

COMMANDES DE VOL PRIMAIRES DE L' AIRBUS A380

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 quadrimoteur à double pont produit par Airbus, filiale d'EADS, construit principalement en Allemagne, Espagne, France et Royaume-Uni et assemblé à Toulouse.



Caractéristiques de l' AIRBUS A380

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

1 PRESENTATION

1.1 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 page 2) :

- 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.

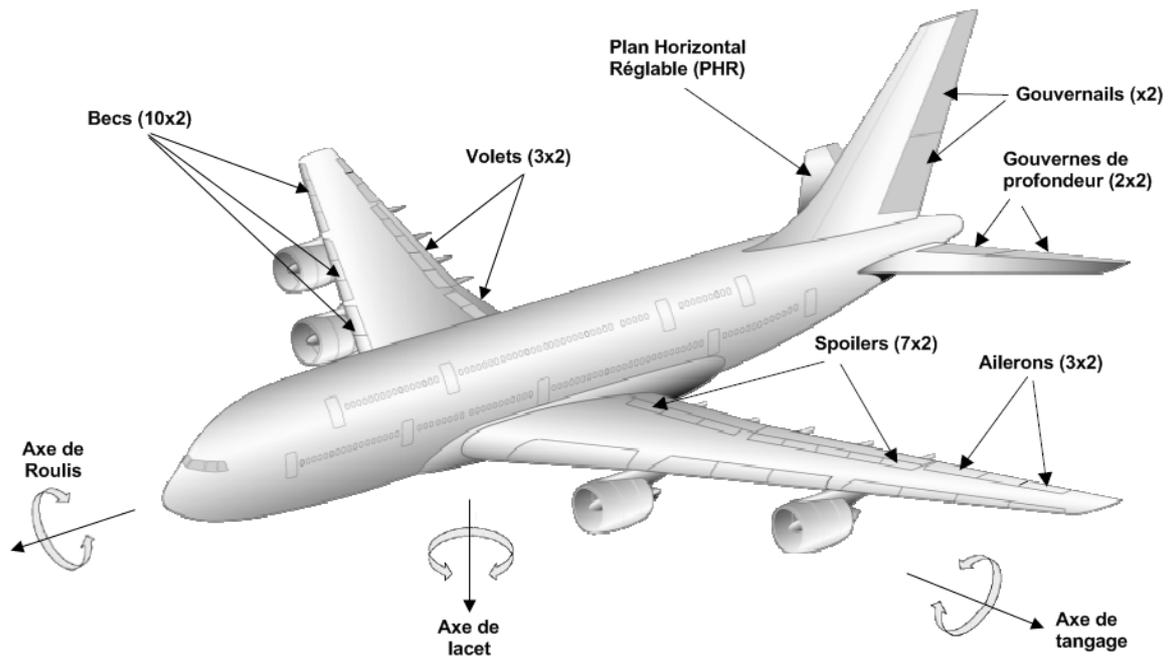


Figure 1 : Les commandes de vol de l'A380

1.2 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 11).

Chaque gouverne de profondeur est reliée au PHR par des charnières ou liaisons pivots (voir Figure 12) et est mue en rotation par une unité de commande constituée de deux actionneurs (voir Figure 13) :

- une servocommande (SC), actionneur principal relié au circuit hydraulique de l'avion (voir Figure 14) ;
- un EHA (Electro Hydraulic Actuator : actionneur électro-hydraulique), 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 15).

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

1.3 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.

1.3.1 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 2). 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.

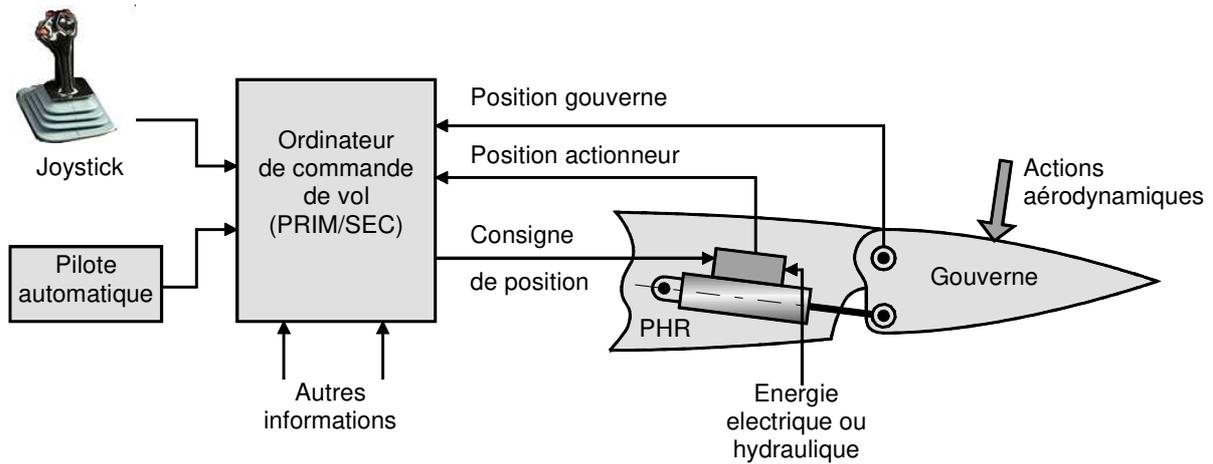


Figure 2 : Boucle d'asservissement en position

La position de l'actionneur est déterminée par un capteur inductif linéaire 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.

