Les laminoirs des produits plats

Présentation de l'étude

L'objet de cette étude est l'analyse partielle de solutions retenues pour la réalisation d'un laminoir de tôles mécaniques de type Sendzimir.

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...

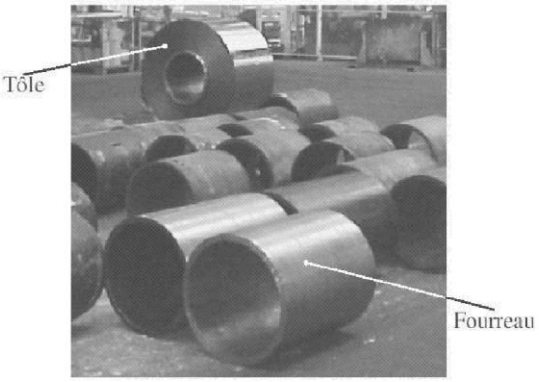


Figure 1: Fourreaux et tôle conditionnée.

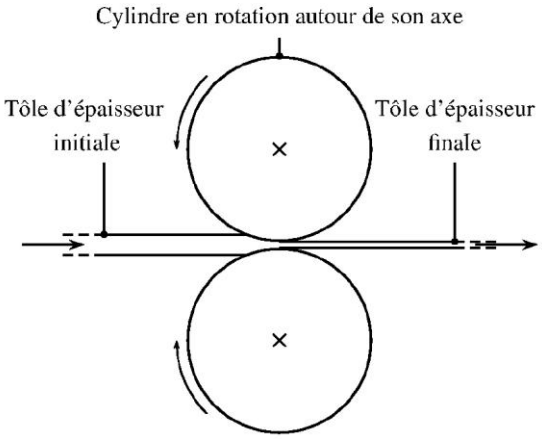


Figure 2: Principe de base du laminage.

Etude de la fonction : Assurer l'entraînement de la tôle.

Les performances attendues de l'asservissement de la vitesse d'entraînement de la tôle sont données par le tableau 1.

Critères	Niveaux
Stabilité	marge de gain $Mg \geq 8dB$ marge de phase $M_\phi \geq 60°$
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

TAB. 1 : Performances attendues de l'asservissement de la vitesse d'entraînement de la tôle.

La chaîne fonctionnelle de l'asservissement en vitesse de l'entraînement de la tôle est schématisé sur la figure 5. La modélisation retenue pour les différents composants de cette chaîne fonctionnelle est donnée par la figure 6. Le couple perturbateur C_L modélise l'action d'entraînement de la tôle.

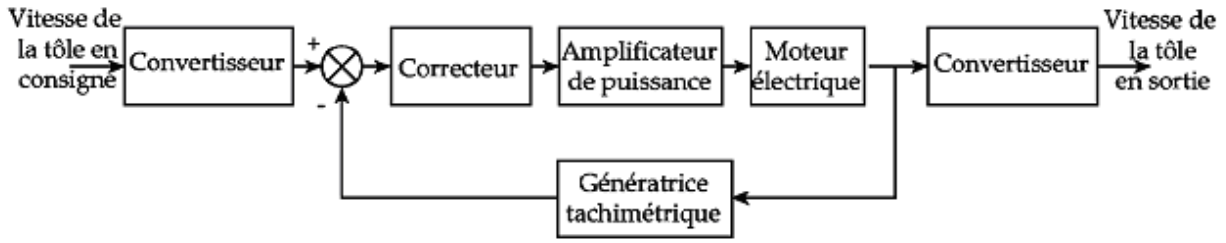


Figure 5 : Chaîne fonctionnelle.

