

DM de Noël

Exercice 1 - Commandes de vol primaire de l'airbus A380

adapté de CCimp MP 2009

Corrigé page 12

A. Présentation

Le thème proposé concerne l'aéronautique et plus particulièrement la commande en position des gouvernes de profondeur de l'Airbus A380. L'Airbus A380 est un avion de ligne civil gros-porteur long-courrier quadriréacteur à double pont produit par Airbus, filiale d'EADS, construit principalement en Allemagne, Espagne, France et Royaume-Uni et assemblé à Toulouse.



(a)

Longueur hors-tout	73 m
Hauteur	24,1 m
Diamètre du fuselage	7,14 m
Envergure	79,8 m
Surface alaire	845 m ²
Poussée des moteurs	310 kN 4
Vitesse de croisière	1040 km/h (Mach 0,85)
Vitesse maximale	1090 km/h (Mach 0,89)
Masse maxi au décollage	560 t

(b) Caractéristiques de l'AIRBUS A380

A.1. Les commandes de vol primaires

Pour piloter un avion, il est nécessaire de pouvoir contrôler en permanence ses évolutions dans l'espace suivant trois directions ou axes (voir Figure 1) :

- l'axe de lacet (vertical) ;
- l'axe de roulis (horizontal et dans la direction de la marche) ;
- l'axe de tangage (horizontal et perpendiculaire à la marche).

Pour cela, le pilote agit sur les commandes de vol de l'avion. En pratique, on distingue deux types de commandes :

- les commandes de vol primaires utilisées pendant tout le vol qui permettent de contrôler l'évolution de l'avion autour de ses axes de référence :
 - la gouverne de direction ou gouvernail pour le lacet,
 - les ailerons et les spoilers pour le roulis,
 - les gouvernes de profondeur et le plan horizontal réglable (PHR) pour le tangage.
- Les commandes de vol secondaires utilisées pendant les phases d'atterrissage et de décollage qui permettent de modifier la configuration aérodynamique de l'avion :
 - hypersustentateurs (volets et becs) pour la portance ;
 - les spoilers (ou aérofreins) pour la traînée.

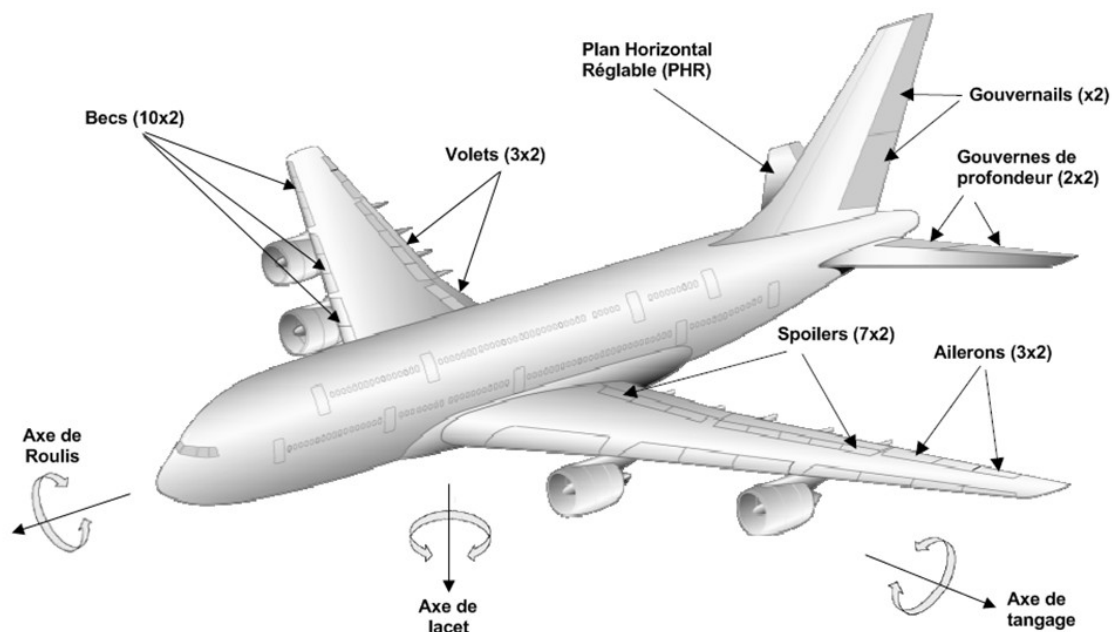


FIGURE 1 – Commande de vol de l'airbus A380

A.2. Les gouvernes de profondeur

L'Airbus A 380 est équipé de quatre gouvernes de profondeur disposées symétriquement sur le plan horizontal réglable (PHR) de l'avion (voir Figure 2).

Chaque gouverne de profondeur est reliée au PHR par des charnières ou liaisons pivots (voir Figure 3) et est mue en rotation par une unité de commande constituée de deux actionneurs (voir Figure 4) :

- une servocommande (SC), actionneur principal relié au circuit hydraulique de l'avion (voir Figure 5) ;
- un EHA (Electro Hydraulic Actuator : actionneur électro-hydrostatique), utilisé en cas de défaillance de la servocommande ou du circuit hydraulique principal. Cet actionneur est alimenté électriquement et produit localement, via un moteur électrique entraînant une pompe, l'énergie hydraulique nécessaire à son fonctionnement (voir Figure 6).

Ces unités de commande sont identiques pour les quatre gouvernes de profondeur.