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.

2 ANALYSE DE LA FONCTION DE SERVICE FP2

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 13) en limite considérablement l'importance, la connaissance de la position x_2 de la tige du vérin n'est pas suffisante pour déterminer avec certitude la position angulaire β des gouvernes. D'où une structure avec deux boucles d'asservissement en position représentée Figure 3.

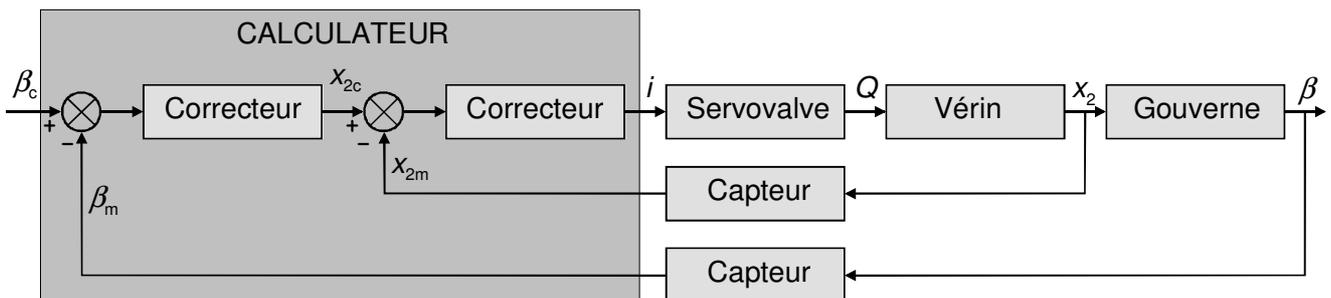


Figure 3 : Boucle d'asservissement en position d'une servocommande

2.1 Fonction de transfert du vérin

2.1.1 Equation des débits

On note (voir Figure 4) :

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

On considère le vérin en position neutre, on a alors $V_1 = V_2 = V_0$. L'équation de débit simplifiée s'écrit :

$$Q(t) \approx Q_1(t) \approx Q_2(t) ; P(t) = P_1(t) - P_2(t)$$

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

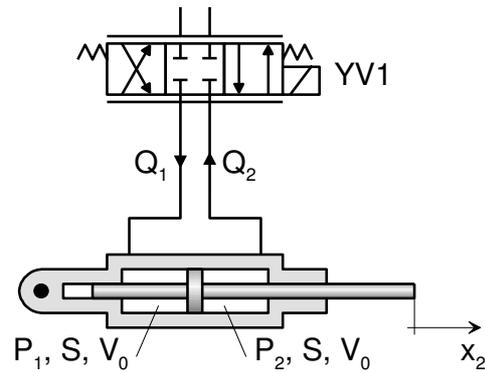


Figure 4 : Vérin en position neutre

2.1.2 Equations mécaniques

On considère le vérin en position neutre avec un angle d'inclinaison de la gouverne $\beta = 0^\circ$ (voir Figure 5). On utilise les notations suivantes :

- m_2 : masse de la tige d'un vérin ;
- I_C : inertie de la gouverne autour de l'axe Cy_2 ;
- \vec{F}_e : résultante des forces aérodynamiques appliquée au centre de poussée C_{PG} ;
- $\vec{F}_v = PSx_2$: force engendrée par le vérin en mode actif ;
- $\vec{F}_c = -c \frac{dx_2(t)}{dt} x_2$: force engendrée par le vérin en mode amortissement ;
- c : coefficient d'amortissement visqueux ;
- R : distance B_0C ;
- d : distance CC_{PG} .

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 5. Le système isolé comprend les deux vérins complets (tige et cylindre) et la gouverne.

Le théorème de l'énergie cinétique permet d'écrire l'équation différentielle suivante:

$$m_e \ddot{x}_2 + c \dot{x}_2 = PS - \frac{d}{R} F_e \quad (2)$$

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

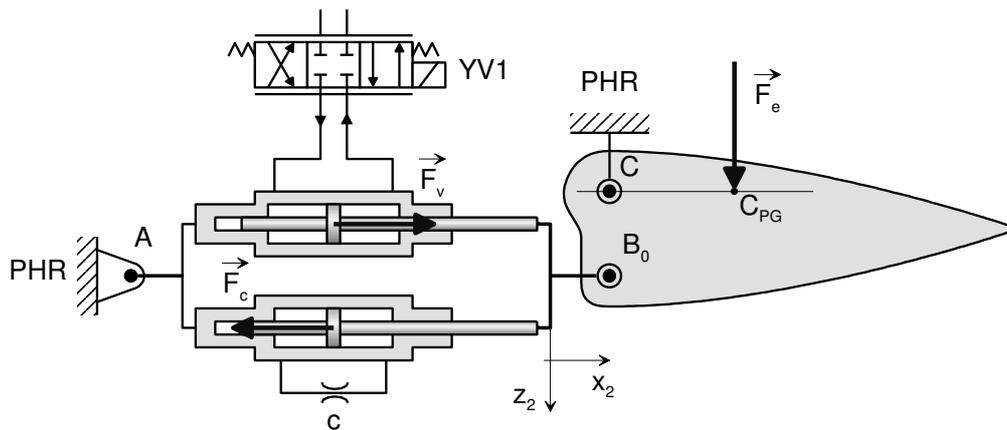


Figure 5 : Gouverne en position $\beta = 0^\circ$

2.1.3 Fonction de transfert du vérin

On note :

- $Q(p)$ la transformée de Laplace de la variable $Q(t)$;
- $P(p)$ la transformée de Laplace de la variable $P(t)$;
- $X_2(p)$ la transformée de Laplace de la variable $x_2(t)$;
- $F_e(p)$ la transformée de Laplace de la variable $F_e(t)$.

On représente ces deux équations par le schéma fonctionnel Figure 6. En ramenant la perturbation sur l'entrée, la réduction de la boucle conduit au schéma bloc simplifié de la Figure 7.

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

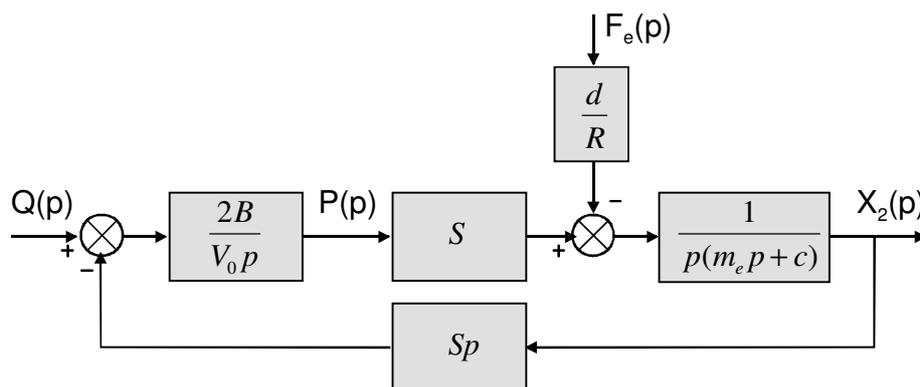


Figure 6 : Schéma bloc du vérin

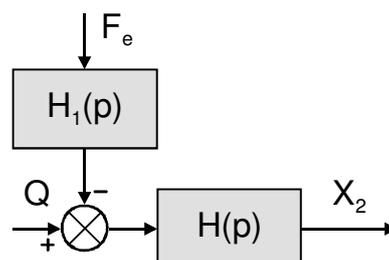


Figure 7 : Schéma bloc simplifié du vérin

Question 1 : Déterminer la fonction de transfert $H(p)$ et montrer qu'elle peut se mettre sous la forme canonique suivante :

$$H(p) = \frac{K_0}{p \left(1 + 2 \frac{\xi}{\omega_0} p + \frac{p^2}{\omega_0^2} \right)}$$

En déduire les expressions de K_0 , ω_0 et ξ en fonction de r_h , S , m_e et c .

Question 2 : Déterminer $H_1(p)$ en fonction de d , R , S , r_h .

2.2 Schéma fonctionnel de la boucle d'asservissement interne

La consigne de position $x_{2c}(t)$ est convertie en tension de consigne $x_{2r}(t)$ par un convertisseur de gain K_a .

Le capteur de position inductif renvoie une tension $x_{2m}(t)$ proportionnelle à la position réelle $x_2(t)$ de la tige du vérin :

$$x_{2m}(t) = K_p \cdot x_2(t) \quad (4)$$

Cette tension mesurée est comparée à la tension de consigne $x_{2r}(t)$ pour donner l'écart ε . Cet écart est corrigé pour fournir le courant $i(t)$ parcourant la bobine de commande. La fonction de transfert du correcteur est notée $C(p)$.

On admet que le débit $Q(t)$ est proportionnel à l'intensité du courant $i(t)$ parcourant la bobine de commande YV1 de la servocommande soit :

$$Q(t) = K_s \cdot i(t) \quad (3)$$

Question 3 : Compléter le schéma bloc de l'asservissement en position de la tige du vérin sur le document réponse.

Question 4 : Pour que ce système soit asservi, donner la relation entre K_a et K_p .

2.3 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 ».