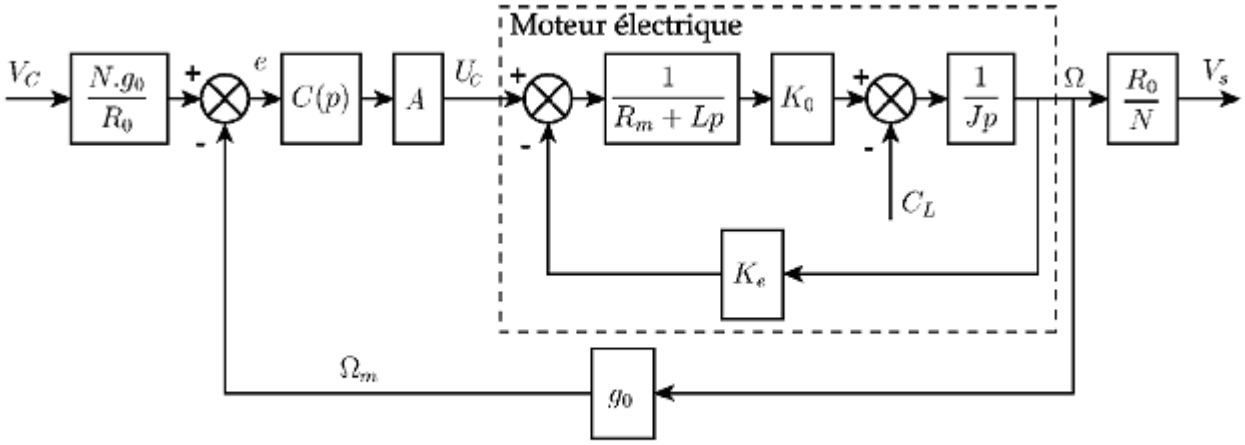


Figure 6 : Modélisation de la chaîne fonctionnelle.

Notation	Désignation	Valeur numérique
Ω	vitesse angulaire du moteur	
Ω_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	$7,5.10^{-2}\ \Omega$
L	inductance de l'induit du moteur	3×10^{-3} H
K_0	constante du flux du moteur	15 N.m/A
K_e	constante de force contre électromotrice du moteur	15 V/rad/s
A	gain de l'amplificateur de puissance	200
J_m	inertie du moteur	110 $kg.m^2$
J_{ch}	inertie de la charge	70 $kg.m^2$
$J = J_m + J_{ch}$	inertie totale du système	180 $kg.m^2$
R_0	rayon du cylindre de travail équivalent	20×10^{-3} m
g_0	gain de la génératrice tachymétrique	0,1 V/rad/s
N	rapport de réduction	0,65

TAB. 2 : Paramétrages et notations

Question 1 Préciser les unités des variables Ω, Ω_m, V_c , V_s et C_L

Remarque importante : Le couple de laminage C_L sera considéré **nul** dans un premier temps.

Question 2 Exprimer littéralement la fonction de transfert relative au moteur électrique $H_{mot}(p)=\dfrac{\Omega(p)}{U_c(p)}$ et la mettre sous la forme $H_{mot}(p)=\dfrac{K_{mot}}{a_1p^2+a_0p+1}$. Calculer les valeurs numériques de K_{mot}, a_0 et a_1 (préciser les unités).

Le moteur est représenté par sa fonction de transfert, et le schéma fonctionnel se met sous la forme donnée par la figure 7.

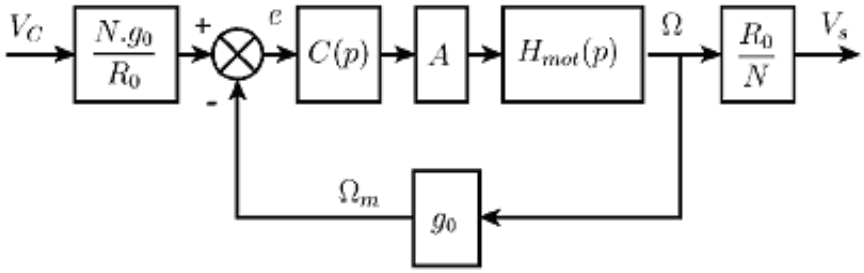
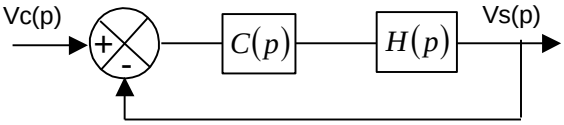


Figure 7 : Schéma fonctionnel réduit du système entraînant la tôle.