A.3. Les sources d'énergie

Deux types d'énergie sont utilisés pour l'alimentation des unités de commande :

- l'énergie hydraulique pour l'alimentation des servocommandes,
- l'énergie électrique pour l'alimentation des EHA.

A.4. Asservissement en position

Les consignes émises par le pilote à l'aide du joystick ou par le pilote automatique sont transmises aux ordinateurs de commande de vol (voir Figure 7). Ces derniers déterminent, en fonction de lois de pilotage prenant en compte un certain nombre de paramètres (altitude, vitesse, etc.), les mouvements des gouvernes limitant éventuellement les évolutions de l'avion à son enveloppe de vol, c'est-à-dire aux régimes et attitudes sûrs. Il existe des différences de philosophie à ce sujet entre les deux principaux avionneurs du marché :

- Boeing permet au pilote de transgresser ces limites par pression au-delà d'une butée,
- Airbus empêche toute évolution au-delà des limites de sécurité.

La position de l'actionneur est déterminée par le capteur inductif linéaire de position implanté dans la tige du vérin. La position de la gouverne est déterminée par un capteur rotatif dont l'axe de rotation coïncide avec l'axe des charnières.

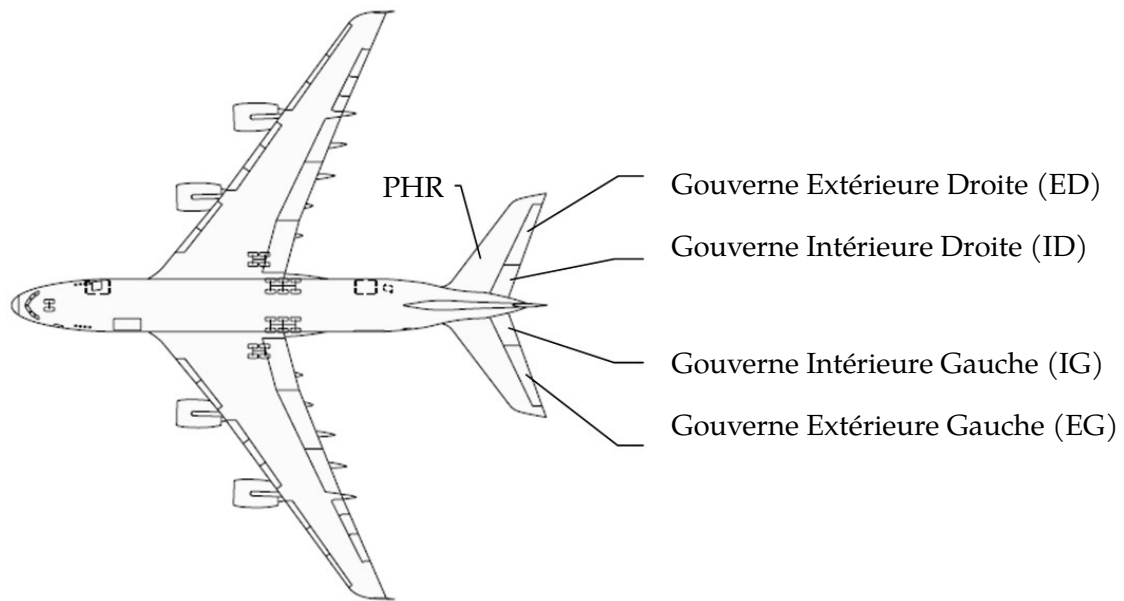
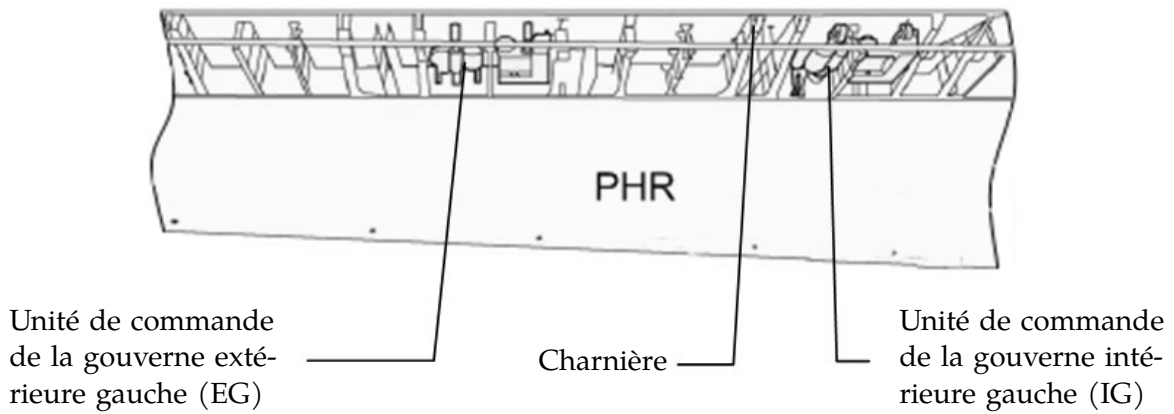
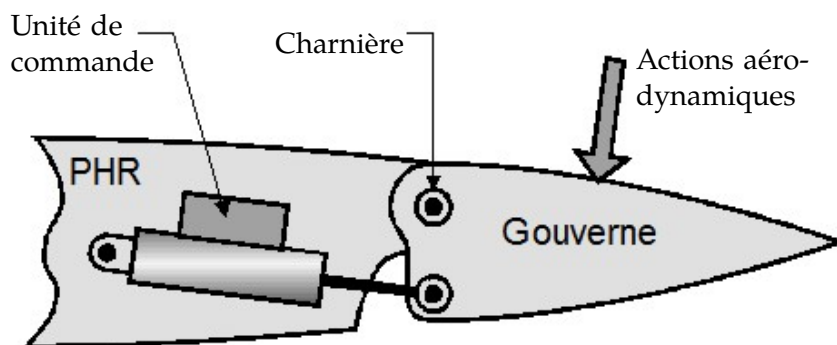


FIGURE 2 – Les gouvernes de profondeur



(a)



(b)

FIGURE 3 – Les gouvernes de profondeur

Les autres informations transmises aux ordinateurs de commande de vol proviennent essentiellement :

- des gyromètres : vitesses de rotation autour des axes de tangage, lacet et roulis ;
- des accéléromètres : accélérations verticales et latérales.