Eléments du cahier des charges

Fonction	Critères	Niveaux
FT2-1	Masse m_2 de la tige d'un vérin	8,4 kg
	Inertie I_c de la gouverne intérieure	233 kg m ²
	Longueur du bras de levier R	155 mm
	Longueur d	0,6 m
	Volume V_0	5,14.10 ⁻⁴ m ³
	Coefficient d'amortissement c	10 ⁴ N/(m/s)
	Section utile du vérin S	57,1 cm ²
	Module de compressibilité du fluide B	2.10 ⁹ N/m ²
	Marge de phase	≥ 60°
	Marge de gain	≥ 10 dB
	Ecart de position	$\varepsilon_p = 0$ mm
	Ecart de traînage pour une consigne $x_{2c}(t) = 0,1.t$	$\varepsilon_T \leq 2$ mm

Question 5 : Calculer les valeurs et préciser les unités de :

- la masse équivalente m_e et la raideur hydraulique r_h ;
- le gain K_0 , la pulsation propre ω_0 et le facteur d'amortissement ξ de $H(p)$.

2.3.1 Correcteur à action proportionnelle

Le correcteur est à action proportionnelle de fonction de transfert $C(p) = K_c$. Le schéma bloc à retour unitaire est représenté Figure 8.

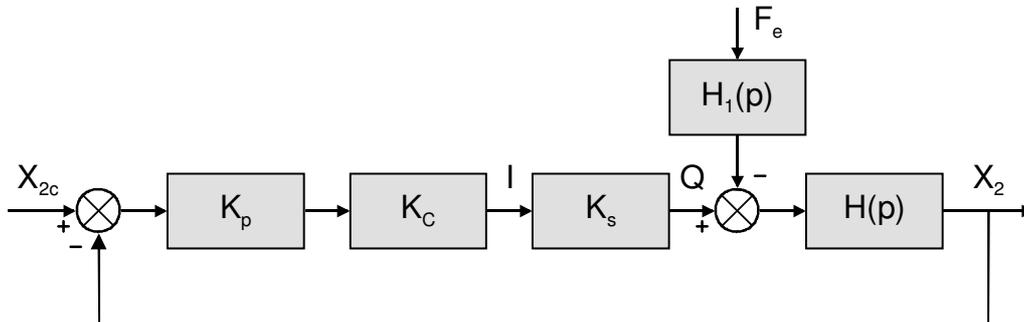


Figure 8 : Schéma bloc à retour unitaire

Question 6 : Déterminer la fonction de transfert en boucle ouverte $T(p)$ et en déduire l'expression de son gain statique K_{B0} ainsi que l'ordre et la classe de $T(p)$.

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

Question 7 : Déterminer les fonctions de transfert $F(p)$ et $F_1(p)$ en fonction, entre autre, de K_{B0} , ξ et ω_0 .

On montre que si $F_e(t)$ est un échelon d'amplitude a , soit $F_e(t) = a.u(t)$, alors son influence sur la grandeur de sortie $x_2(t)$ est nulle en régime permanent. Il est donc possible de la négliger, ce qui conduit au schéma bloc simplifié de la Figure 9.

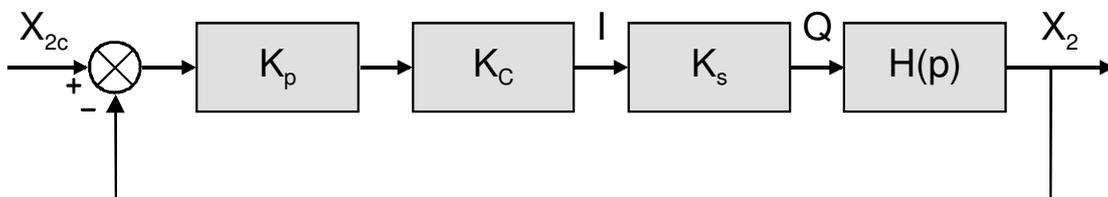


Figure 9 : Schéma bloc simplifié

Question 8 : Déterminer l'écart vis à vis de l'entrée principale $X_{2c}(p)$:

- pour une consigne $x_{2c}(t) = u(t)$ de type échelon unitaire ;
- pour une consigne $x_{2c}(t) = 0,1.t.u(t)$ de type rampe ;

En déduire la valeur du gain de boucle K_{B0} permettant de satisfaire les exigences du cahier des charges.

La Figure 10 représente la réponse en fréquence dans BODE de la fonction de transfert en boucle ouverte pour $K_{B0} = 1$.

Question 9 : En déduire la valeur de K_{B0} permettant de respecter la marge de gain spécifiée par le cahier des charges.

Question 10 : Calculer la nouvelle marge de phase en résultera t'il pour cette nouvelle valeur de K_{B0} ?

Question 11 : Conclure quant à la possibilité de satisfaire les exigences du cahier des charges avec un correcteur à action proportionnelle.

