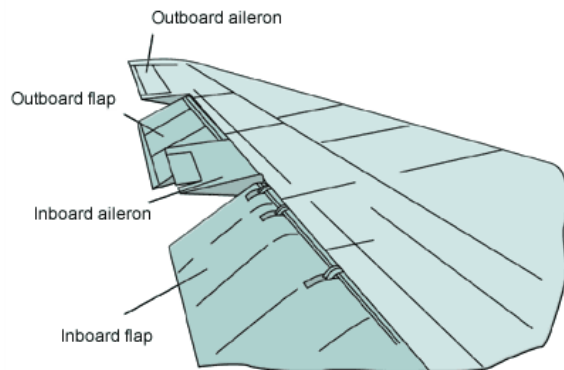
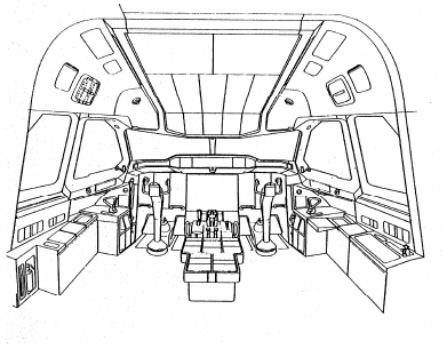


Analyse et Modélisation de la Servocommande

L'objectif de ce bureau d'étude est l'analyse du fonctionnement et de la compensation d'une servocommande électro-hydraulique montée sur un avion de transport, type A300, et commandant une gouverne, par exemple des aileron toutes vitesses.



La masse d'une gouverne est de l'ordre de 900kg. Pour la manœuvre à partir du manche à balais, un relais via la servocommande électro-hydraulique est nécessaire pour éviter au pilote de gros efforts.



Poste de pilotage A300

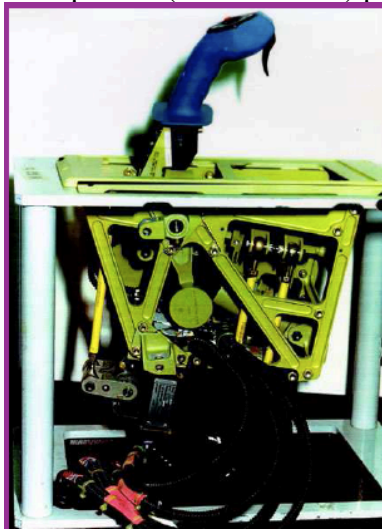
Les commandes de vol primaires

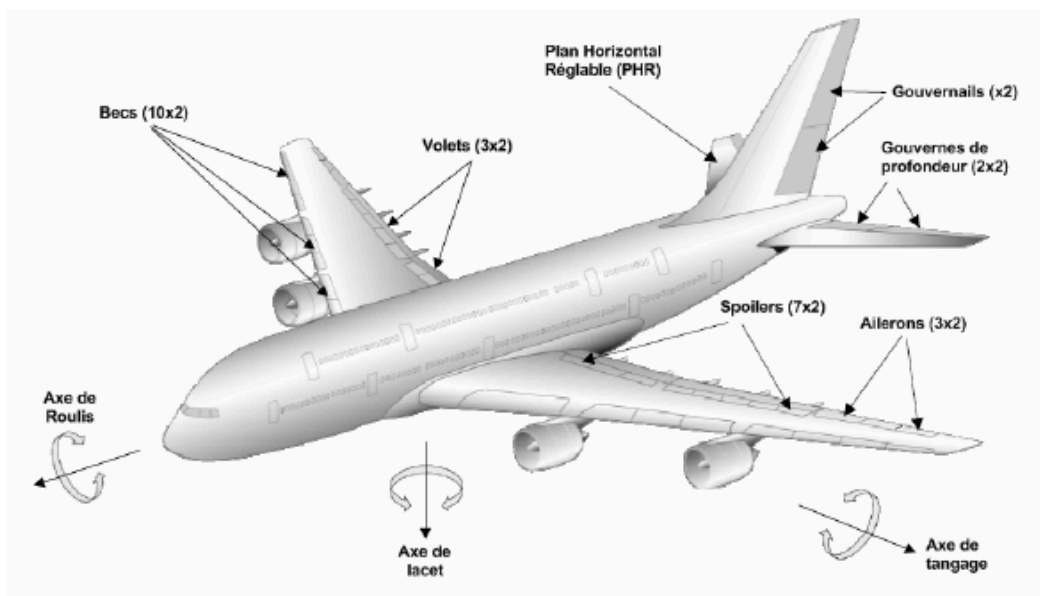
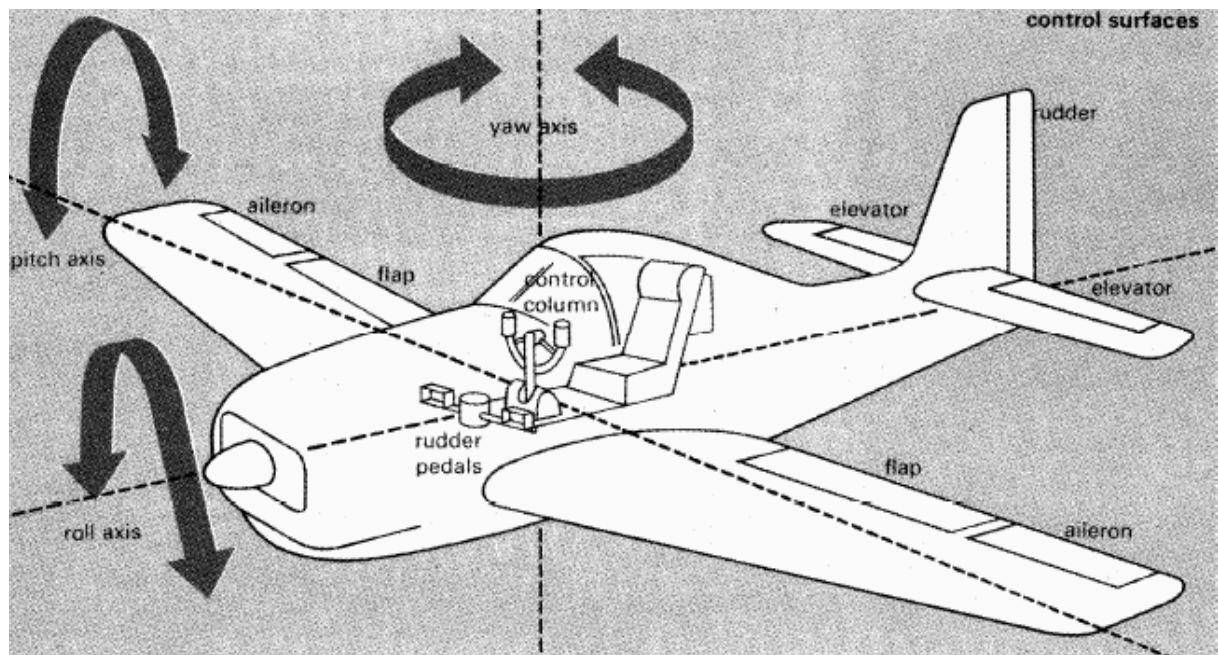
Pour piloter un avion, il est nécessaire de pouvoir contrôler en permanence ses évolutions dans l'espace suivant trois directions ou axes :