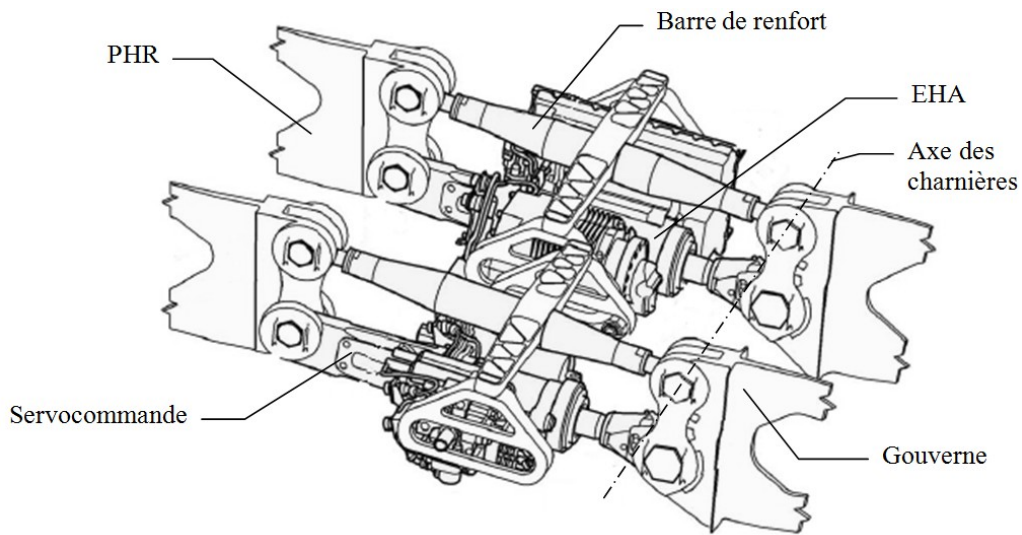


FIGURE 4 – Représentation partielle (sans les charnières) de l'unité de commande

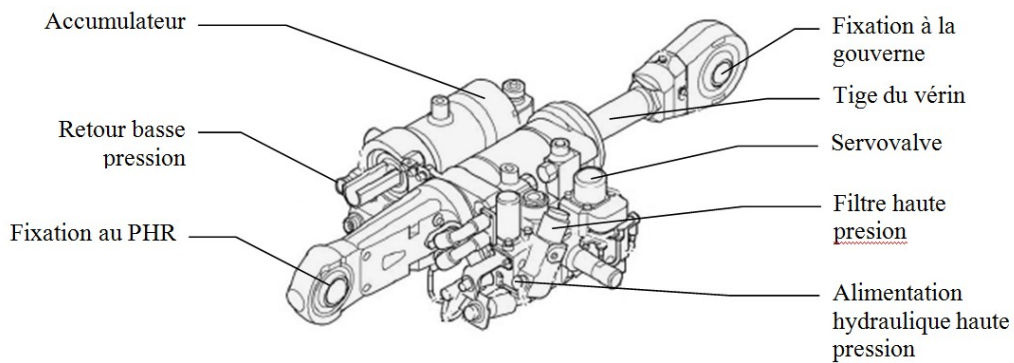


FIGURE 5 – Servocommande

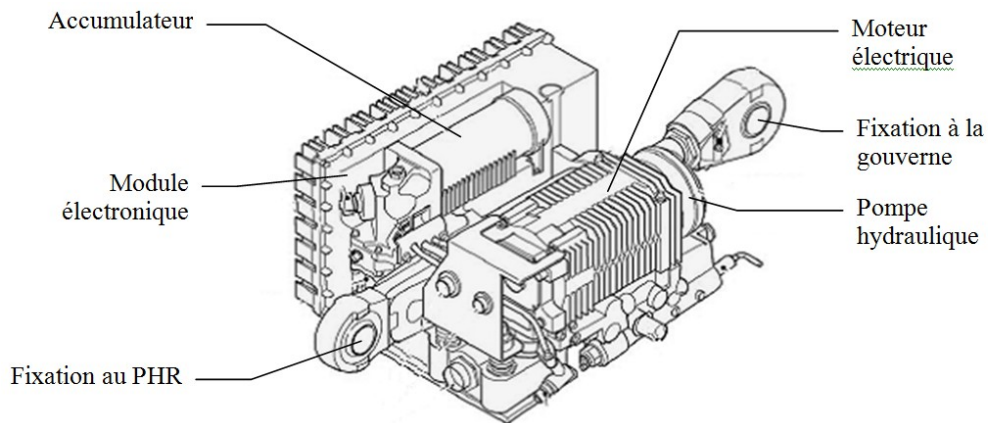


FIGURE 6 – EHA

B. Commande des actionneurs

Architecture du système de commande

La consigne de position des gouvernes de profondeur peut être définie :

- soit manuellement à l'aide de joysticks situés dans la cabine de pilotage (un pour le capitaine, un autre pour le copilote),
- soit par le pilote automatique si cette fonction est activée.

