

SERVO-VERINS D'ORIENTATION DU LANCEUR ARIANE 5

I. Présentation

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

- Le 1^{er} 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 de ce moteur est orientable selon deux directions orthogonales et elle est refroidie en permanence par la circulation de l'oxygène et de l'hydrogène liquide.
- La configuration du 2^{ème} étage, appelé **EPS** comme **Étage Propulsif Stockable**, peut varier selon la mission. Il contient le satellite ou les éléments à propulser.
- 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.

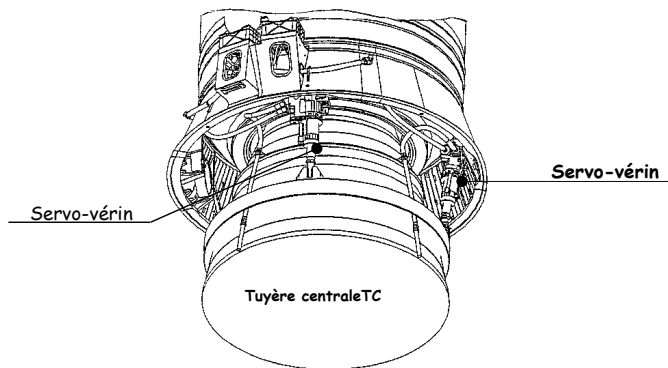
II. Paramétrage

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.

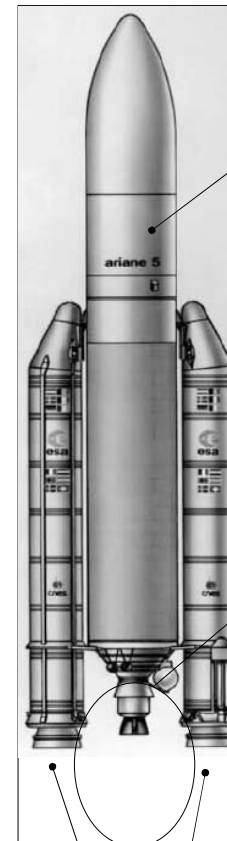
Pour orienter une tuyère, deux vérins hydrauliques ont été choisis pour délivrer la puissance élevée nécessaire. Ce système hydraulique convertit la pression interne en énergie mécanique d'orientation des tuyères.

Comme il faut contrôler constamment le braquage des deux vérins asservis en position, deux servo-vérins hydrauliques ont donc été adoptés (voir figure 1.1. qui représente les deux servo-vérins qui s'appliquent sur la tuyère centrale **TC**).

Figure 1 : tuyère centrale TC et les deux servo-vérins



Photographie 1 : fusée Ariane 5



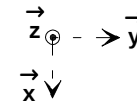
Corps central CC à deux étages

Le 1^{er} étage, ou **EPC** (Étage Principal Cryogénique), est situé dans la partie basse de ce corps central ; la tuyère de cet étage est allumée avant le décollage et le reste jusqu'à séparation des deux étages.

Le 2^{ème} étage, ou **EPS** (Ensemble Propulsif Stockable), est situé dans la partie haute de ce corps central ; la tuyère de cet étage est allumée au moment de la séparation des deux étages.

Moteur Vulcain et sa tuyère centrale TC

La tuyère centrale **TC** du moteur Vulcain du 1^{er} étage du corps central **CC** est située en extrémité basse de ce corps. Elle est orientable autour des directions $\vec{y}$ et $\vec{z}$ de $\pm 7^\circ$.