- 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 d'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.





Les asservissements hydrauliques sont des mécanismes d'une puissance massique élevée (KW/kg) permettant d'entraîner sur un faible parcours de lourdes charges avec précision, tout en assurant un temps de réponse relativement faible ($t_{5\%} \approx 0.1s$).



Ces asservissements bénéficiant d'une grande robustesse vis à vis de l'environnement et d'une importante fiabilité, indispensable en aéronautique : en triplant les circuits et les vérins le taux de panne global est inférieur à 10^{-9} par heure de vol.

Sécurité:

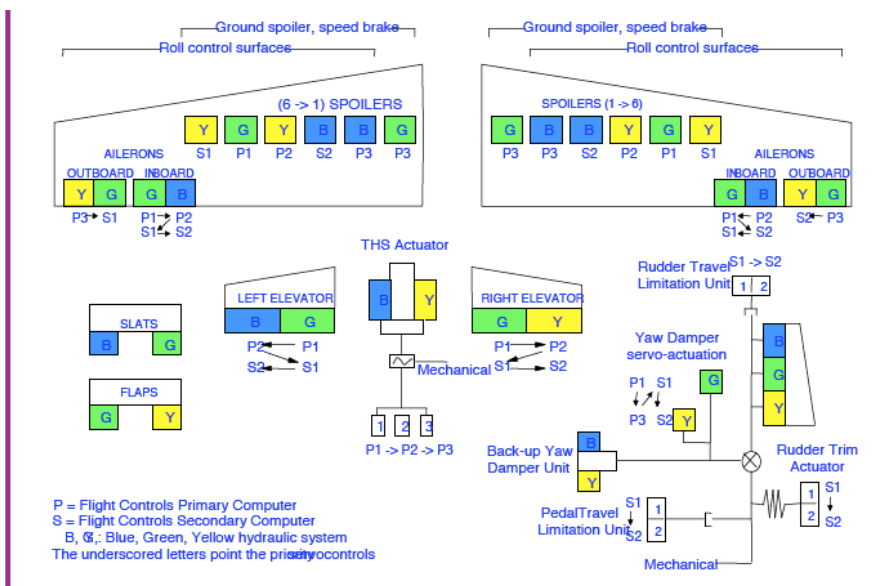
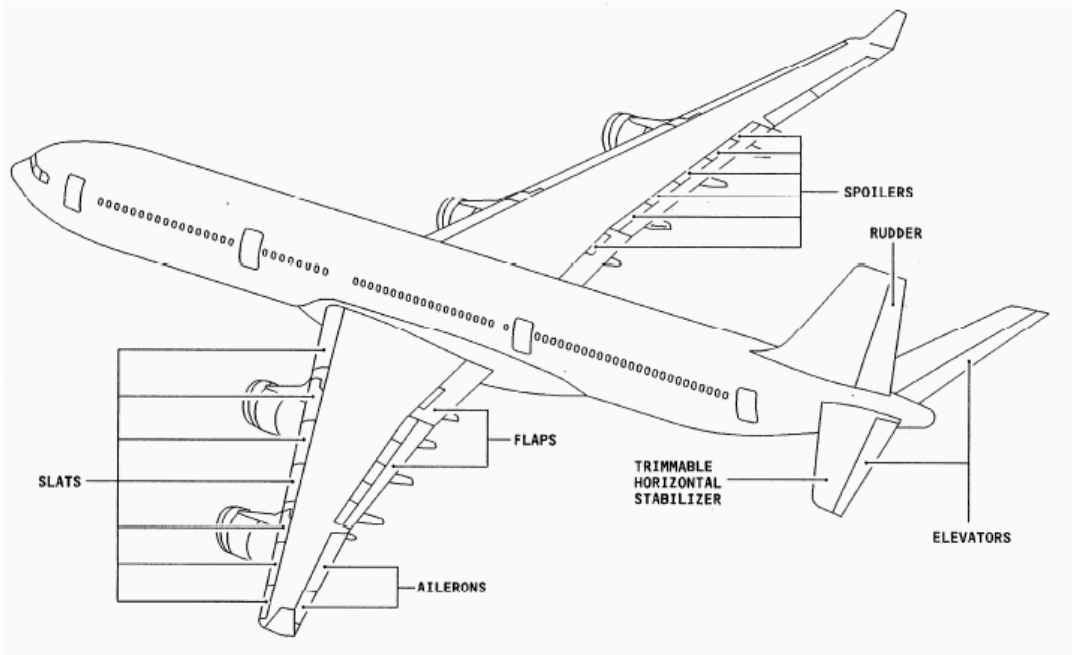
Les événements mettant en cause le bon fonctionnement du système sont caractérisés par la criticité de leur effet et leur probabilité d'occurrence.