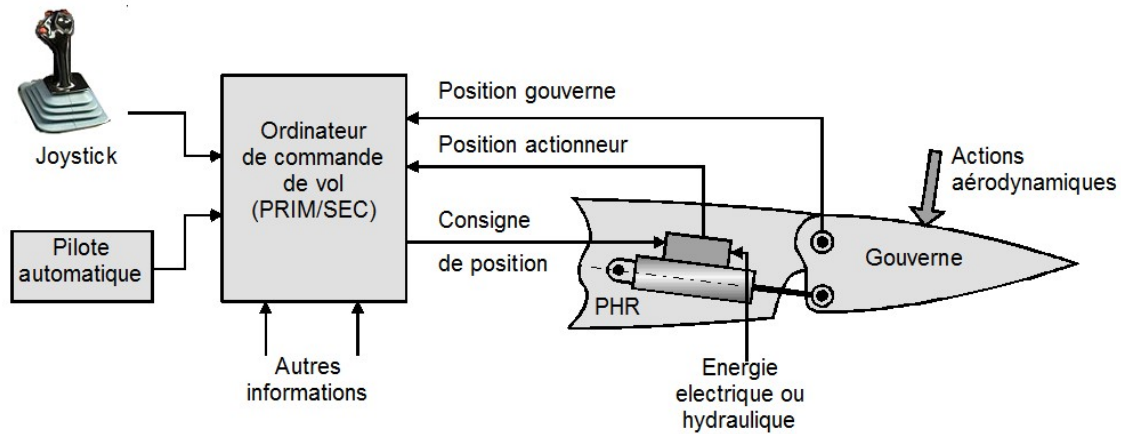


FIGURE 7 – Boucle d’asservissement en position

Ces consignes sont transmises aux ordinateurs de commande de vol (trois ordinateurs principaux PRIM 1, 2 et 3 et trois ordinateurs secondaires SEC 1, 2 et 3). Le Tableau 7 ci-dessous précise, pour chaque gouverne, les ordinateurs en service et les actionneurs qu’ils commandent suite à une défaillance d’un ou de plusieurs ordinateurs. Ainsi, pour la gouverne intérieure droite ID, les priorités sont les suivantes :

1. SC (servocommande) en mode actif commandée par PRIM 3 ;
2. EHA en mode actif commandée par PRIM 2 si PRIM 3 en panne ;
3. SC en mode actif commandée par SEC 3 si PRIM 3 et PRIM 2 en pannes ;
4. EHA en mode actif commandée par SEC 2 si PRIM 3, PRIM 2 et SEC 3 en pannes.

	Gouvernes							
	EG		IG		ID	ED		
	SC	EHA	SC	EHA	EHA	SC	EHA	SC
PRIM	1		3			3		2
		2		1	2		1	
SEC	1		3			3		2
		2		1	2		1	

Tableau 7 – Commande des modes actifs des actionneurs des gouvernes de profondeur

On utilise les variables booléennes suivantes :

- H_X ($X = J$ ou V) : Circuit hydraulique X en fonctionnement normal ;
- E_i ($i = 1$ ou 2) : Réseau électrique E_i en fonctionnement normal ;
- P_i ($i = 1, 2$ ou 3) : Ordinateur $PRIM_i$ en fonctionnement normal ;
- S_i ($i = 1, 2$ ou 3) : Ordinateur SEC_i en fonctionnement normal.

On peut ainsi définir les modes actifs des SC et des EHA sous la forme d’une équation logique. Par exemple, le mode actif de la servocommande (SC) de la gouverne intérieure droite (ID) sera noté :

$$SC_{ID} = H_j \cdot (P_3 + (\overline{E_2} + \overline{P_2}) \cdot S_3)$$

- Q1.** Tracer le logigramme de SC_{ID} .
- Q2.** Déterminer, par application du théorème de De Morgan, l’équation booléenne du mode amortissement de la servocommande de la gouverne intérieure droite.
- Q3.** Déterminer l’équation booléenne du mode actif de l’EHA de la gouverne intérieure droite EHA_{ID} .

C. Analyse de la fonction de service FP2 « Asservir en position la gouverne de profondeur »

On se propose d'étudier la réalisation de la fonction de service FP2 « Asservir en position la gouverne de profondeur ». On se limitera à l'asservissement en position de la servocommande d'une gouverne intérieure.

En raison des déformations locales dues aux actions auxquelles sont soumis le PHR et la gouverne, la distance L entre les points d'attachements A et B de l'unité de commande peut fluctuer. Bien que la barre de renfort (voir Figure 4) en limite considérablement l'importance, la connaissance de la position x_2 (voir Figure 9 de la tige du vérin n'est pas suffisante pour déterminer avec certitude la position angulaire des gouvernes. D'où une structure avec deux boucles d'asservissement en position représentée Figure 8.