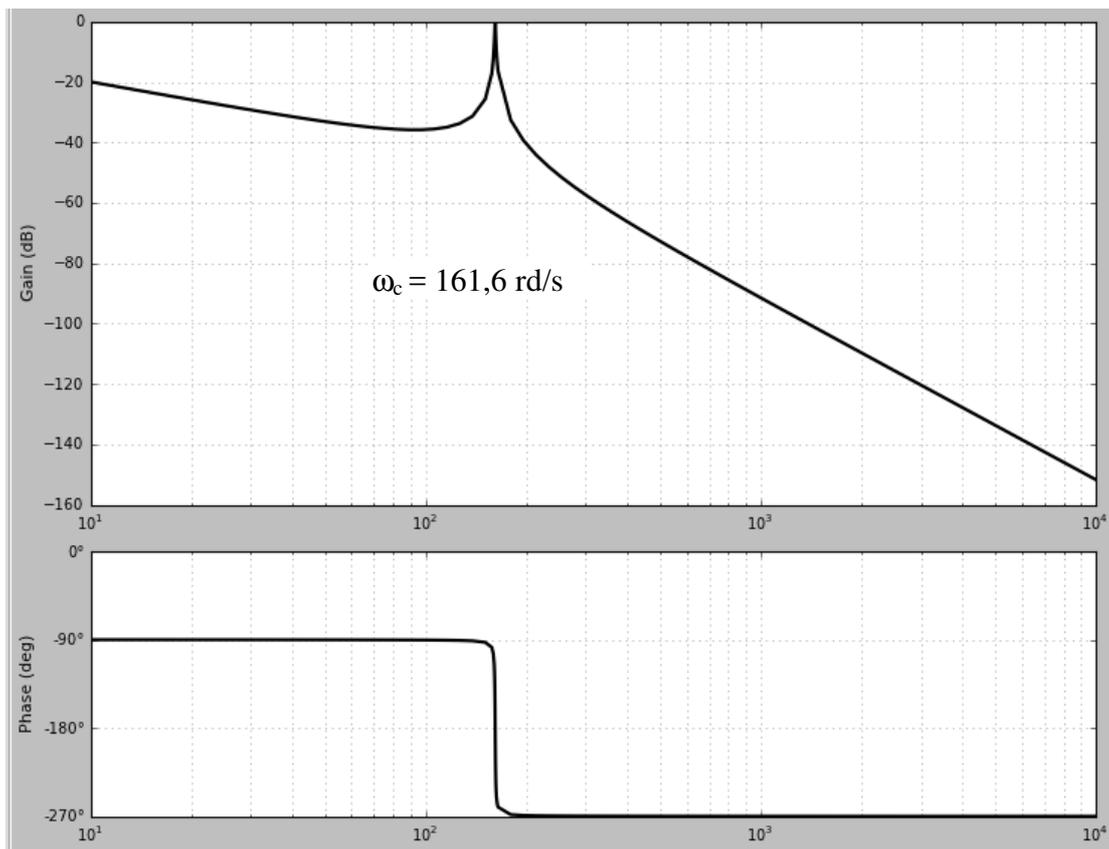


Figure 10 : Représentation dans Bode de la FTBO pour $K_{B0}=1$

2.3.2 Etude du correcteur

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

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

Caractéristiques du correcteur :

- le gain K_c du correcteur est choisi de telle sorte que la valeur du gain de boucle K_{B0} 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 $H(p)$.

Question 12 : Justifier les choix de la valeur du gain de boucle K_{B0} et celle du facteur d'amortissement ξ_c .

Question 13 : Déterminer l'expression de la fonction transfert en boucle ouverte corrigée $T_c(p)$.

Question 14 : Tracer sur le document réponse les représentations asymptotiques dans Bode de l'évolution du rapport d'amplitude $A(\omega)$ dB et du déphasage $\varphi(\omega)$ de la fonction de transfert en boucle ouverte corrigée $T_c(p)$. Vous effectuerez deux tracés pour ω_c supérieur à K_{B0} et pour ω_c inférieur à K_{B0} .

Question 15 : Dans quel cas la condition de stabilité est-elle assurée ? Justifier votre réponse.

Question 16 : En déduire, en considérant le tracé asymptotique de A dB, la valeur de la pulsation propre ω_c permettant de respecter une marge de phase de 60° .

Question 17 :

Conclure quant à la possibilité de satisfaire les exigences du cahier des charges avec ce type de correcteur.