La sécurité est l'adéquation des probabilités à la criticité de l'effet, selon des critères définis par la réglementation

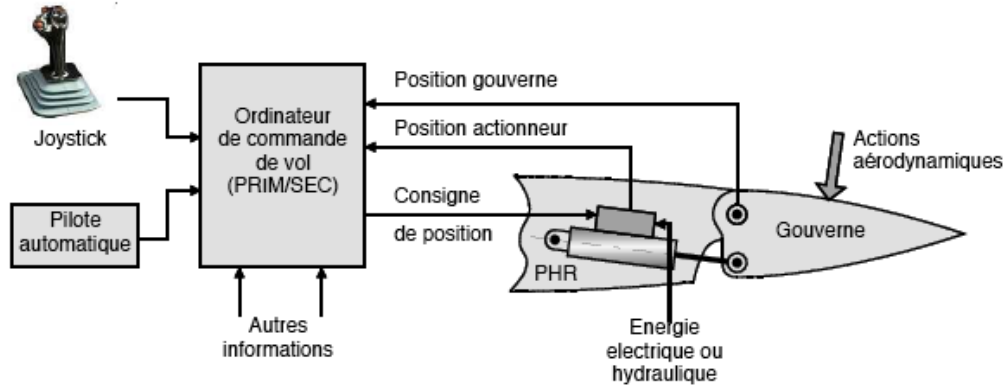
Une panne, ou une combinaison de pannes, dont l'effet est « Majeur » (augmentation de la charge de travail de l'équipage) ne doit pas survenir plus fréquemment que 1 fois toutes les 105 heures de vol. Une panne, ou une combinaison de pannes, dont l'effet est « Critique » (entraînant des blessés) ne doit pas survenir plus fréquemment que 1 fois toutes les 107 heures de vol.

Aucune panne simple ne doit avoir d'effet « Catastrophique » (perte de l'avion). Une combinaison de pannes dont l'effet est « Catastrophique » ne doit pas survenir plus fréquemment que 1 fois toutes les 109 heures de vol

Surfaces de commandes de vol



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. Ces derniers déterminent, en fonction de lois de pilotage prenant en compte un certain nombre de paramètres les mouvements de gouvernes limitant éventuellement l'évolution de l'avion à son enveloppe de vol.

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.

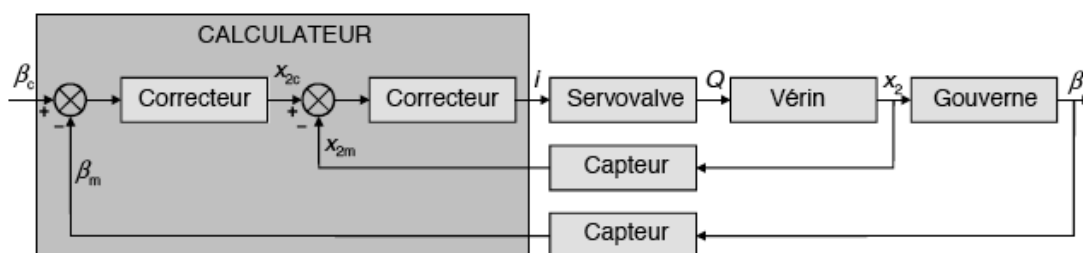
Les autres informations transmises aux ordinateurs de commande de vol proviennent essentiellement :

- Des gyromètres : vitesse de rotation autour des axes de tangage, lacet et roulis

- Des accéléromètres : accélération verticales et latérales.