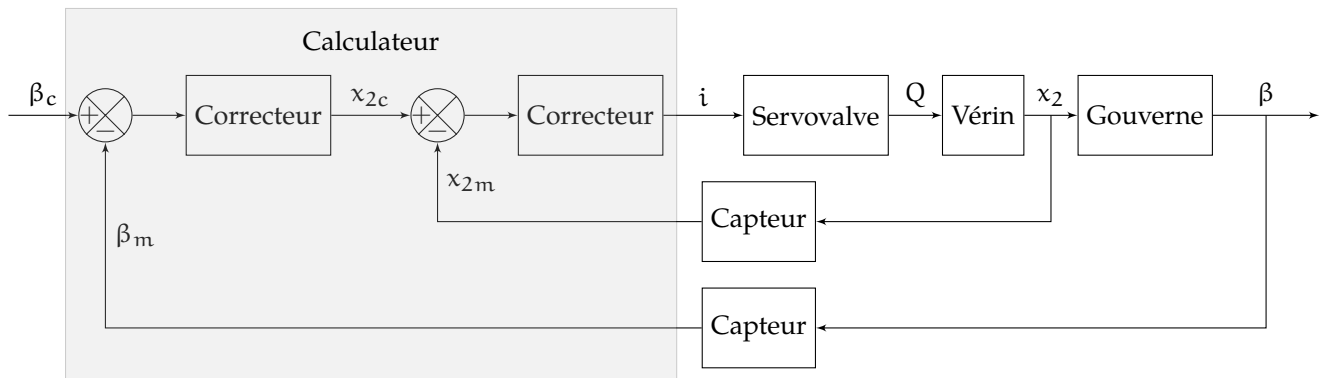
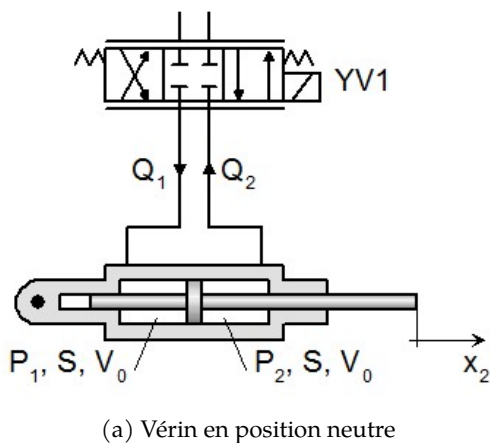


FIGURE 8 – Boucles d'asservissement en position d'une servocommande

C.1. Fonction de transfert du vérin

Équation des débits

La Figure 9 présente le vérin hydraulique de manœuvre de la gouverne.



On note

- x_2 : la position de la tige du vérin par rapport à la position neutre;
- V_i : volume de la chambre i ($i = 1$ ou 2);
- S : section utile du vérin;
- P_i : pression dans la chambre i ;
- Q_i : débit entrant dans la chambre i .

avec

(b) données

FIGURE 9 – Vérin

On considère le vérin en position neutre, on a alors $V_1 = V_2 = V_0$. Les équations de débit s'écrivent :

$$Q_1 = S \cdot \frac{dx_2}{dt} + \frac{V_0}{B} \frac{dP_1}{dt}$$

$$Q_2 = S \cdot \frac{dx_2}{dt} - \frac{V_0}{B} \frac{dP_2}{dt}$$

avec :

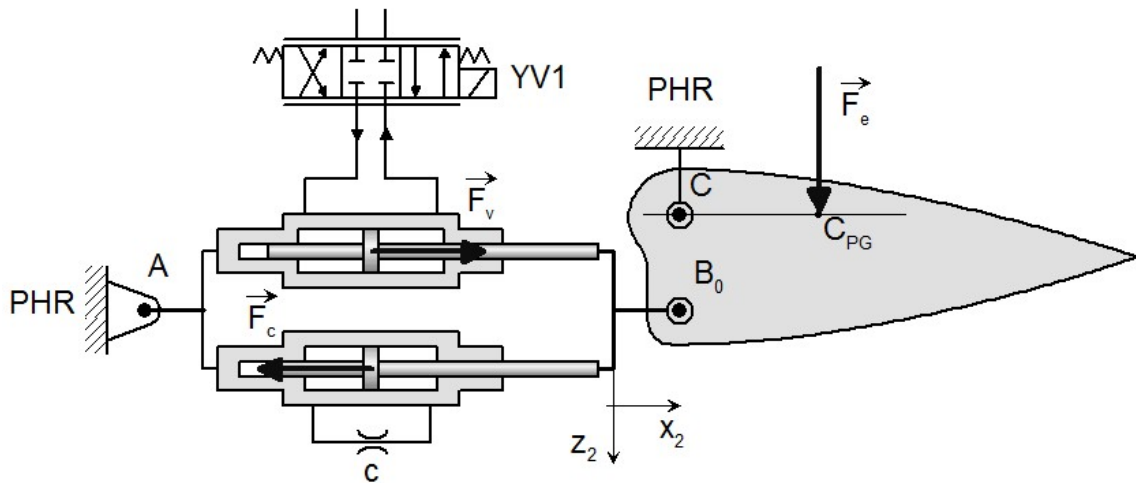


FIGURE 10 – Gouverne en position $\beta = 0^\circ$

- $\frac{V_0}{B} \frac{dP_i}{dt}$: débit de compressibilité du fluide dans la chambre i ;
- B : module de compressibilité du fluide;
- S : section utile du vérin.