Propulseurs latéraux PG et PD

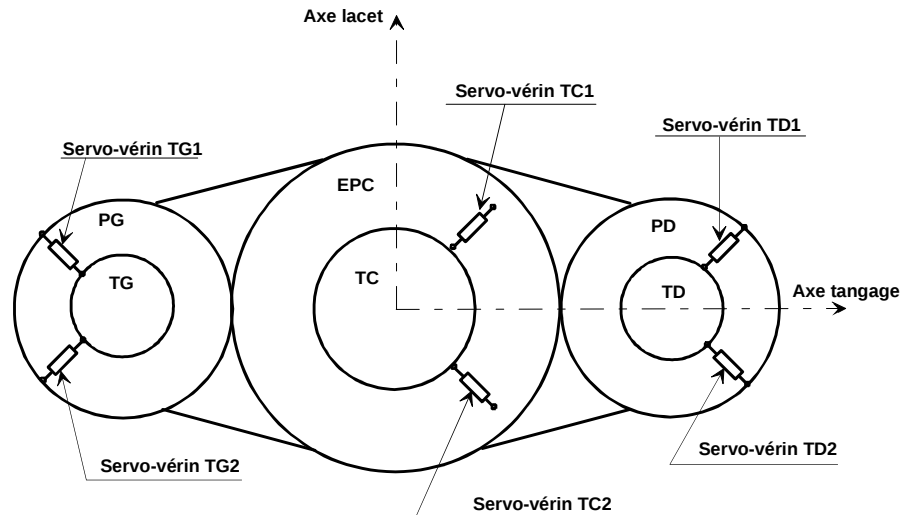
Les deux **EAP** (Étage Accélérateurs à Poudre) latéraux sont utilisés au décollage pour apporter de la puissance et sont ensuite largués.

En extrémité du propulseur gauche ($y < 0$), noté **PG**, se trouve la tuyère gauche **TG**, orientable autour des directions $\vec{y}$ et $\vec{z}$ de $\pm 6^\circ$.

En extrémité du propulseur droit ($y > 0$), noté **PD**, se trouve la tuyère droite **TD**, orientable autour des directions $\vec{y}$ et $\vec{z}$ de $\pm 6^\circ$.

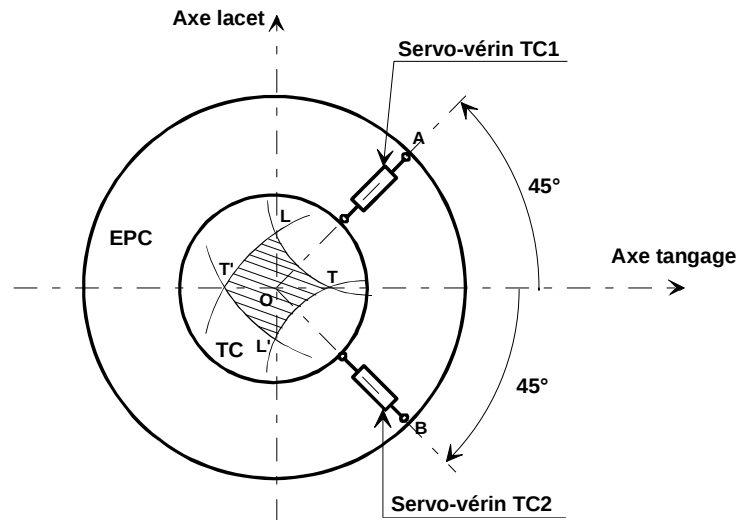
La figure ci-dessous est une représentation synoptique de la position des tuyères et des servo-vérins. Le pilotage de la fusée est réalisé en orientant les tuyères **TC**, **TD** et **TG**.

Figure 2 : Représentation synoptique des servo-vérins et des tuyères



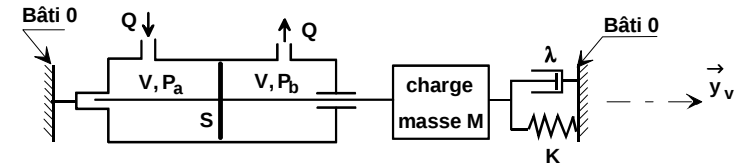
Pour obtenir un braquage de la fusée suivant l'axe de lacet, l'axe de tangage ou l'axe de roulis, il est nécessaire de piloter les servo-vérins TC1, TC2, TD1, TD2, TG1 et TG2.

Figure 3 : tuyère centrale TC et servo-vérins représentés à mi-course



Une étude fréquentielle, non demandée dans ce sujet, montre que les fréquences de la loi de pilotage de la fusée doivent être faibles. L'objectif de cette partie est de mettre en évidence le risque de résonance à basse fréquence du système d'orientation d'une tuyère, réalisé avec deux servo-vérins hydrauliques, et d'analyser la solution retenue pour limiter l'amplitude de la résonance. Pour cette étude le modèle simplifié de comportement utilisé pour un servo-vérin déplaçant une charge de masse M est représenté sur la figure 2.1. ci-dessous :

Figure 4 : modèle d'un servo-vérin



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 .