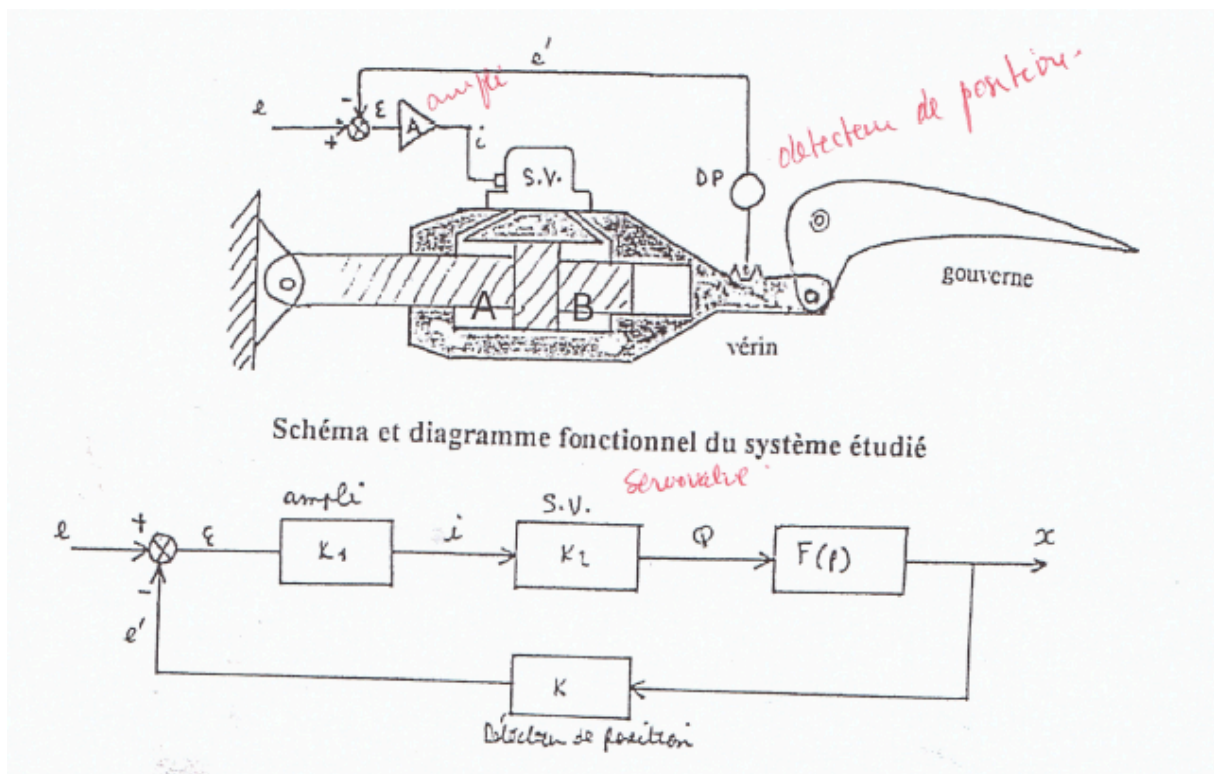
Exemple : Analyse de la fonction de Service FP2

On se propose d'étudier la réalisation de la fonction FP2 (Asservir en position la gouverne de profondeur)



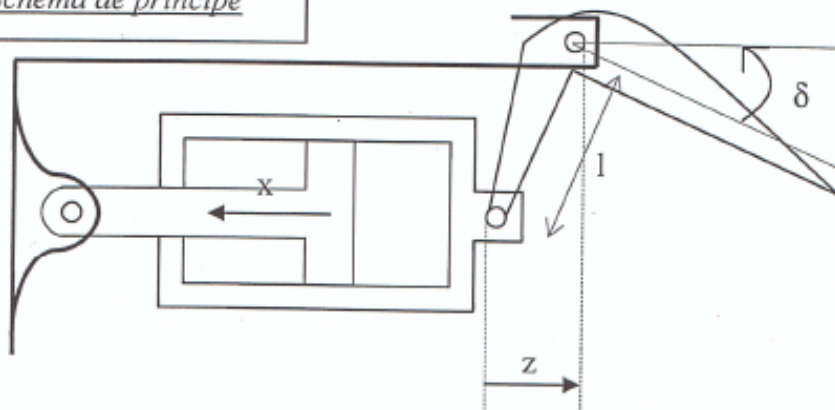
Fonction de transfert du vérin

La servovalve est un mécanisme électro-hydraulique qui transforme le courant i d'impulsion de commande en un débit hydraulique Q proportionnel. La servocommande envoie dans l'une des chambre un débit hydraulique Q qui crée une différence de pression entre les chambre A et B. Sous ce effet la chambre solidaire de la servovalve se translate selon l'axe du vérin et provoque le braquage de la gouverne.

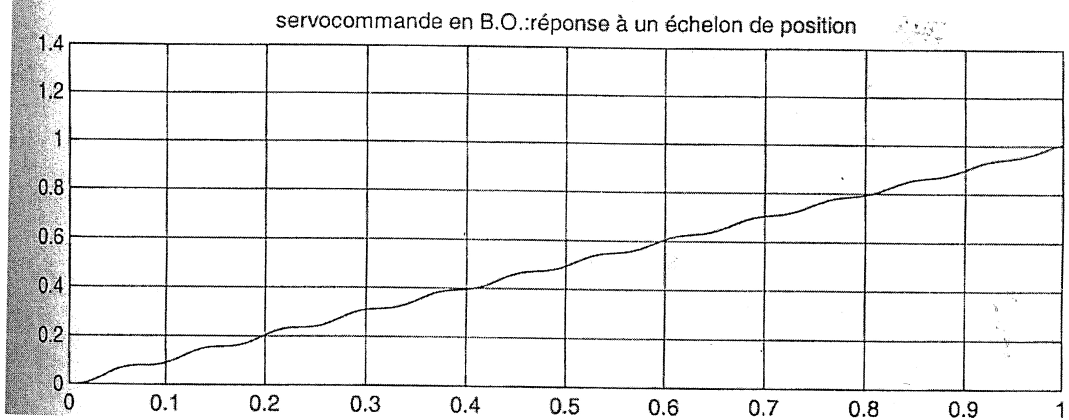
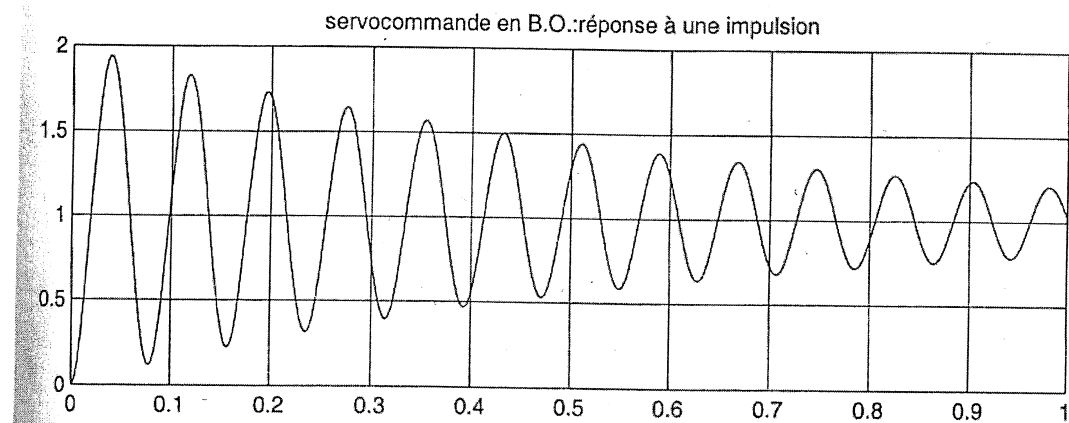