On pose aussi :

$$Q(t) \approx Q_1(t) \approx Q_2(t)$$

$$P(t) = P_1(t) - P_2(t)$$

Q4. Montrer que l'on a alors

$$Q(t) = S \cdot \frac{dx_2}{dt} + \frac{V_0}{2 \cdot B} \frac{dP}{dt}.$$

C.2. Équations mécaniques

On considère le vérin en position neutre avec un angle d'inclinaison de la gouverne $\beta = 0^\circ$ (voir Figure 10). On utilise les notations suivantes :

- m_2 : masse de la tige d'un vérin;
- I_C : inertie de la gouverne autour de l'axe (C, \vec{y}_2) ;
- \vec{F}_e : résultante des forces aérodynamiques appliquée au centre de poussée C_{PG} ;
- $\vec{F}_v = P \cdot S \cdot \vec{x}_2$: force engendrée par le vérin en mode actif;
- $\vec{F}_c = -c \frac{dx_2(t)}{dt} \cdot \vec{x}_2$: force engendrée par le vérin en mode amortissement;
- c : coefficient d'amortissement visqueux;
- R : distance;
- d : distance;
- la vitesse de l'avion est supposée constante $\vec{V}_a = V_a \cdot \vec{x}_2$.

Hypothèse : On considère petit le mouvement de rotation β de la gouverne autour de la position neutre. Dans ces conditions, on admettra que $\beta = \frac{x_2}{R}$.

On considère la Figure 10. Le système isolé comprend les deux vérins complets (tige et cylindre) et la gouverne.

Q5. Énoncer le théorème de l'énergie cinétique. Démontrer alors que l'on peut écrire l'équation différentielle :

$$m \cdot \ddot{x}_2 + c \cdot \dot{x}_2 = P \cdot S - \frac{d}{R} \cdot F_e$$

avec $m_e = 2 \cdot m_2 + \frac{I_c}{R^2}$ la masse équivalente ramenée sur l'axe des vérins.

C.3. Fonction de transfert du vérin

On note $Q(p)$, $P(p)$, $X_2(p)$, $F_e(p)$ les transformées de Laplace des variables $Q(t)$, $P(t)$, $x_2(t)$ et $F_e(t)$.

On considère nulles les conditions initiales.

Q6. Déterminer les transformées de Laplace des équations ?? et ??.

On représente ces deux équations par le schéma fonctionnel Figure 11. En ramenant la perturbation sur l'entrée, la réduction de la boucle conduit au schéma bloc simplifié de la Figure 12.

On note $r_h = \frac{2 \cdot B \cdot S^2}{V_0}$ la raideur hydraulique du vérin.

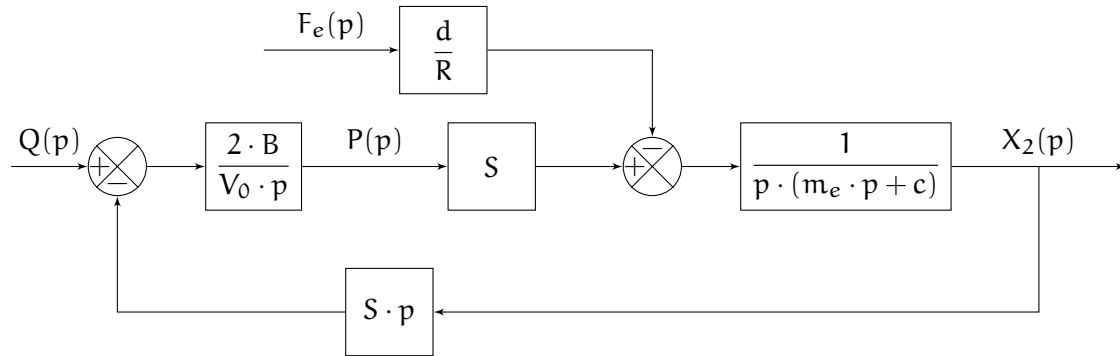


FIGURE 11 – Schéma bloc du vérin

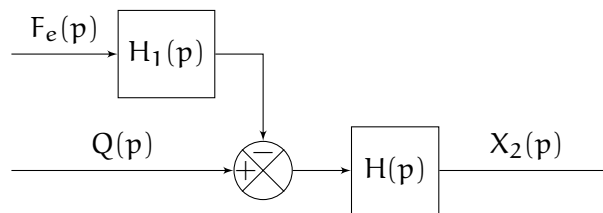


FIGURE 12 – Schéma bloc simplifié du vérin

Q7. Déterminer la fonction de transfert $H(p)$ et montrer qu'elle peut se mettre sous la forme canonique suivante :

$$H(p) = \frac{K_Q}{p \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{\xi}{\omega_0} \cdot p + \frac{p^2}{\omega_0^2} \right)}$$

En déduire les expressions de K_Q , ω_0 et ξ en fonction de r_h , S , m_e et c .

Q8. Déterminer $H_1(p)$ en fonction de d , R , S , r_h .

C.4. Schéma fonctionnel de la boucle d'asservissement interne

On admet que le débit $Q(t)$ est proportionnel à l'intensité du courant $i(t)$ parcourant la bobine de commande de la servocommande soit :

$$Q(t) = K_s \cdot i(t)$$

Le capteur de position renvoie une tension proportionnelle à la position x_2 de la tige du vérin :

$$x_{2m}(t) = K_p \cdot x_2(t)$$

La fonction de transfert du correcteur est notée $C(p)$.

La structure de la boucle d'asservissement en position de la tige du vérin est représentée Figure 13 avec :

— X_{2c} : consigne de position de même unité que X_2 , position de la tige du vérin ;

— X_{2r} : signal de référence de même unité que le signal de retour X_{2m} .

Q9. Reproduire sur votre feuille le schéma bloc de la Figure 13 en précisant les fonctions, B, C et D.

Q10. Comment doit-être A pour que le système soit asservi ?