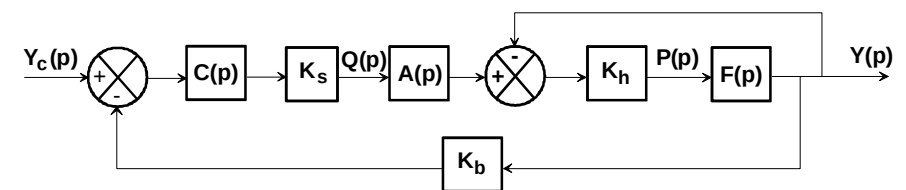
La charge de masse M est liée au bâti par un ressort de raideur K et un amortisseur de coefficient λ .

L'étude hydraulique du servo-vérin et notamment l'étude des débits de compressibilités et de déformations nous permet d'écrire : $Q = S \dot{y} + \frac{V}{2B} \dot{P}$ avec $P = P_a - P_b$. L'étude mécanique de la

charge nous permet d'écrire : $M \ddot{y} = PS - Ky - \lambda \dot{y}$ (1).

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 2.2. ci-dessous avec $K_b = 1$:

Figure 5 : schéma-bloc d'un servo-vérin



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

- Q1/** Préciser la démarche à utiliser pour obtenir l'équation (1) : système isolé, bilan des actions mécaniques en précisant leurs expressions, hypothèses simplificatrices formulées, théorème utilisé ...
- Q2/** La première étude est menée avec $C(p) = 1$. Déterminer les fonctions de transfert $A(p)$, $F(p)$ et le gain K_h .

Sur l'annexe 2.1. sont tracés différents diagrammes du servo-vérin asservi en position :

- Diagramme de Bode en gain de la fonction de transfert en boucle fermée.
- Diagramme de Black de la fonction de transfert en boucle ouverte, tracé sur l'abaque de Black-Nichols avec un zoom autour du point (0 dB, -180°).
- Réponse indicielle (entrée unitaire) de la fonction de transfert en boucle fermée.

À partir de ces diagrammes et sachant que le numérateur de la fonction de transfert en boucle fermée est un gain pur, identifier l'ordre du système en boucle fermée, son gain statique et déterminer sa fréquence de résonance. Justifier vos réponses.

Le cahier des charges du servo-vérin définit certains critères :

- Ecart nul en régime permanent en réponse à un échelon.
- Temps à 5% maxi 0,15s.
- Marge de gain supérieure à 6dB.
- Marge de phase supérieure à 45 degrés.

- Q3/** Vérifier si tous les critères ci-dessus sont respectés si $C(p) = 1$. Justifier vos réponses.

Le système est corrigé par un dispositif appelé filtre réjecteur. La pulsation propre du filtre réjecteur a été calée sur la pulsation de résonance ω_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 $Z_1 < Z_2$.

- Q4/** Donner l'allure du diagramme de Bode réel, en gain, du correcteur.

Sur l'annexe 2.2. sont tracés différents diagrammes du système corrigé :

- Diagramme de Bode en gain de la fonction de transfert en boucle fermée du système corrigé.
- Diagramme de Black de la fonction de transfert en boucle ouverte du système corrigé, tracé sur l'abaque de Black-Nichols.
- Réponse indicielle (entrée unitaire) de la fonction de transfert en boucle fermée du système corrigé.

- Q5/** Conclure quant au respect des critères du cahier des charges définis précédemment. En fonction des diagrammes de Bode fournis, préciser l'apport de ce correcteur.

ANNEXE 2.1.