Dans la suite de notre étude, x représentera le déplacement du piston par rapport au corps du cylindre et z le déplacement du corps par rapport à la structure de l'avion.

Schéma de principe

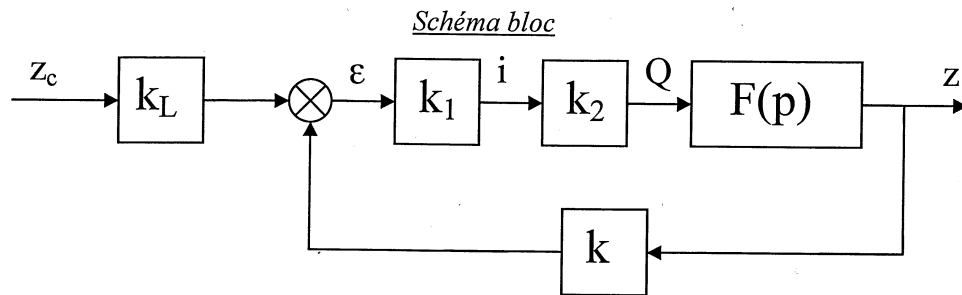


Equations du fonctionnement :



Réponses de la servocommande

A la lecture des courbes on remarque des oscillations, donc l'existence de plusieurs non-linéarités. Elles sont dues à la compressibilité de l'huile, aux différents jeux dans la timonière, à l'élasticité des matériaux.



avec $k=1 \text{ V/cm}$

$$F(p) = \frac{z}{Q}$$

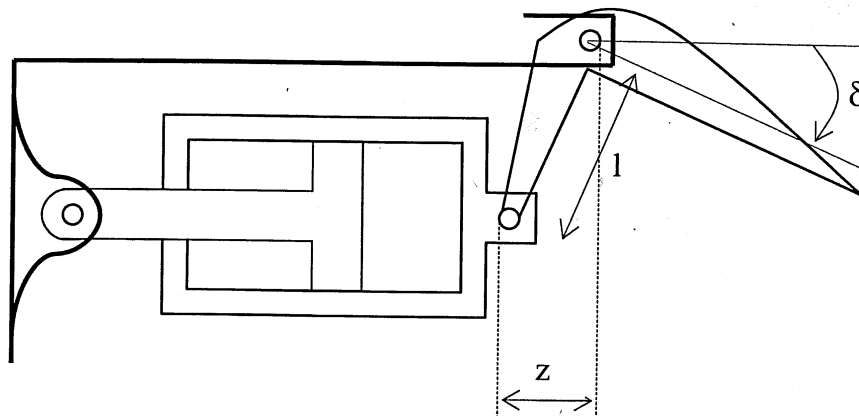
$$Q(t) = S \frac{dz(t)}{dt} \xrightarrow{L} Q(p) = pS z(p)$$

Donc

$$F(p) = \frac{1}{pS}$$

$$\frac{z(p)}{z_c(p)} = \frac{\frac{k_1 k_2}{Sp}}{1 + \frac{k_1 k_2}{Sp}} = \frac{1}{1 + p \frac{S}{K}}, K = k_1 k_2$$

Schéma de principe



Pour des petits déplacements, on peut linéariser :

$$z = l\delta$$

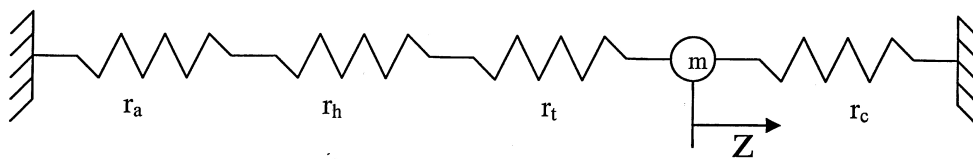
$$z_c = l\delta_c$$

et

$$\frac{\delta(p)}{\delta_c(p)} = \frac{1}{1 + \frac{pS}{K}}$$

Nous avons un système du 1^{er} ordre de gain statique 1 et de constante de temps S/K. Cela est contraire aux réponses de la servocommande à une impulsion ou à un échelon. Le système réel doit être supérieur ou égal à 2.

