculer les caractéristiques numériques de la fonction de transfert en boucle fermée :

- gain statique  $K_{stat}$  ;
- pulsation naturelle ou pulsation propre  $\omega_0$  ;
- amortissement  $\xi$ .

Correction

Les abaques donnés ci-dessous correspondent à un système du second ordre décrit par sa fonction de transfert en boucle fermée  $F(p) = \frac{\omega_0^2}{p^2 + 2\xi\omega_0 p + \omega_0^2}$ .



### Question 10

A partir des abaques déterminer le premier dépassement en % et le temps de réponse  $t_e$  à 5% à un échelon de consigne

Correction

### Question 11

Le temps du premier dépassement obtenu par les abaques est-il en cohérence avec la formule du cours :  $T_m = \frac{\pi}{\omega_0 \sqrt{1-\xi^2}}$  ?

Correction

### Question 12

Conclure quant à la pertinence d'un bouclage sans correction. Deux points sont à analyser : rapidité et amortissement.

Correction

## 2.3 Chaîne fonctionnelle avec correcteur proportionnel.

Le correcteur a maintenant pour fonction de transfert  $C(p) = K_C$ .

### Question 13

Calculer la fonction de transfert en boucle ouverte  $\frac{\Omega_m(p)}{e(p)}$  et en déduire la fonction de transfert en boucle fermée  $\frac{V_S(p)}{V_C(p)}$ .

Correction

### Question 14

Exprimer la valeur du gain  $K_C$ , notée  $K_{C0}$ , pour que le système en boucle fermée présente un dépassement de  $D = 10\%$ . Calculer cette valeur. Faire l'application numérique.

Correction