Question 3 Exprimer littéralement la fonction de transfert en boucle fermée $\dfrac{V_S(p)}{V_c(p)}$ en fonction de g_0, A, C(p) et $H_{mot}(p)$.

Pour la suite du problème, nous utiliserons le schéma ci-dessous



avec $H(p)=\dfrac{1{,}33}{1+6.10^{-2}.p+2{,}4.10^{-3}.p^2}$

Système sans correcteur : $C(p)=1$

Question 4 calculer les coefficients caractéristiques de la fonction de transfert en boucle fermée (gain statique K_{stat}, pulsation propre ω_0 et coefficient d'amortissement ξ) .

Question 5 A l'aide des abaques donnés en **annexe 1 et 2** ou par calcul, déterminer les caractéristiques de la réponse du système à un échelon de consigne d'amplitude V_0 :

- la valeur atteinte en régime permanente
- erreur statique
- instant et valeur du 1ier dépassement de la valeur finale
- temps de réponse à 5%,

Question 6 Conclure quant à la pertinence d'un bouclage sans correction.

Système avec correcteur proportionnel : $C(p) = K_C$.

Question 7 Déterminer les nouvelles caractéristiques de la fonction de transfert en boucle fermée (gain statique K'_{stat}, pulsation propre ω'_0 et coefficient d'amortissement ξ') en fonction de K_c .

Question 8 Calculer la valeur minimale du gain K_C, notée K_{C0}, pour que le système en boucle fermée respecte le critère de précision défini dans le cahier des charges.

Question 9 Calculer la valeur maximale du gain K_C, notée K_{C1}, pour que le système en boucle fermée respecte le critère d'amortissement défini dans le cahier des charges.

Question 10 La réponse fréquentielle (dans le plan de Bode) relative à l'étude de stabilité est donnée sur le **document réponse** pour Kc=1. Déterminer graphiquement (avec justifications sur feuille de copie) la valeur maximale de K_C ,notée K_{C2}, pour que le système en boucle fermée respecte le critère de stabilité défini dans le cahier des charges.

Question 11 Si le couple perturbateur C_L n'est pas nul, justifier succinctement le fait que le critère de régulation ne peut pas être respecté avec le correcteur proportionnel ?

Question 12 Conclure quant aux performances d'une correction proportionnelle pour le respect des critères définis dans le cahier des charges.

Système avec correcteur proportionnel-intégral : $C(p) = K_i\left(1+\frac{1}{T_i.p}\right)$.

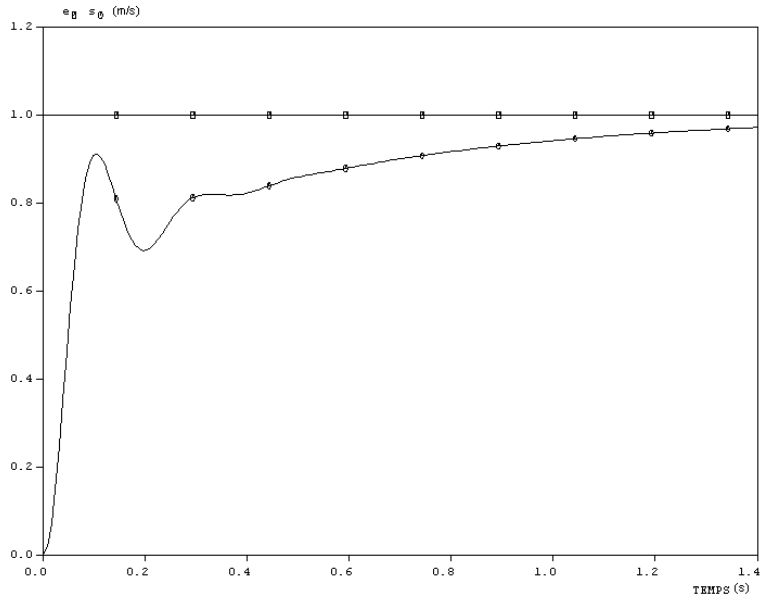
Question 13 Quel est l'intérêt de ce type de correction.

