

# FUSÉE ARIANE 5

Objectif

— Faire le point sur les SLCI;

## Présentation

Suite à l'échec du tout premier vol du lanceur Ariane 5, deux vols de qualification ont été réalisés avec succès les 30 octobre 1997 et 21 octobre 1998. Ceux-ci ont permis de faire quelques modifications et le premier vol commercial a ensuite eu lieu le 10 décembre 1999. Depuis cette date, de nombreux lancements ont été réalisés avec un taux de succès qui place cette fusée parmi les plus compétitives actuellement.

Avec une technologie à corps central à deux étages et deux propulseurs latéraux, Ariane 5 a marqué une évolution notable dans la famille des lanceurs européens. Ce choix permet d'obtenir une grande source de puissance au décollage et une meilleure gestion de la position et de la répartition des masses. En revanche, il induit des problèmes de couplage importants qui nécessitent une orientation de l'axe des tuyères situées en extrémité du corps central et des deux propulseurs latéraux.

La fusée Ariane 5 est globalement composée d'un corps central CC à deux étages et deux propulseurs latéraux PG et PD (voir figure 1) :

- Le 1er étage, commun à tous les types de lancement, est appelé EPC comme Étage Principal Cryogénique, car il transporte de l'oxygène et de l'hydrogène liquides refroidis à des très basses températures. Ces fluides permettent d'alimenter le moteur cryogénique Vulcain situé en extrémité basse de cet étage. La tuyère Centrale TC de ce moteur est orientable grâce à des servo vérins.
- La configuration du 2ème étage, appelé EPS comme Étage Propulsif tockable, peut varier selon la mission. Il contient souvent un satellite.
- De chaque côté du corps central CC à deux étages sont fixés les propulseurs PG et PD ou EAP comme Étages Accélérateurs à Poudre. Les tuyères TG et TD placées respectivement aux extrémités de ces deux EAP sont aussi orientables selon deux directions orthogonales. Allumés peu après le décollage, les deux EAP fonctionnent à pleine puissance pendant une durée de 130 secondes puis, lorsque leurs réservoirs sont vides, ils se détachent du corps central CC et retombent dans la mer où leurs carcasses sont ensuite récupérées. Les EAP permettent de vaincre les actions de pesanteur. Lors d'un décollage et d'un vol de la fusée Ariane 5, de très nombreuses contraintes définies par un cahier des charges doivent être respectées. Toutes, bien évidemment, ne seront pas étudiées dans ce sujet, mais nous nous intéresserons au dispositif d'orientation de la fusée nécessaire à la poursuite de trajectoires imposées, et à la limitation de certaines fréquences de résonance pour limiter les couplages vibratoires.

Pour cela, nous ferons respectivement dans chacune des trois parties de ce sujet :

- la mise en évidence du risque de résonance à basse fréquence du système d'orientation d'une tuyère, réalisé avec deux servo-vérins hydrauliques, et à l'analyse de la solution retenue pour limiter l'amplitude de la résonance,
- l'identification d'un modèle de comportement et la comparaison du résultat obtenu à partir du modèle de comportement et celui obtenu à partir du modèle de connaissance.