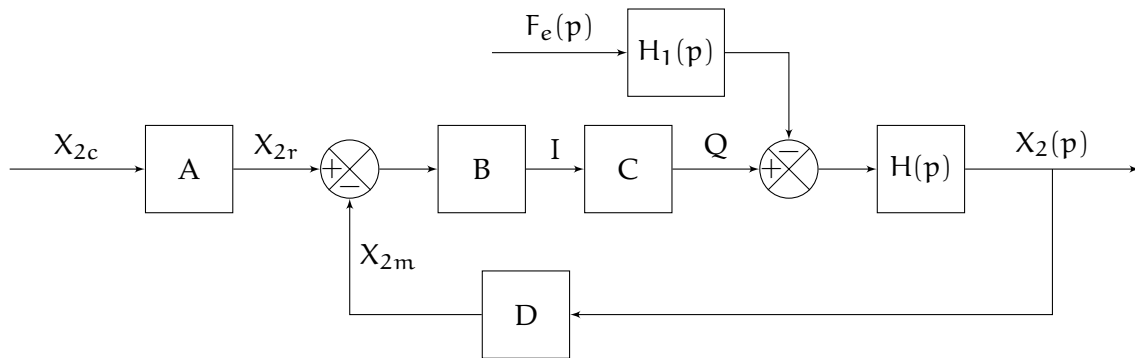


FIGURE 13 – Schéma fonctionnel de la boucle d'asservissement en position du vérin

C.5. Analyse des performances de l'asservissement en position de la tige du vérin

Objectif : déterminer les conditions nécessaires à la satisfaction des performances exigées en terme de précision et de stabilité de la fonction FT2-1 : « Asservir en position la tige du vérin ».

Critères	Niveaux
Masse m_2 de la tige d'un vérin	8,4 kg
Inertie I_c de la gouverne intérieure	233 kgm ²
Longueur du bras de levier R	155 mm
Longueur d	0,6 m
Volume V_0	$5,14 \times 10^{-4} \text{ m}^3$
Coefficient d'amortissement c	$104 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}$
Section utile du vérin S	57,1 cm ²
Module de compressibilité du fluide B	2,109 Nm ²
Marge de phase	60°
Marge de gain	10 dB
Écart de position	$\varepsilon_p = 0 \text{ mm}$
Écart de traînage pour une consigne $x_{2c} \cdot 0,1 \cdot t$	$\varepsilon_T \leq 2 \text{ mm}$

Tableau 13 – Éléments du cahier des charges

Q11. Calculer les valeurs et préciser les unités de :

Q11a. la masse équivalente m_e et la raideur hydraulique r_h ;

Q11b. le gain K_Q , la pulsation propre ω_0 et le facteur d'amortissement ξ de $H(p)$.

Pour la suite, on prendra pour les applications numériques :

$$H(p) = \frac{175}{p(1,0 + 3,9 \times 10^{-5} \cdot p + 3,8 \times 10^{-5} \cdot p^2)}$$

Le correcteur est à action proportionnelle de fonction de transfert $C(p) = K_c$. Le schéma bloc à retour unitaire est représenté Figure 14 avec $K = K_p \cdot K_s$.

On appelle fonction de transfert en boucle ouverte vis à vis de l'entrée X_{2c} , la fonction $T(p) = \frac{X_2(p)}{\varepsilon(p)}$ obtenue pour $F_e(p) = 0$.

Q12. Déterminer la fonction de transfert en boucle ouverte $T(p)$ et en déduire l'expression du gain de la boucle ouverte K_{BO} ainsi que l'ordre et la classe de $T(p)$.

On écrit : $X_2(p) = F(p) \cdot X_{2c}(p) + F_1(p) \cdot F_e(p)$.

Q13. Déterminer les fonctions $F(p)$ et $F_1(p)$ en fonction, entre autre de, K_{BO} , ξ et ω_0 .

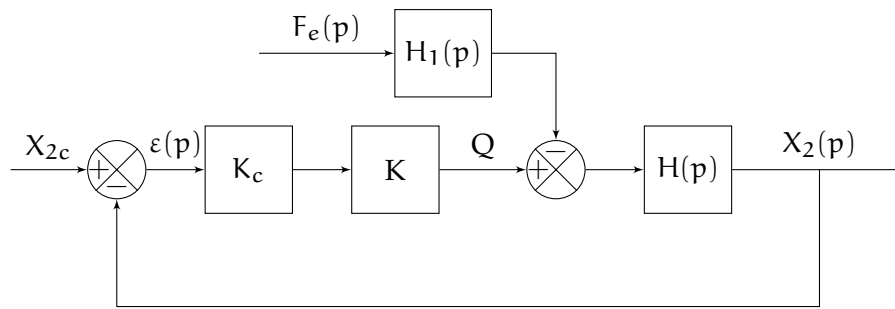


FIGURE 14 – Schéma bloc à retour unitaire

Q14. On règle gain K_c du correcteur afin que le système asservi soit stable, montrer alors que si $F_e(t)$ est une action mécanique constante que l'on peut représenter par un échelon d'amplitude α , soit $F_e(t) = \alpha \cdot u(t)$ ($u(t)$ fonction de Heaviside), la valeur finale de $x_2(t)$ ne dépend pas de $F_e(t)$

Le schéma fonctionnel devient alors :

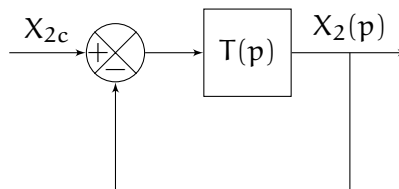


FIGURE 15 – Schéma bloc à retour unitaire simplifié

Pour la suite de l'étude, on prend :

$$T(p) = \frac{K_{BO}}{p(1.0 + 3,9 \times 10^{-5} \cdot p + 3,8 \times 10^{-5} \cdot p^2)}$$

Q15. Diagrammes de Bode

Q15a. Tracer les diagrammes de Bode de $T(p)$ pour $K_{BO} = 1$ sur le document réponse (papier semilog).