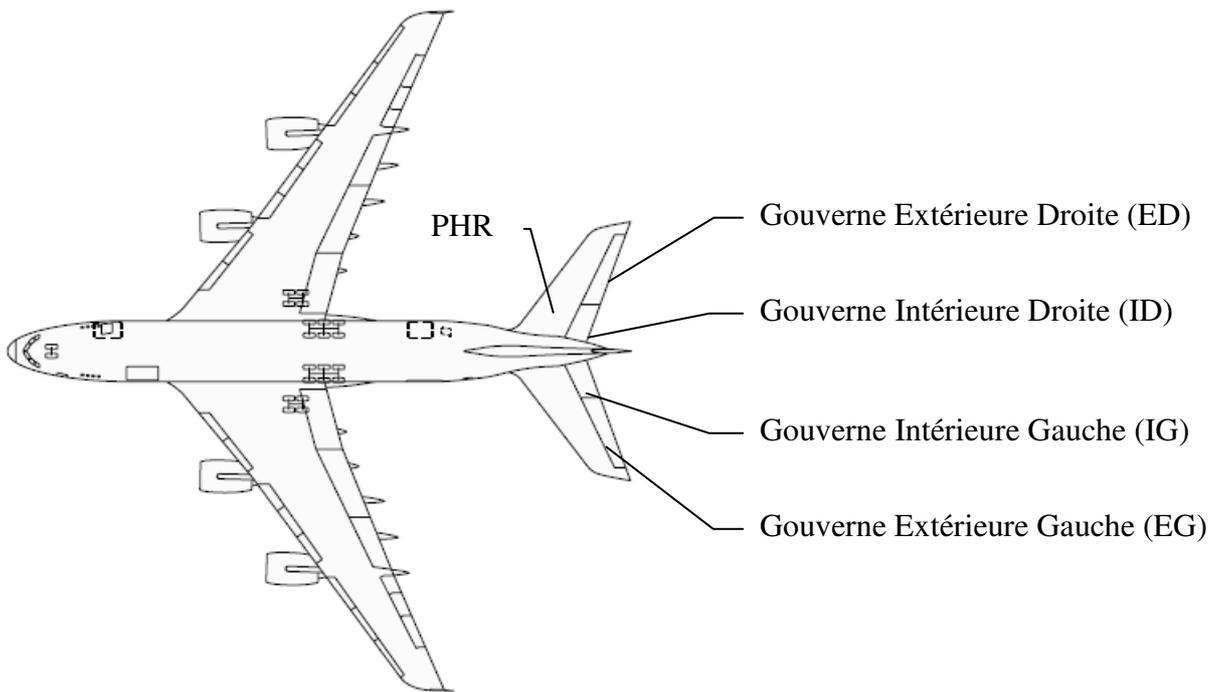


Figure 11 : Les gouvernes de profondeur

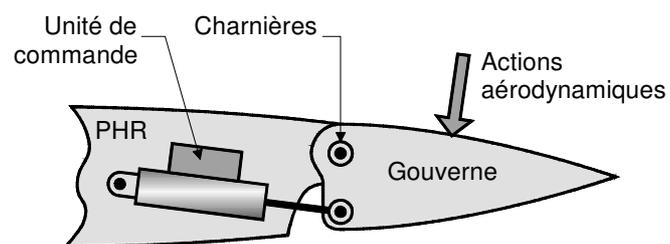
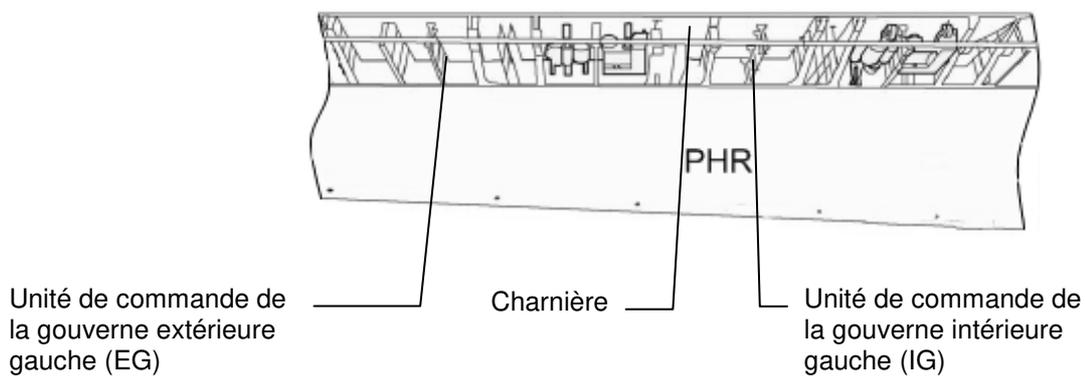