Question 14 Calculer les coefficients K_i et T_i permettant d'assurer les marges de stabilité exigées par le cahier des charges.

Question 15 Tracer alors sur le document réponse :

- en **bleu** la réponse fréquentielle du correcteur seul en précisant les valeurs caractéristiques,
- en **rouge** l'allure de la réponse fréquentielle du système corrigé.

La réponse du système à une entrée échelon unitaire a été calculée et la représentation graphique est proposée figure suivante :



Question 16 Par lecture sur cette courbe, déterminer le dépassement maximal et le temps de réponse à 5%. Conclure quant aux performances d'une correction proportionnelle-intégrale pour le respect des critères définis dans le cahier des charges

Etude de la fonction : Ecraser la tôle.

Les principales caractéristiques attendues de cette fonction sont données dans le tableau 3.

	Fonction technique	Critères	Niveaux
FT2	Écraser la tôle	Épaisseur finale	$e_2 = 1,00 \pm 0,01mm$
		Épaisseur initiale	$e_1 = 1,40 \pm 0,01mm$

TAB. 3 : Caractéristiques de la fonction FT2.

Les niveaux d'exigence ont nécessité d'implanter un asservissement de l'épaisseur finale. La distance entre les cylindres de travail, appelée entrefer S, est contrôlée par un vérin hydraulique associé à une transmission mécanique.

La boucle d'asservissement est illustrée sur la figure 8 et un schéma fonctionnel en est donné figure 9.

Remarque : e_2 et S sont considérés comme identiques.

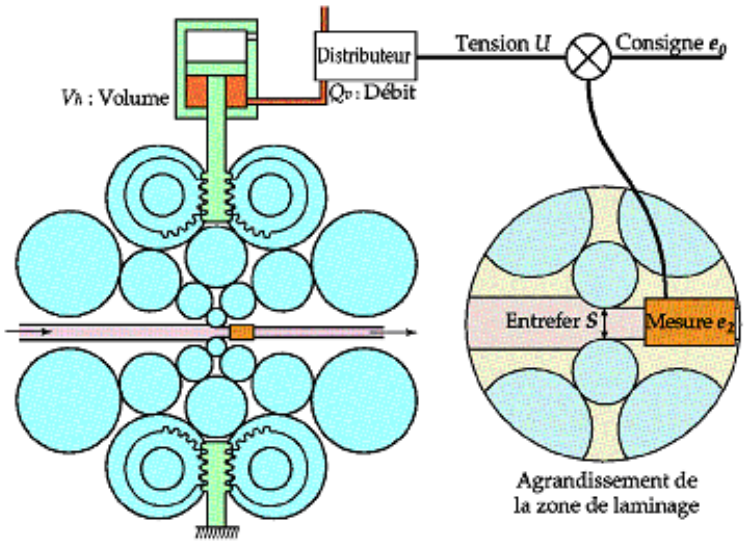


Figure 8 : Schéma de la boucle d'asservissement de l'épaisseur finale e_2.