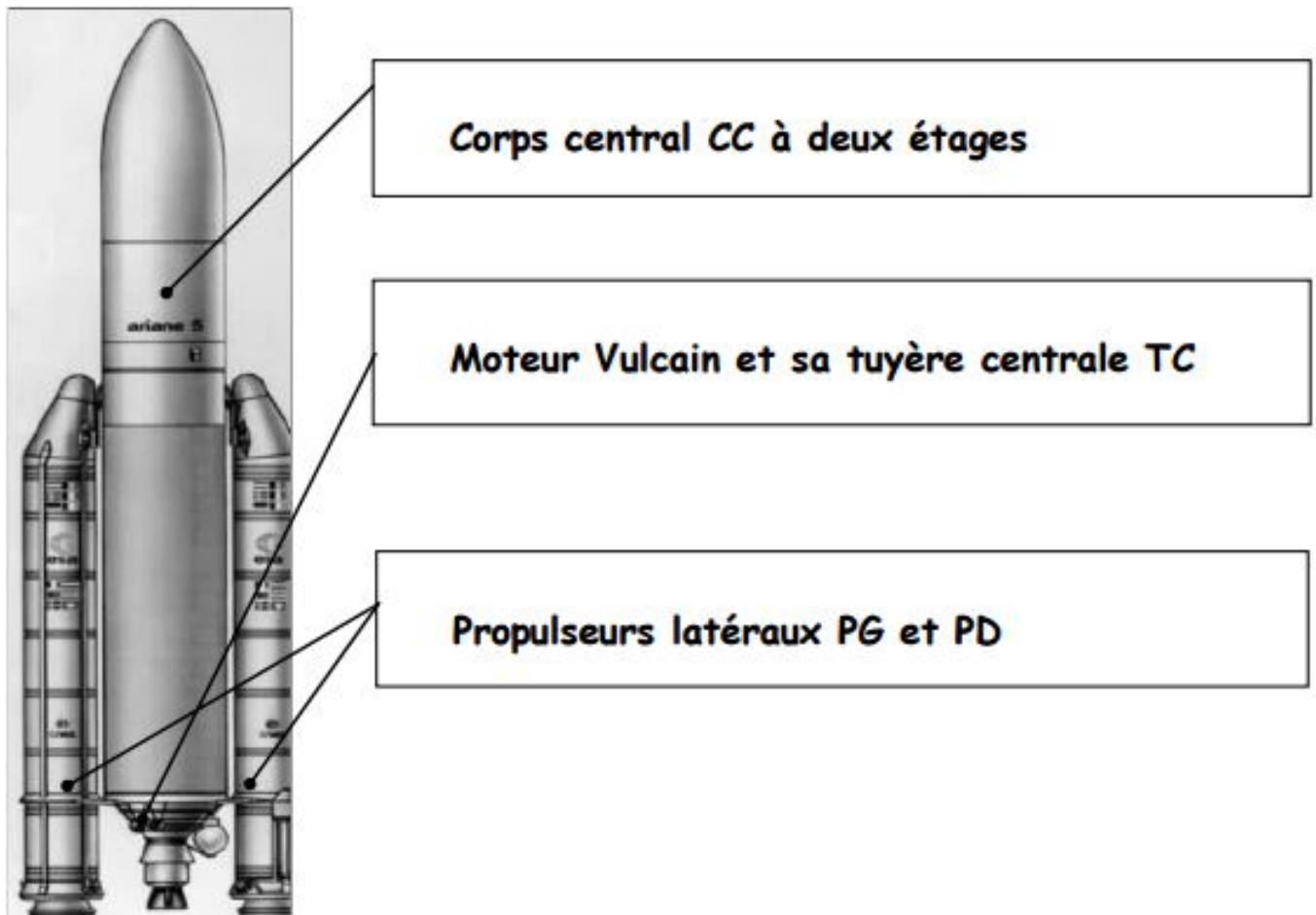


FIGURE 1 – Fusée Ariane 5

Pour diriger la fusée on doit orienter la force propulsive. La solution retenue consiste à orienter les tuyères plutôt qu'à dévier les jets des moteurs.

Pour orienter une tuyère, deux vérins hydrauliques ont été choisis pour délivrer la puissance élevée nécessaire. Ce système hydraulique convertit la pression interne en énergie mécanique d'orientation des tuyères.

Comme il faut contrôler constamment le braquage des deux vérins asservis en position, deux servo-vérins hydrauliques ont donc été adoptés (voir figure 2. qui représente les deux servo-vérins qui s'appliquent sur la tuyère centrale TC).