Figure 12 : Unités de commande des gouvernes gauches

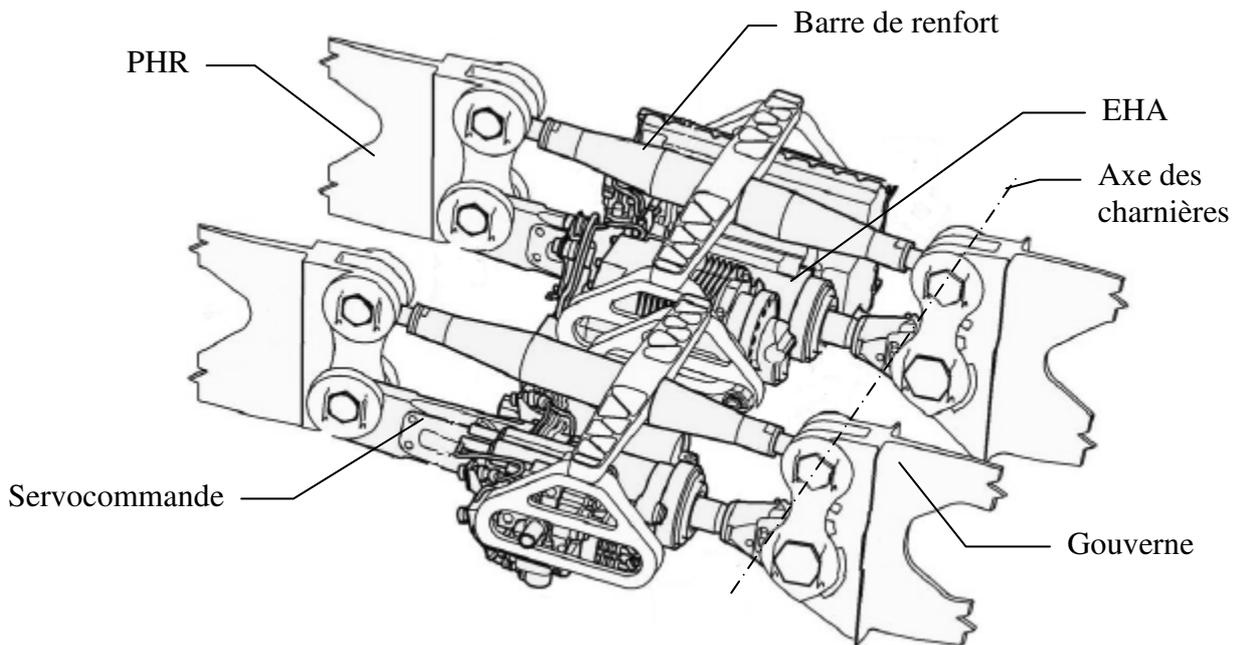


Figure 13 : Représentation partielle (sans les charnières) de l'unité de commande