On peut schématiser la servocommande de la façon suivante :

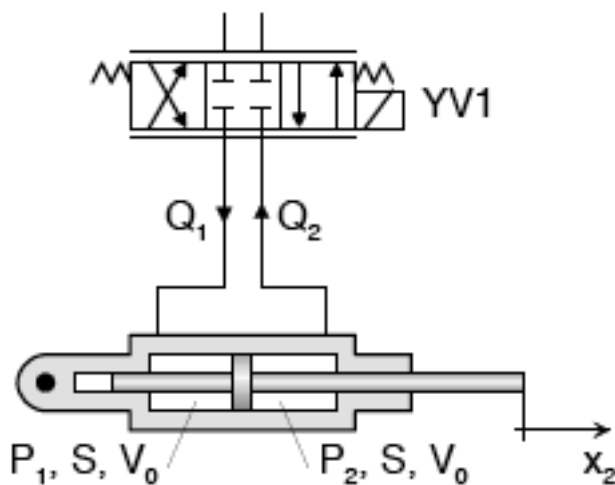


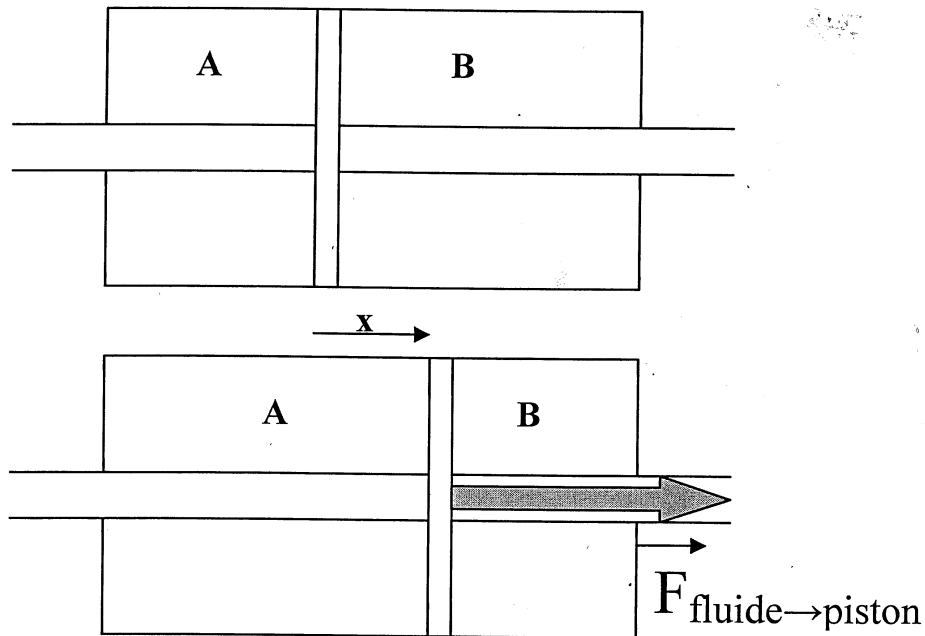
avec r_a : raideur d'ancrage 1000 daN/m
 r_h : raideur hydraulique
 r_t : raideur de timonerie $\approx 1000 \text{ daN/m}$
 r_c : raideur de charge

Calcul de la raideur hydraulique r_h

Par définition $r_h = \frac{\Delta F}{\Delta z}$

Représentons le piston quand la quantité d'huile dans chaque chambre ne varie pas :





La force résultante exercée par le fluide sur le piston s'écrit :

$$F_{\text{fluide} \rightarrow \text{piston}} = (P_B - P_A)S$$

$$\Delta F_{\text{fluide} \rightarrow \text{piston}} = (\Delta P_B - \Delta P_A)S$$

Introduisons alors le coefficient de compressibilité :

$$B = - \frac{\Delta P}{\frac{\Delta V}{V}}$$

$$\left. \begin{array}{l} \Delta V_A = S\Delta x \Rightarrow \Delta P_A = -\frac{BS\Delta x}{V_A} \\ \Delta V_B = -S\Delta x \Rightarrow \Delta P_B = \frac{BS\Delta x}{V_B} \end{array} \right\} \Rightarrow \Delta F_{\text{fluide} \rightarrow \text{piston}} = BS^2\Delta x \left(\frac{1}{V_A} - \frac{1}{V_B} \right)$$

$$r_h = BS^2 \left(\frac{1}{V_A} - \frac{1}{V_B} \right)$$

$$\text{A.N. : } V_A = V_B$$

$$r_h = 8.010^7 \text{ Nm}^{-1}$$

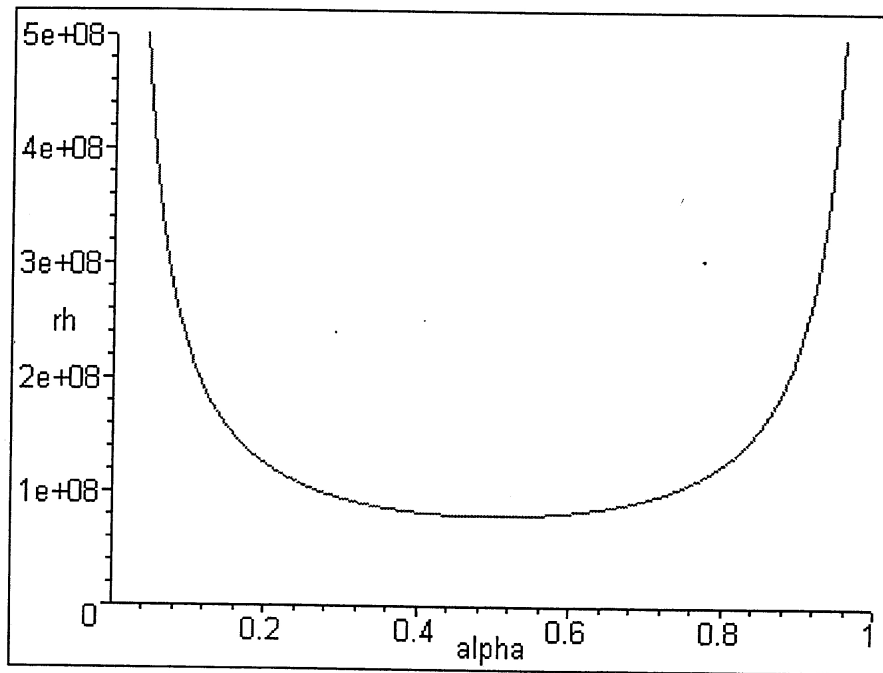
Remarque : On peut regarder ce qu'il passe lorsque l'hypothèse $V_A = V_B$

$$V_A = 2v(1 - \alpha)$$

$$V_B = 2v\alpha$$

$$r_h = BS^2 \left(\frac{1}{2v(1 - \alpha)} + \frac{1}{2v\alpha} \right)$$

On obtient :