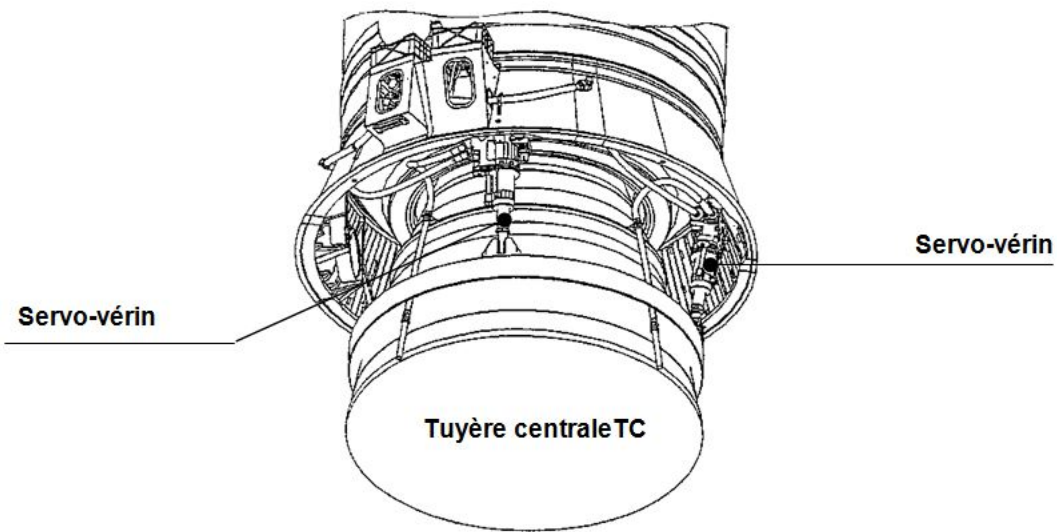


FIGURE 2 – tuyère centrale TC et les deux servo-vérins

### Étude du servo-vérin à partir d'un modèle de connaissance

Pour cette étude le modèle simplifié de comportement utilisé pour un servo-vérin déplaçant une charge de masse  $M$  est représenté sur la figure 3.

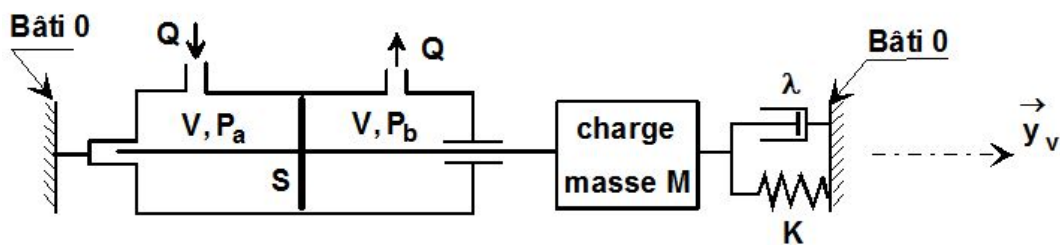


FIGURE 3 – Modèle d'un servo-verin

Les caractéristiques du servo-vérin et du fluide utilisé sont :  $S$  la surface utile du vérin et  $B$  le module de compressibilité du fluide.

Soit  $y(t)$  la variation de déplacement de la charge par rapport à la position d'équilibre obtenue en l'absence de pression. La variation  $y(t)$  étant petite, on peut faire les hypothèses suivantes :

- les volumes des deux chambres du vérin sont identiques et égaux à  $V$  ;
- les débits entrant et sortant sont identiques et égaux à  $Q$ .

La charge de masse  $M$  est liée au bâti par un ressort de raideur  $K$  et un amortisseur de coefficient  $\lambda$ .

L'étude hydraulique du servo-vérin et notamment l'étude des débits de compressibilités et de déformations nous permet d'écrire :  $Q(t) = S \frac{dy(t)}{dt} + \frac{V}{2B} \frac{dP(t)}{dt}$  avec  $P(t) = P_a(t) - P_b(t)$ .

L'étude mécanique de la charge nous permet d'écrire :  $M \frac{d^2y(t)}{dt^2} = P(t)S - Ky(t) - \lambda \frac{dy(t)}{dt}$ .