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

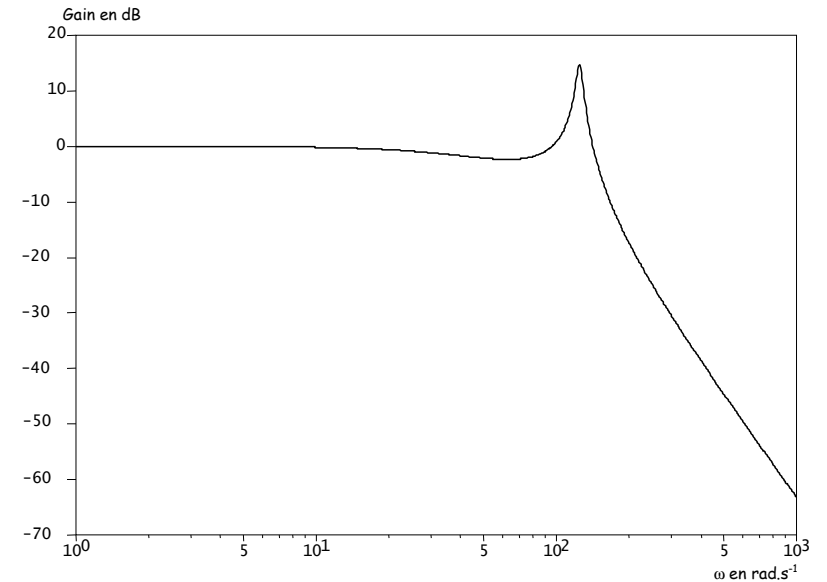
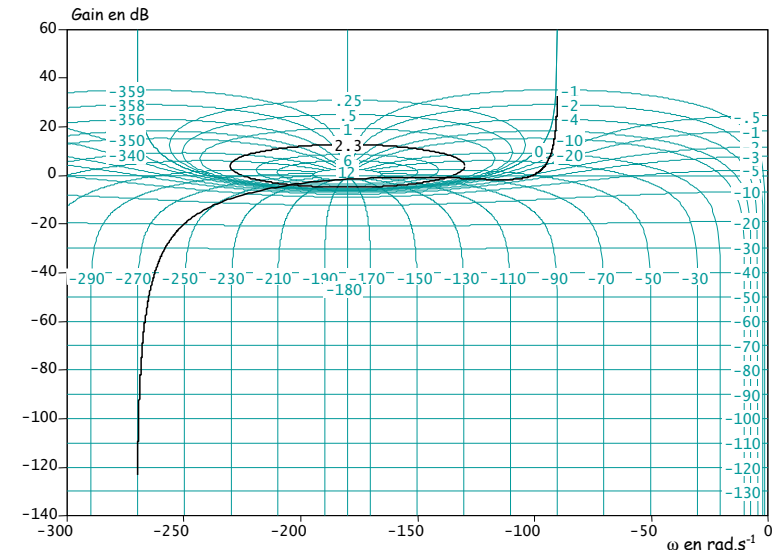
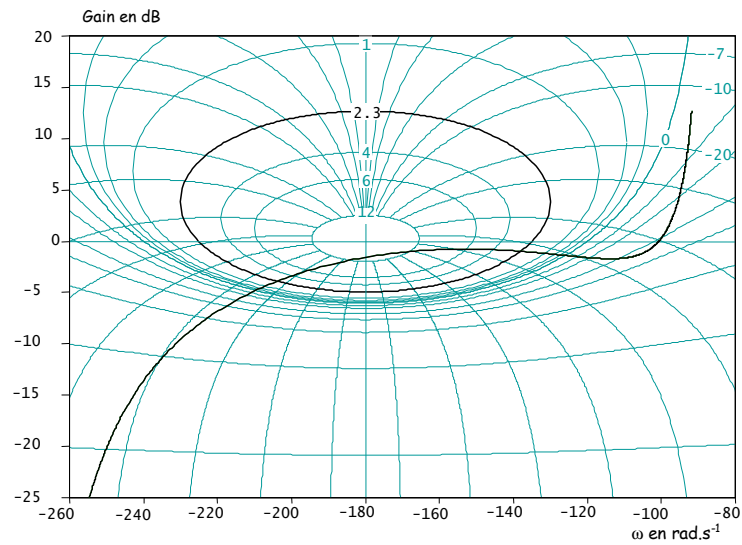