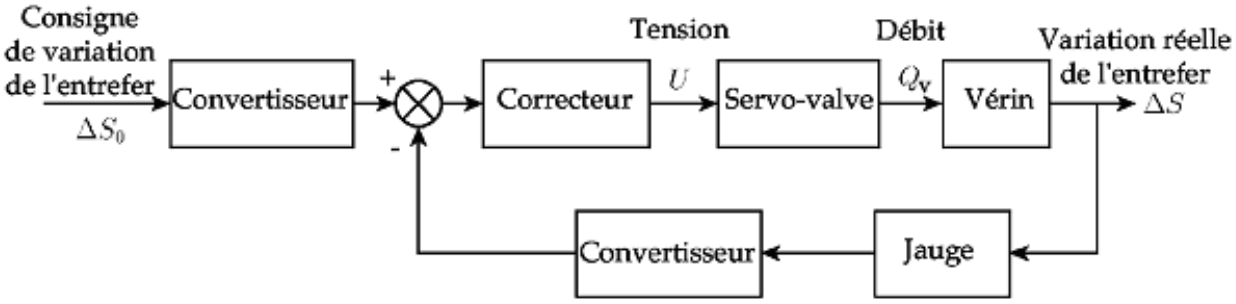


Figure 9 : Modèle fonctionnel du système d'asservissement de l'épaisseur finale e_2.

L'objectif de cette partie est de modéliser le fonctionnement de l'asservissement de l'entrefer en boucle fermée, à partir de données expérimentales.

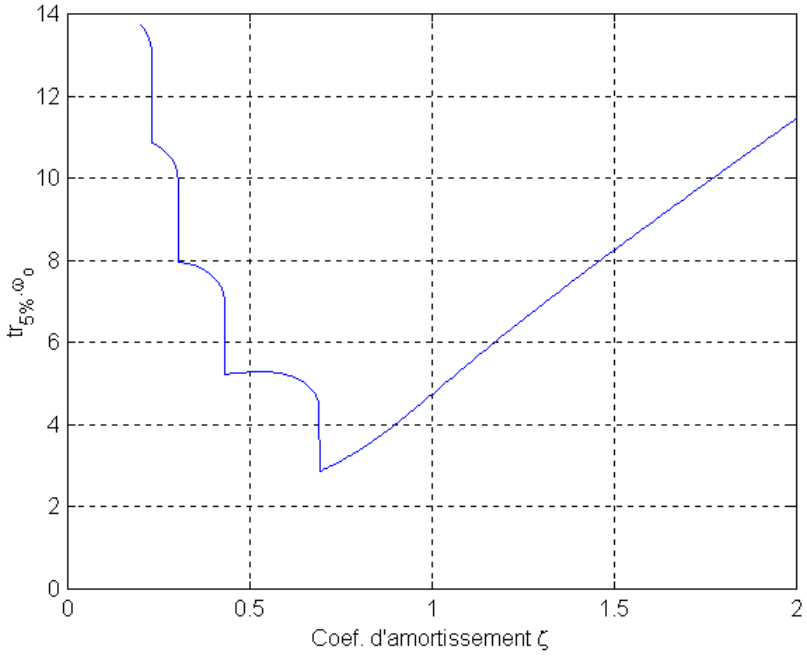
Dans un premier temps, une modélisation de la fonction de transfert de ce système est recherchée en se basant sur sa réponse indicielle. Puis la validité de ce modèle est vérifiée en comparant sa réponse fréquentielle avec celle du système réel. Pour cette partie, on peut, utiliser les abaques donnés en **annexes 1 et 2**.

Question 17 A partir de la réponse indicielle donnée en **annexe 3**, proposer un modèle pour la fonction de transfert $G_{ser}(p) = \dfrac{\Delta S(p)}{\Delta S_0(p)}$. Identifier les coefficients caractéristiques de ce modèle, noté « modèle 1 ».