Le débit  $Q$  est commandé par un servo-distributeur (association d'une servo-valve et d'un distributeur), non

représenté ici et de fonction de transfert :  $K_s$ . La représentation sous forme de schéma-bloc du servo-vérin asservi en position est donnée sur la figure 4 avec  $K_b = 1$  :

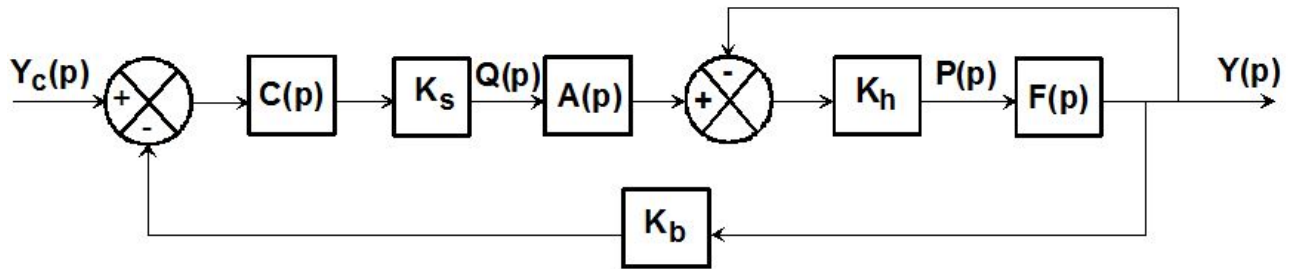


FIGURE 4 – Schéma bloc du servo-vérin

Dans ce schéma bloc,  $Y_c(p)$  est la transformée de Laplace de la consigne de position  $y_c(t)$  du servo-vérin.

**Etude sans correction :**  $C(p) = 1$

**Q1.** Déterminer les fonctions de transfert  $A(p)$ ,  $F(p)$  et le gain  $K_h$ .

**Q2.** Mettre le schéma bloc sous la forme illustrée par la figure 5

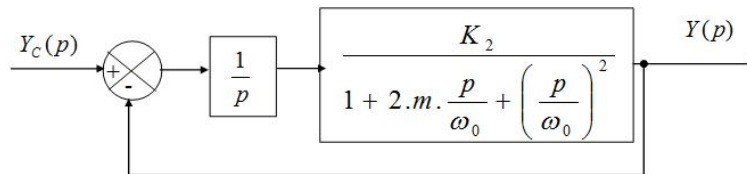


FIGURE 5 – Schéma bloc simplifié du servo-vérin

- donner l'expression de  $K_2$  en fonction de  $K_h, K_s, K, S$
- donner l'expression de  $m$  en fonction de  $K_h, M, S, K, \lambda$
- donner l'expression de  $\omega_0$  en fonction de  $K_h, M, S, K$

**Q3.** Donner l'expression de la FTBO en fonction de  $K_h, K_s, M, S, K, \lambda$ .

**Q4.** Donner l'allure du tracé asymptotique de la FTBO (justifier succinctement la réponse).

**Q5.** Donner l'expression de la FTBF en fonction de  $K_h, K_s, M, S, K, \lambda$ .

**Q6.** Donner l'ordre de la FTBF. Quel est le gain statique.

**Q7.** Sur les annexes 1 et 2 sont tracés différents diagrammes du servo-vérin asservi en position (tracé de la FTBF) :

- Diagramme de Bode en gain de la fonction de transfert en boucle fermée.
- Réponse indicielle (entrée unitaire) de la fonction de transfert en boucle fermée.

À partir de ces diagrammes et sachant la fonction de transfert en boucle fermée est de la forme :  $FTBF(p) = \frac{G}{D(p)}$  avec  $G$  qui est un gain pur, et  $D(p)$  tel que  $\lim_{p \rightarrow 0} D(p) = 1$  retrouver la valeur du gain statique de la question précédente. Justifier votre réponse.

**Q8.** Déterminer la fréquence et l'amplitude de résonance de l'ensemble servovérin. Le cahier des charges définit que l'amplitude des résonances de la tuyère centrale TC du moteur Vulcain doivent rester inférieures à 3db. Conclure sur le respect du cahier des charges vis à vis de ce critère.

**Q9.** Le cahier des charges du servo-vérin définit un temps de réponse à 5% = 0,15 s. Donner le temps de réponse à 5% et conclure sur le respect du cahier des charges vis à vis de ce critère.