Tracé de r_h en fonction de α

Calcul de la raideur de la charge r_c

Le moment de la charnière s'écrit :

$$M_C = \frac{1}{2} \rho v_{air}^2 S_G c 1.5 \delta$$

$$z = l \delta \Rightarrow \Delta z = l \Delta \delta$$

$$r_c = \frac{\Delta F}{\Delta z} = \frac{\Delta M_C}{l \Delta z} = \frac{\frac{1}{2} \rho v_{air}^2 S_G c 1.5 \Delta \delta}{l^2 \Delta \delta}$$

$$r_c = \frac{\frac{1}{2} \rho (aM)^2 S_G c 1.5}{l^2}$$

$$A.N.: r_c = 2.39 * 10^6 Nm^{-1}$$

Remarque : On peut donner une autre expression littérale de r_c faisant intervenir la pression dynamique à la place de ρ :

$$q = \frac{1}{2} \rho (aM)^2 = \frac{1}{2} \rho \gamma r T M^2 = 0.7 P M^2$$

$$r_c = \frac{\frac{1}{2} \rho (aM)^2 S_G c 1.5}{l^2}$$

$$r_c = \frac{0.7 P M^2 S_G c 1.5}{l^2}$$

Equation différentielle du mouvement du vérin

Le débit hydraulique dans le vérin est :

$$Q = \frac{dV}{dt} + \frac{V}{B} \frac{dP}{dt}$$

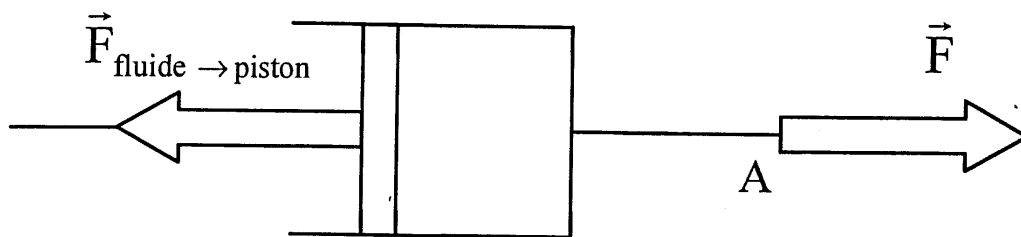
$$V = Sx \Rightarrow \frac{dV}{dt} = S \frac{dx}{dt}$$

$$Q_A = S \frac{dx}{dt} + \frac{V_A}{B} \frac{dP_A}{dt} \text{ et } Q_B = -S \frac{dx}{dt} + \frac{V_B}{B} \frac{dP_B}{dt}$$

$$Q = \frac{Q_A - Q_B}{2}$$

$$2Q = 2S \frac{dx}{dt} + \frac{V}{B} \frac{d(P_A - P_B)}{dt}$$

Appelons F la force exercée par le fluide sur le corps du vérin.