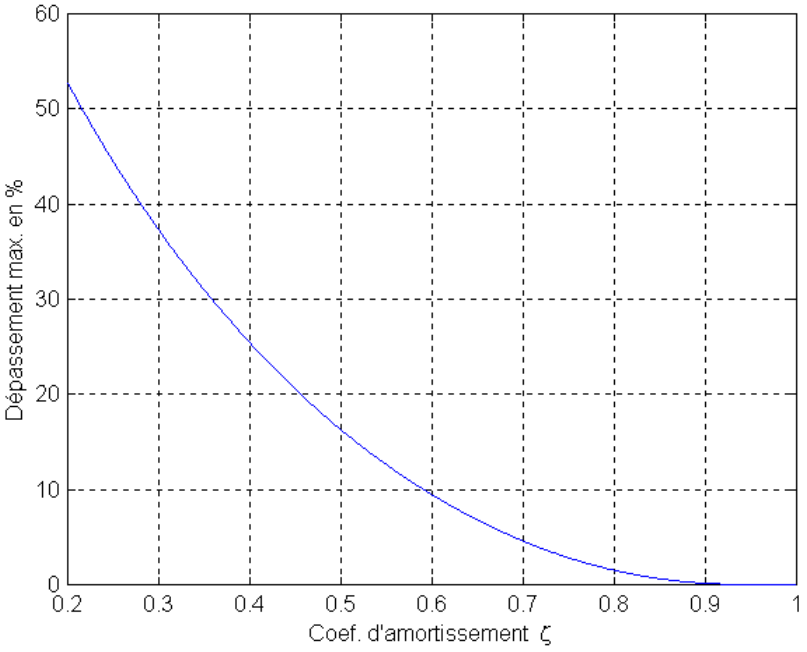
Question 18 La réponse fréquentielle du système réel est donnée en **annexe 4**. Proposer un modèle, noté « modèle 2 »plus pertinent.

Question 19 En comparant les réponses fréquentielles des modèles 1 et 2, justifier la pertinence du modèle 1 pour caractériser l'asservissement de l'entrefer.

Pour un système du second ordre sous la forme canonique $\frac{K}{1+2\zeta\frac{p}{\omega_o}+\frac{p^2}{\omega_o^2}}$, on trace :