**Q10.** Le cahier des charges du servo-vérin définit un écart nul en régime permanent en réponse à un échelon de position. Calculer cet écart et conclure sur le respect du cahier des charges vis à vis de ce critère.

**Etude avec correction**

Le système est corrigé par un dispositif appelé filtre réjecteur. La pulsation propre du filtre réjecteur a été calée sur la pulsation de résonance  $\omega_R$  du système non corrigé.

La fonction de transfert du correcteur est  $C(p) = \frac{p^2 + 2z_1\omega_R p + \omega_R^2}{p^2 + 2z_2\omega_R p + \omega_R^2}$ .  $z_1$  et  $z_2$  sont des coefficients d'amortissement positifs et inférieurs à  $\frac{\sqrt{2}}{2}$  et  $z_1 < z_2$ .

**Q11.** Donner l'allure du diagramme de Bode réel, en gain, du correcteur. Justifier le tracé.

Sur les annexes 3 et 4 sont tracés différents diagrammes du système corrigé :

- Diagramme de Bode en gain de la fonction de transfert en boucle fermée du système corrigé.
- Réponse indicielle (entrée unitaire) de la fonction de transfert en boucle fermée du système corrigé.

**Q12.** Conclure quant au respect des critères du cahier des charges (temps de réponse, écart statique, résonance). Préciser l'apport du correcteur.

**Étude du servo-vérin à partir d'un modèle de comportement**

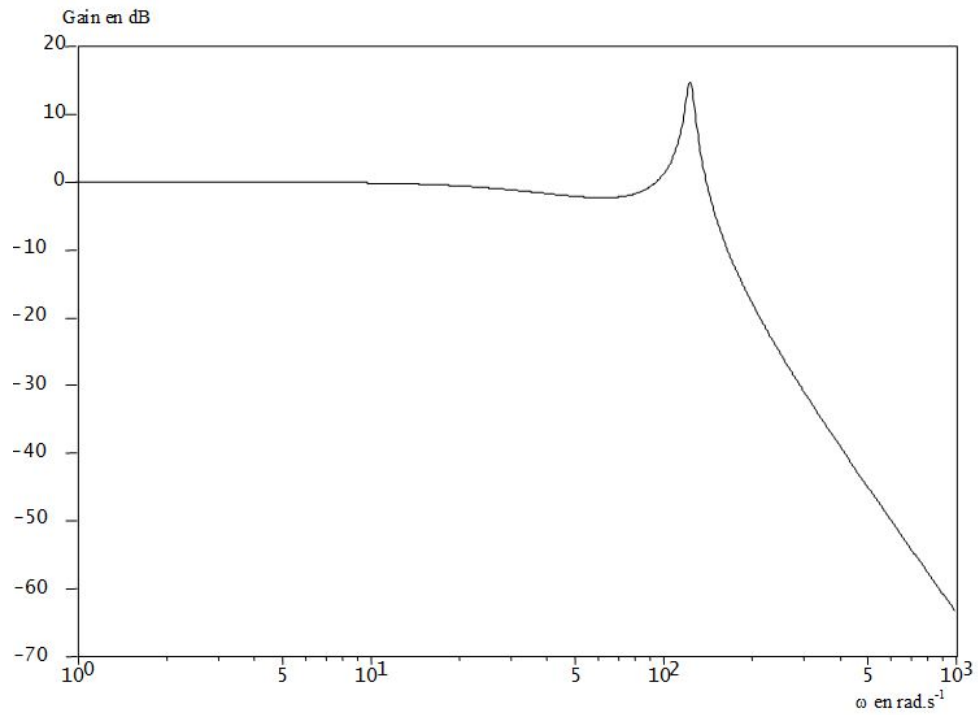
Le modèle de comportement est une traduction sous forme mathématique du comportement du système lors d'essais. Ce modèle permet de s'affranchir de la connaissance des phénomènes physiques à l'intérieur du système.