Q15b. Déterminer précisément le module pour ω_{180} , la pulsation pour laquelle l'argument vaut -180° .

Q15c. Préciser les points et les éléments caractéristiques.

Q15d. Déterminer le module et l'argument de $T(j \cdot \omega_r)$ pour ω_r la pulsation de résonance du second ordre.

Q15e. En déduire la condition de stabilité sur K_{BO} .

On se propose de vérifier le respect du cahier des charges (Tableau 13) vis à vis de la précision et de la marge de gain.

Q16. Respect de la précision : déterminer l'écart $\varepsilon(t)$ vis à vis de l'entrée principale :

Q16a. ε_p pour une consigne $x_{2c}(t) = 1 \cdot u(t)$ de type échelon unitaire ;

Q16b. ε_t pour une consigne en rampe $x_{2c} = 0,1 \cdot t \cdot u(t)$.

Q16c. En déduire la valeur du gain de boucle K_{BO} permettant de satisfaire les exigences du cahier des charges.

Q16d. Conclure sur la possibilité de ce réglage.

Q17. Respect de la marge de gain

Q17a. Déduire du diagramme de Bode, la valeur de K_{BO} permettant de respecter la marge de gain spécifiée par le cahier des charges.

Q17b. Quelle marge de phase en résultera-t'il ?

Q18. Conclure quant à la possibilité de satisfaire les exigences du cahier des charges avec un correcteur à action proportionnelle $C(p) = K_c$.

D. Étude du correcteur

On choisit un correcteur, réalisable numériquement, de fonction de transfert :

$$C(p) = K_c \cdot \frac{N(p)}{D(p)} = K_c \cdot \frac{1 + 2\frac{\xi}{\omega_0} \cdot p + \frac{p^2}{\omega_0^2}}{1 + 2\frac{\xi_c}{\omega_c} \cdot p + \frac{p^2}{\omega_c^2}}$$

Caractéristiques du correcteur :

- le gain K_c du correcteur est choisi de telle sorte que la valeur du gain de boucle K_{BO} soit égale à 50;
- le facteur d'amortissement ξ_c est choisi égal à 0,7;
- le numérateur $N(p)$ de $C(p)$ est choisi égal au terme du second ordre du dénominateur de la fonction $H(p)$.

Q19. Donner la fonction de transfert en boucle ouverte corrigée $T(p)$.

Q20. Justifier les choix de la valeur du gain de boucle K_{BO} et celle du facteur d'amortissement ξ_c .

On donne Figure 16 deux représentations simplifiées dans Bode de l'évolution du rapport d'amplitude $A(\omega)_{dB}$ (tracé asymptotique) et du déphasage de la fonction de transfert en boucle ouverte suivant que ω_c est supérieur ou inférieur à K_{BO} .

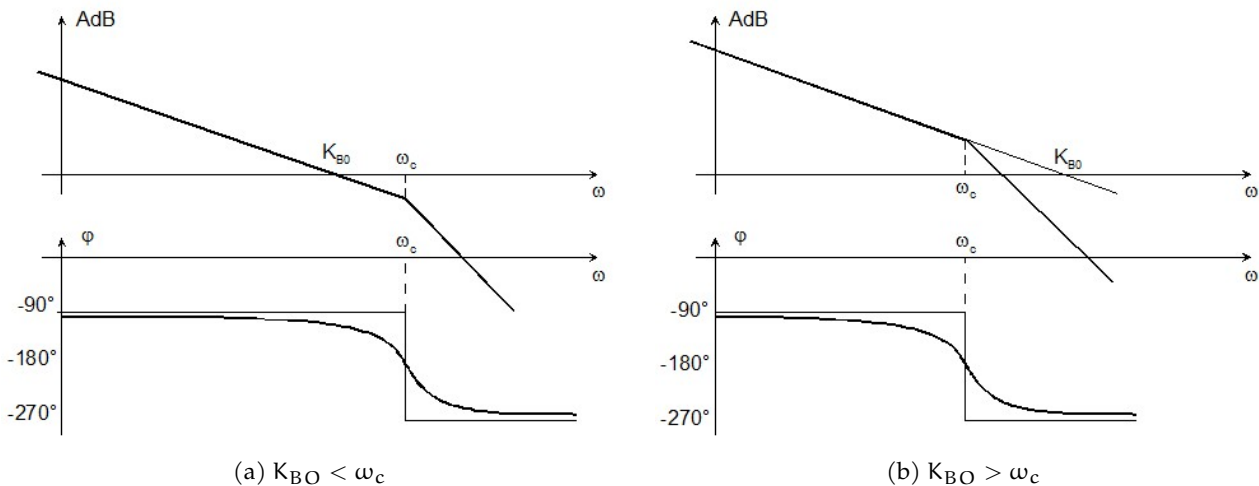


FIGURE 16 – Tracé asymptotique dans Bode de la FTBO pour $K_{BO} < \omega_c$ et $K_{BO} > \omega_c$

Q21. Dans quel cas la condition de stabilité est-elle assurée? Justifier votre réponse.

Q22. En déduire, en considérant le tracé asymptotique de $A(\omega)_{dB}$, la valeur de la pulsation propre ω_c permettant de respecter une marge de phase de 60° .