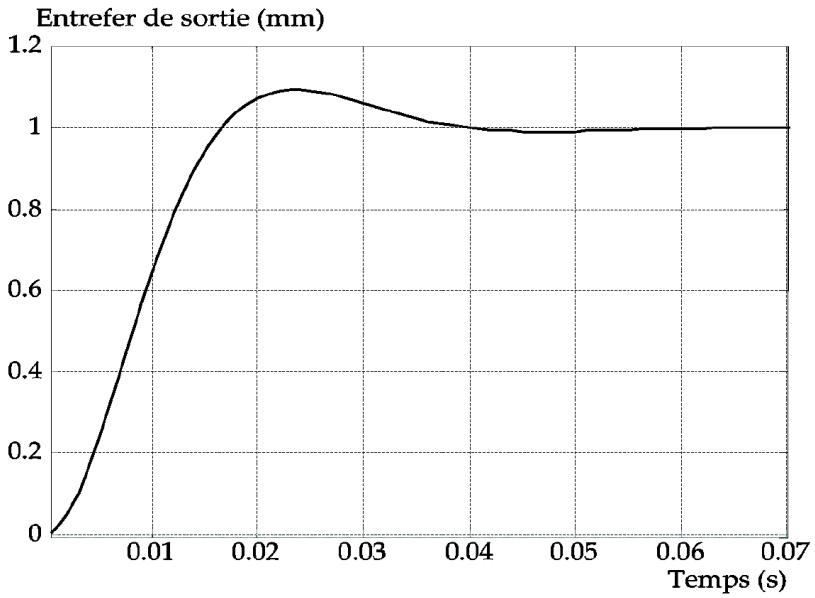


Annexe 1 : Evolution de [$tr_{5\%}.\omega_o$] en fonction de ζ

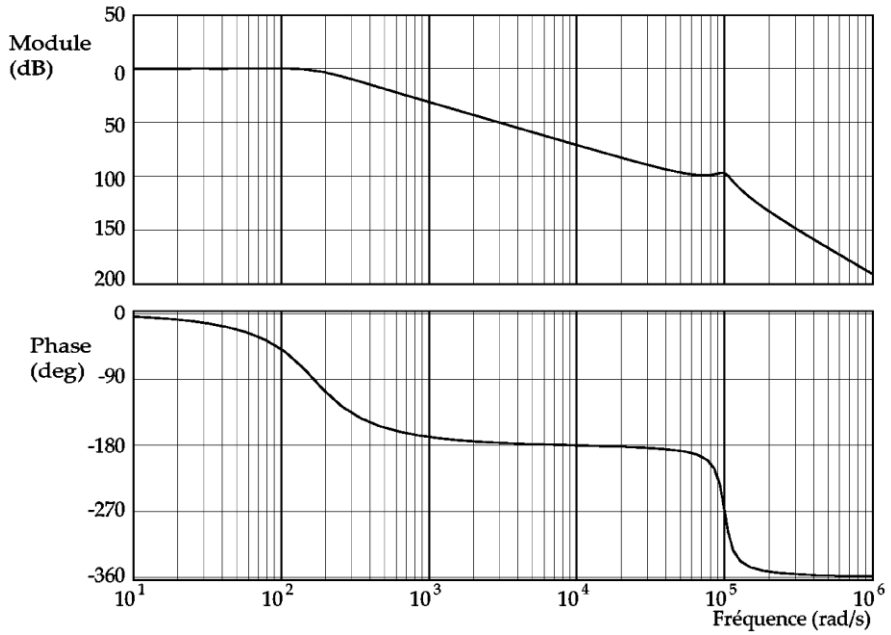


Annexe 2 : Evolution du dépassement max. en fonction de ζ

Remarque : on peut également calculer l'amplitude des dépassements (valeur relative) avec la formule : $D_k = e^{-\frac{k.\pi.\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}}$ ou k représente l'indice du dépassement.



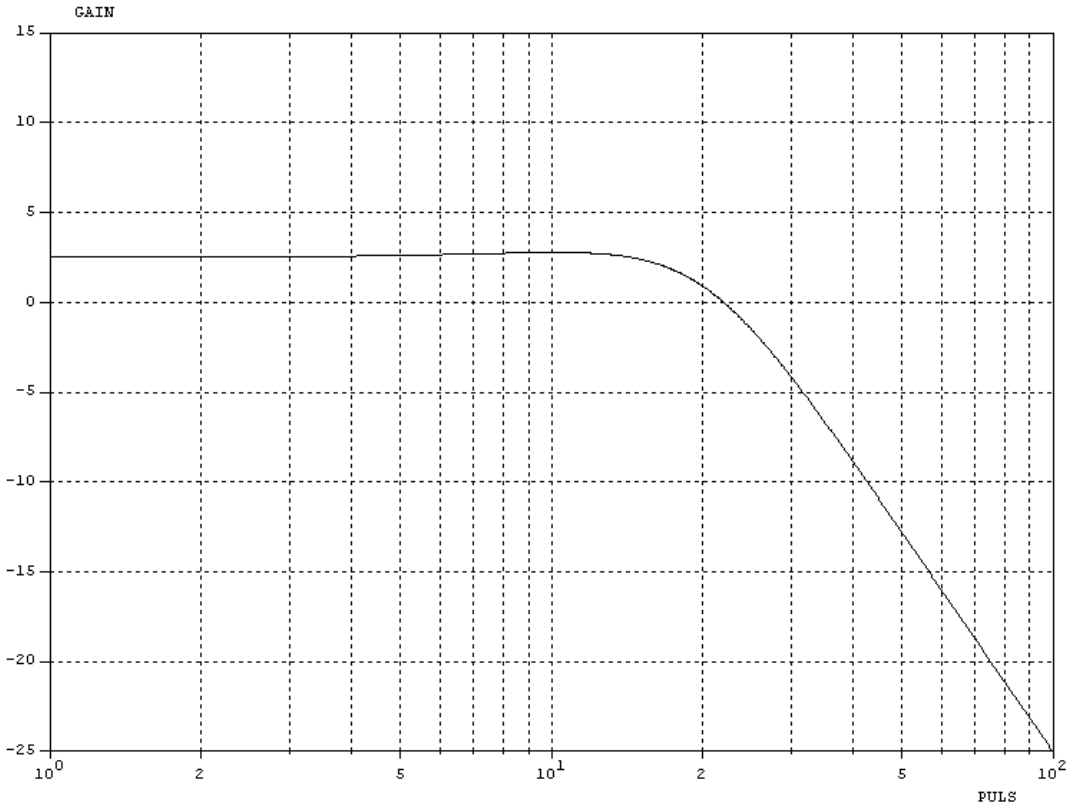
Annexe 3: Réponse indicielle du système assurant l'asservissement de l'entrefer (en boucle fermée).