**Q13.** A partir de la réponse indicielle (annexe 4), identifier un modèle de comportement du système corrigé par un dispositif appelé filtre réjecteur. Donner les valeurs numériques des paramètres du modèles.

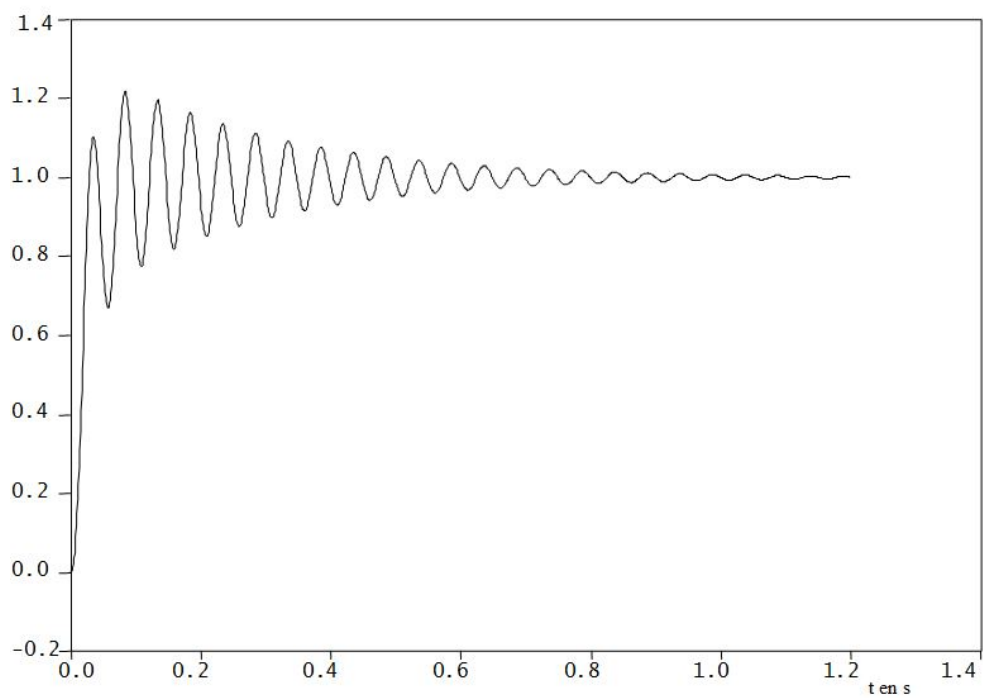
**Q14.** Tracer le diagramme de Bode du modèle que vous venez d'identifier (courbe de gain seulement). Vous effectuerez le tracé sur le document réponse où figure déjà le tracé du gain effectué à partir du modèle de connaissance.