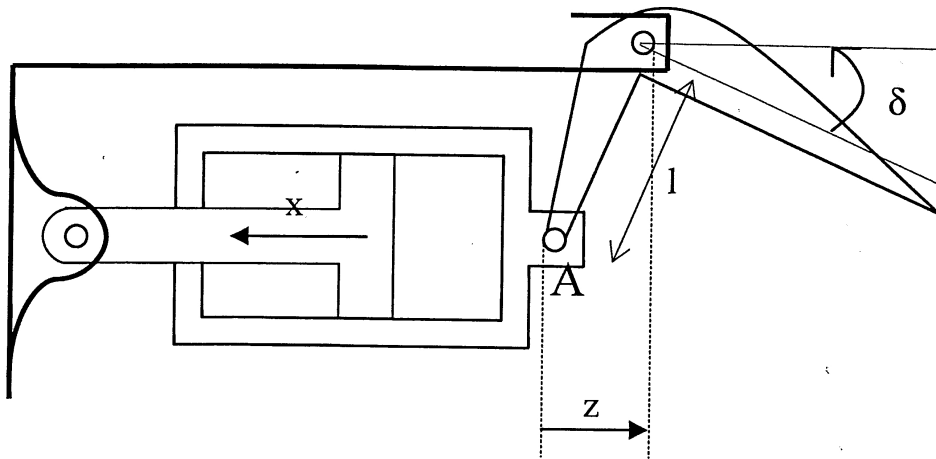


$$Q = S \left(\frac{dx}{dt} + \frac{1}{r_h} \frac{dF}{dt} \right)$$

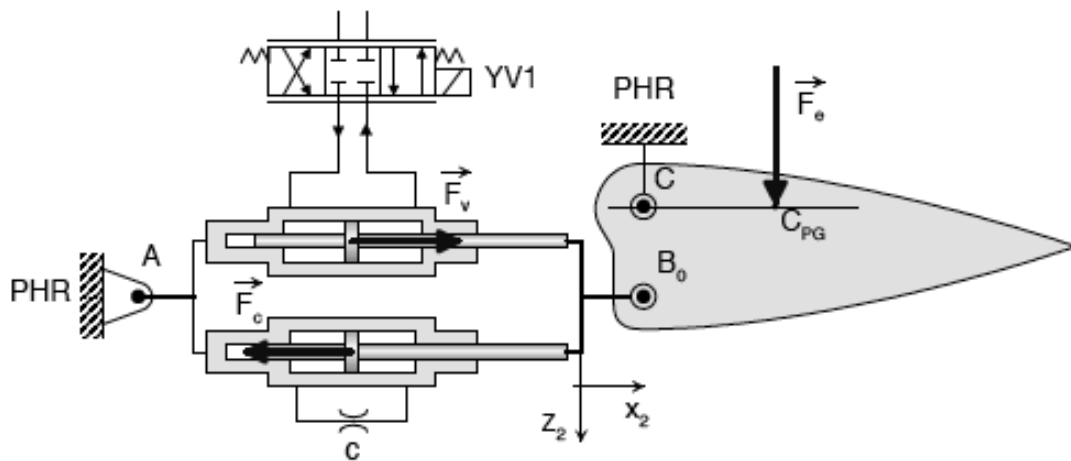
$$z = d_{\text{charge}/\text{structure}}^{\frac{F}{r_t}} + d_{\text{corps}/\text{piston}}^x + d_{\text{piston}/\text{structure}}^{\frac{F}{r_a}}$$

$$Q = S \left(\frac{dz}{dt} + \frac{1}{r} \frac{dF}{dt} \right) \text{ avec } \frac{1}{r} = \frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_t} + \frac{1}{r_h}$$

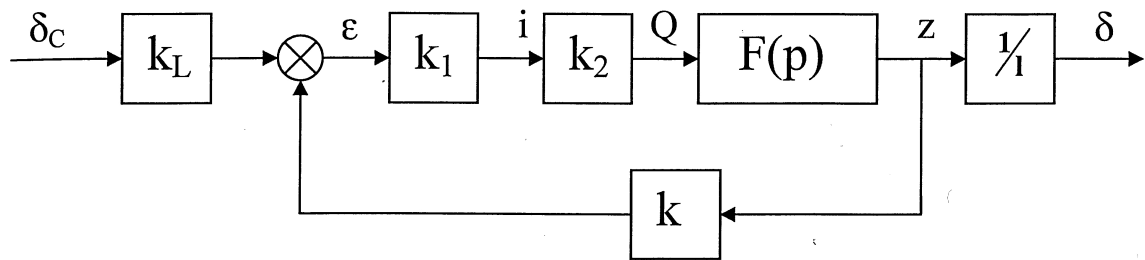
Appliquons le principe fondamental de la dynamique au point A :



$$m\ddot{z} = F - f\dot{z} - r_c z = \text{hydraulique} - \text{frottement} - \text{reaction aérodynamique}$$



Expression de la fonction de transfert en boucle ouverte



$$\begin{cases} Q = S \left(\frac{dz}{dt} + \frac{1}{r} \frac{dF}{dt} \right) \\ m \ddot{z} = -f \dot{z} - r_c z \end{cases}$$

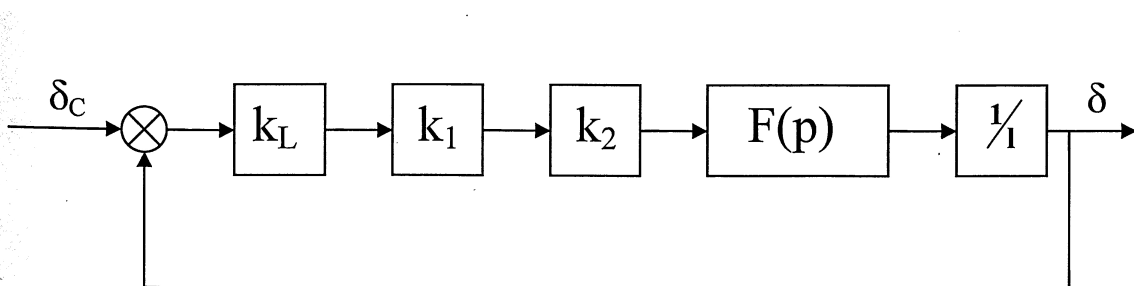
$$m \ddot{z} = -f \dot{z} - (r_c - r) z + \frac{r}{S} Q$$

$$mz(p)p^3 = -fz(p)p^2 - (r_c - r)z(p)p + \frac{r}{S}Q(p)$$

$$F(p) = \frac{z(p)}{Q(p)} = \frac{\frac{r}{S}}{mp^3 + fp^2 + (r_c + r)p}$$

$$F(p) = \frac{\frac{r}{S}}{p(mp^2 + fp + (r_c + r))}$$

Pour trouver la FTBO, on utilise le schéma bloc :



Alors :

$$FTBO(p) = k_L \frac{\frac{rkk_2}{S}}{p(mp^2 + fp + (r_c + r))}$$

$$FTBO(p) = k_L \frac{\frac{rkk_2}{S(r_c + r)}}{p\left(\frac{m}{r_c + r}p^2 + \frac{f}{r_c + r}p + 1\right)}$$

$$FTBO(p) = k_L G(p)$$

$$G(p) = \frac{\frac{rkk_2}{S(r_c + r)}}{p\left(\frac{m}{r_c + r}p^2 + \frac{f}{r_c + r}p + 1\right)}$$

$$A.N : r = 4.71 * 10^6 \text{ Nm}^{-1}$$

$$FTBO(p) = k_L \frac{828}{p(2.12 * 10^{-4} p^2 + 8.49 * 10^{-4} p + 1.51)}$$