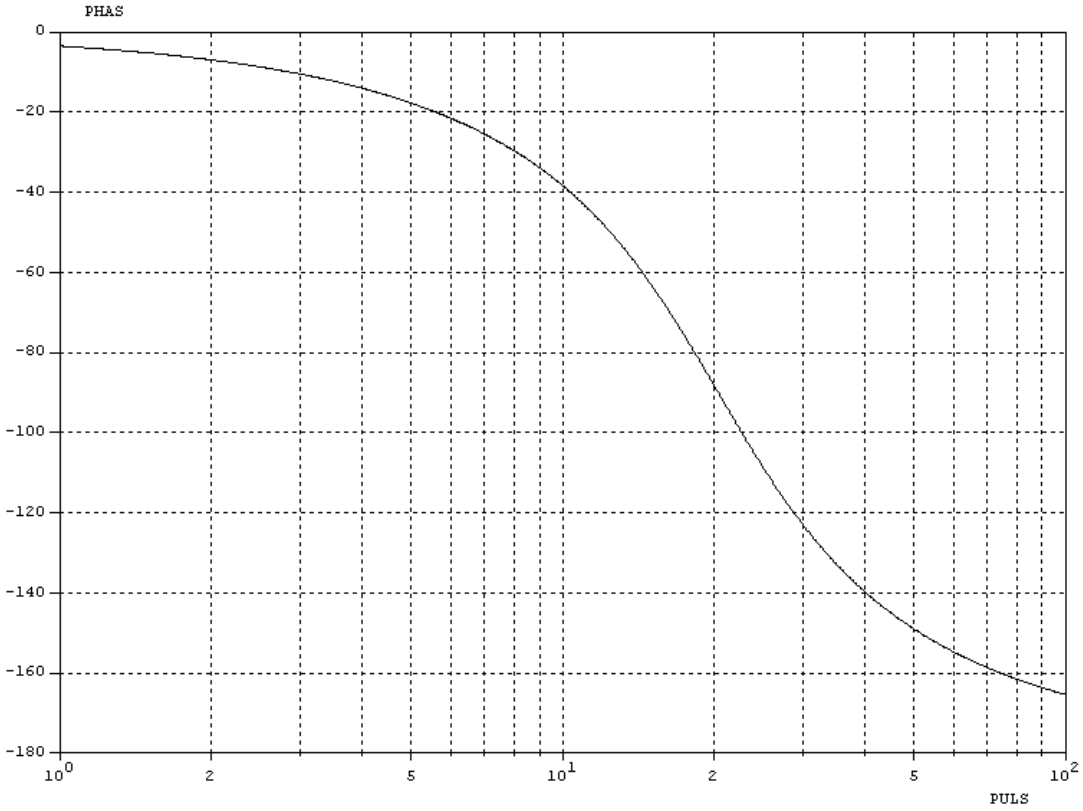


Annexe 4: Réponse fréquentielle du système assurant l'asservissement de l'entrefer (en boucle fermée).

Document réponse

Nom : Prénom : Classe :





Réponse fréquentielle en boucle ouverte du système non corrigé