**Q15.** Conclure sur le domaine de validité de votre modèle de comportement.

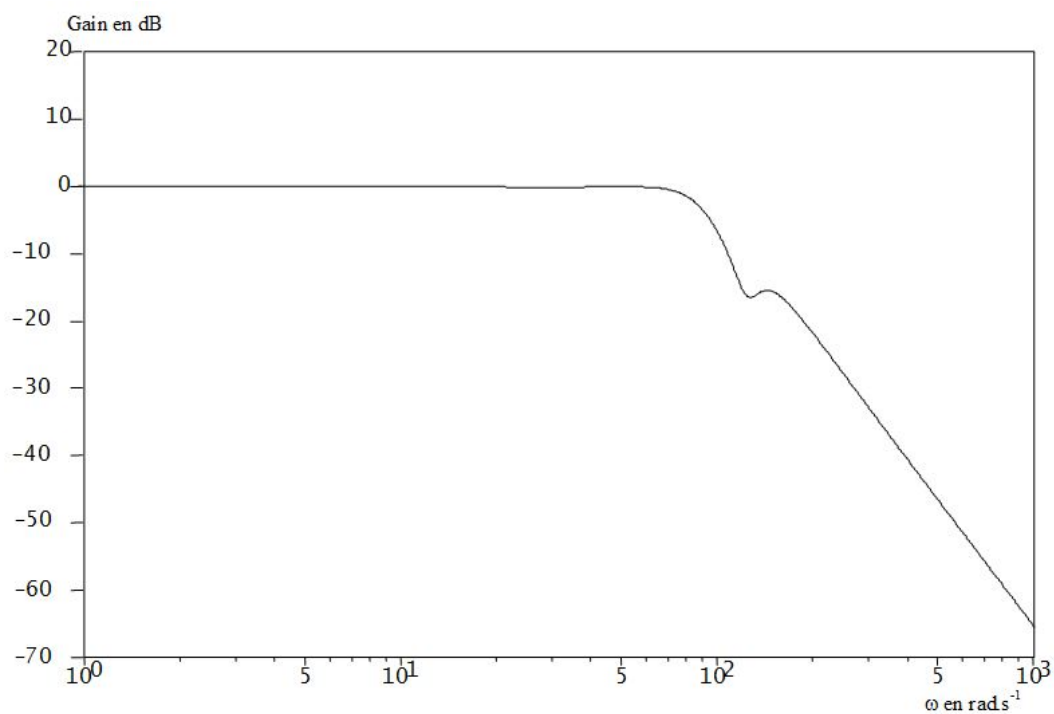
Annexes



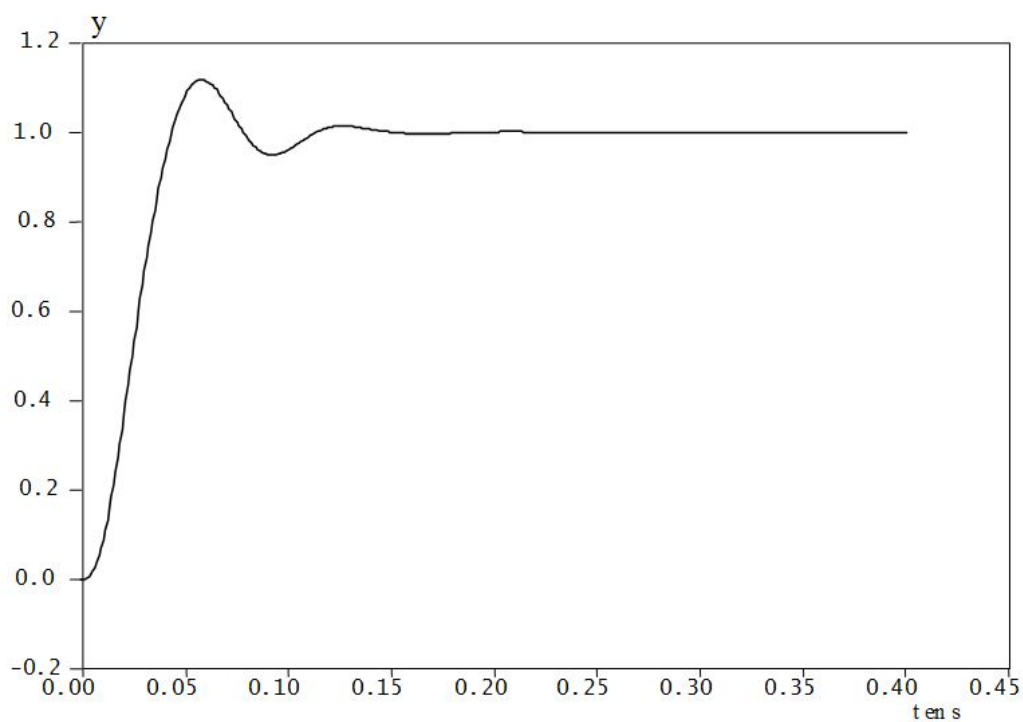
ANNEXE 1 – Diagramme de Bode en gain de la fonction de transfert en boucle fermée si  $C(p) = 1$



ANNEXE 2 – Réponse indicielle (entrée unitaire) de la fonction de transfert en boucle fermée si  $C(p) = 1$



ANNEXE 3 – Diagramme de Bode en gain de la fonction de transfert en boucle fermée du système corrigé



ANNEXE 4 – Réponse indicielle (entrée unitaire) de la fonction de transfert en boucle fermée du système corrigé