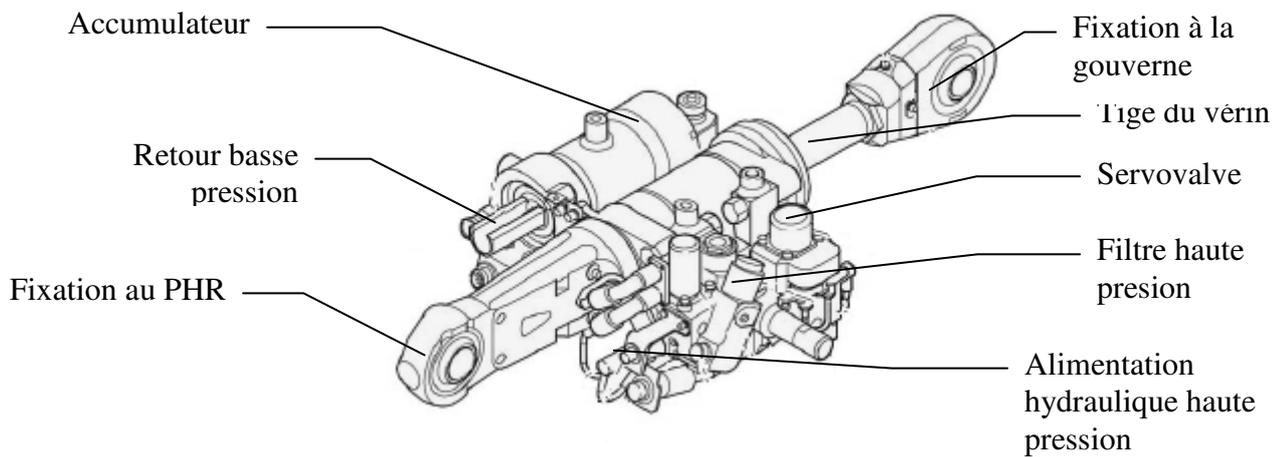


Figure 14 : Servocommande

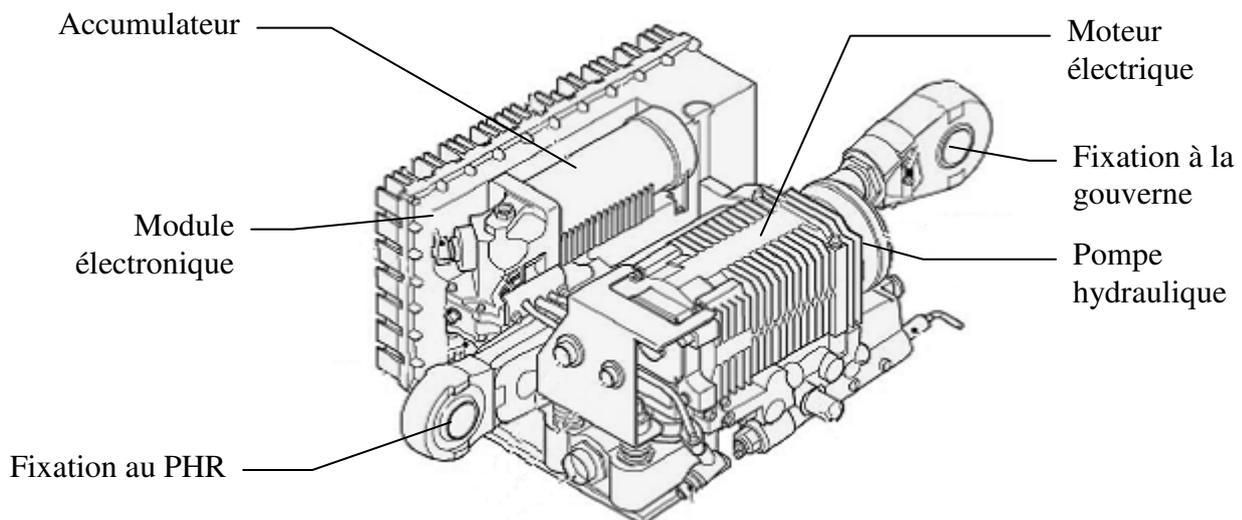
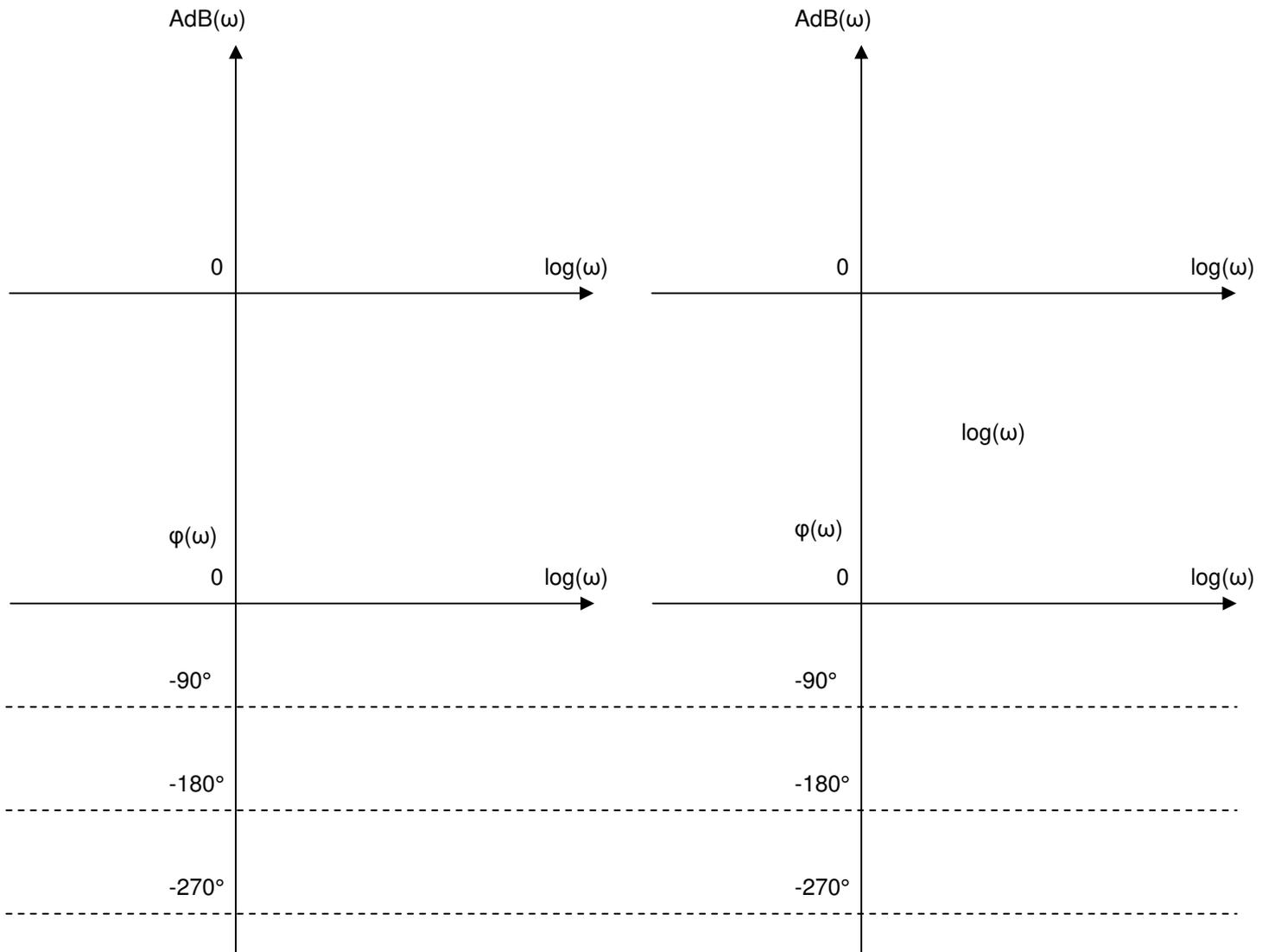


Figure 15 : EHA

DOCUMENT REPOSE



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



Tracés asymptotiques dans Bode de la FTBO corrigée $T_C(p)$ pour $\omega_c > K_{BO}$ et $\omega_c < K_{BO}$