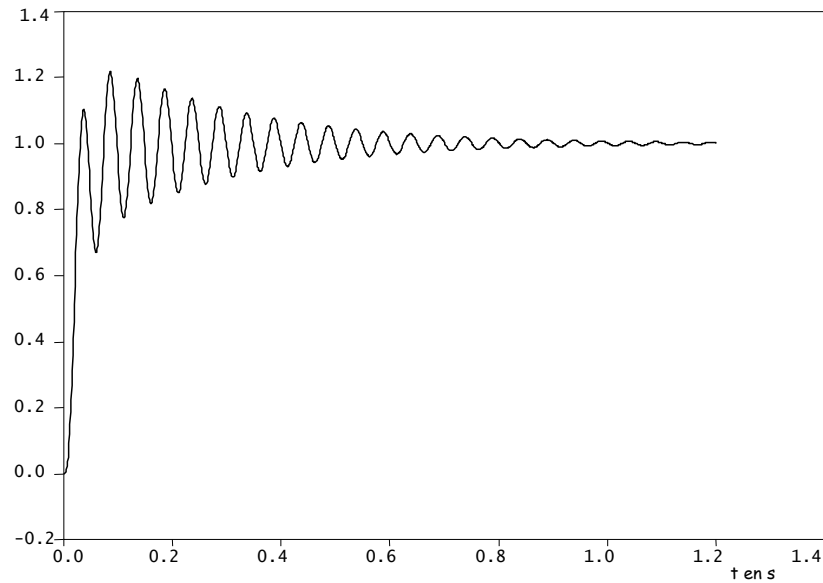
Diagramme de Black de la fonction de transfert en boucle ouverte si $C(p) = 1$



Zoom autour du point (0 dB, -180°) du diagramme de Black de la fonction de transfert en boucle ouverte si $C(p) = 1$



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



ANNEXE 2.2.

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

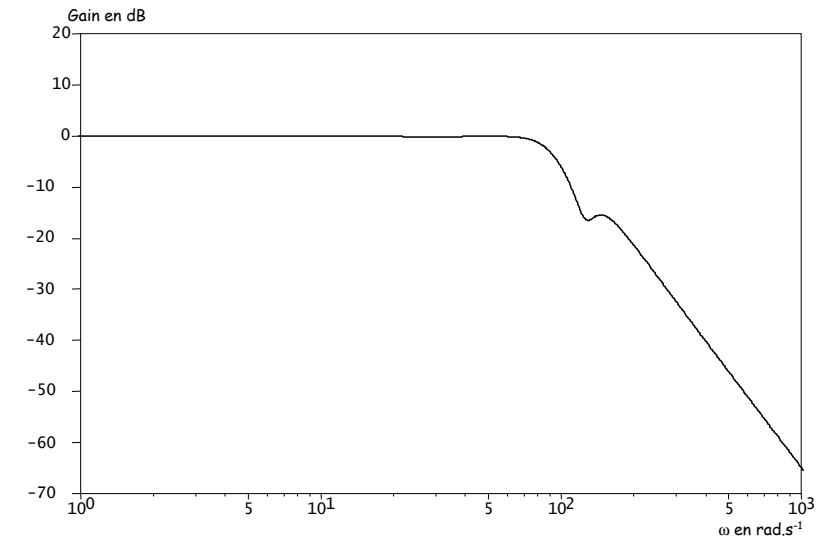
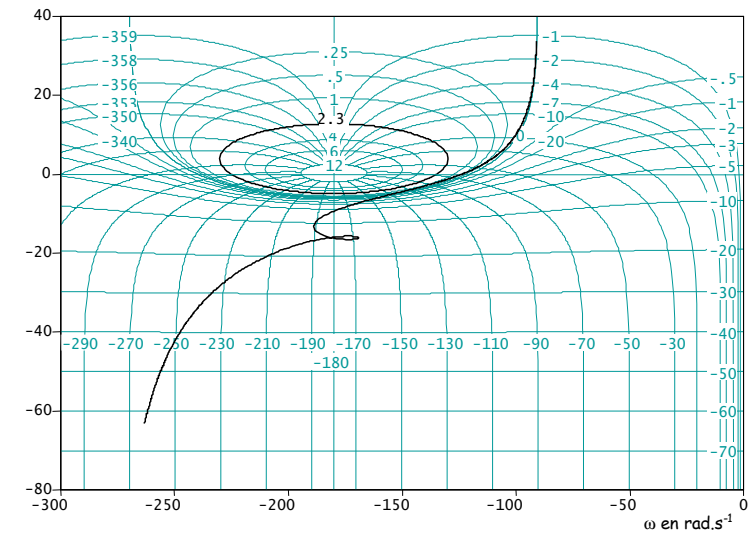


Diagramme de Black de la fonction de transfert en boucle ouverte du système corrigé



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

