

DSA NP/PP Samedi 17/10/16

84 → 11h30 SUJET1 Centrale Inertielle (24)

Présentation du sujet

Il est nécessaire de tester et d'étalonner les équipements inertiels embarqués dans un véhicule de type avion ou satellite, en vue de leur qualification. Ces équipements sont des centrales inertielles, des gyromètres, des gyroscopes ou tout système électronique de contrôle et de guidage.

Des tests permettent l'étalonnage de l'équipement inertiel mais aussi de conduire des essais de comportement de l'équipement sous des conditions sévères ou encore de faire des mesures de résistance à la fatigue.

Une centrale inertielle (voir l'annexe en fin d'énoncé) est un système de navigation entièrement autonome muni en général de trois gyroscopes, de trois accéléromètres et d'un calculateur qui permet à un engin mobile de connaître en temps réel sa position et sa vitesse dans l'espace.

Le système étudié ici est destiné à effectuer des tests dynamiques et statiques sur des équipements inertiels embarqués dans tout type de véhicules (terrestres, marins, aériens et spatial).

Le sujet proposé concerne un testeur pouvant recevoir une enceinte pressurisée et régulée en température (c'est-à-dire climatisée) à l'intérieure de laquelle est installé l'équipement inertiel.

Ce testeur est en fait un robot constitué par conséquent d'une partie opérative représentée sur la figure 1 ci-dessous et d'une partie commande munie d'un pupitre et d'un écran de contrôle.

La partie opérative est munie de deux axes pilotés par la partie commande et assurant un asservissement en mode vitesse et en mode position, de façon synchronisée ou indépendante, sur ces deux axes.

En robotique de manière simplifiée, on nomme « axe », pour axe numérique, chaque degré de mobilité de la partie opérative, asservi en vitesse et en position.

Ci-dessous, on peut voir le premier axe toujours horizontal (l'axe Thêta) actionné par deux motoréducteurs M1 et M1' et le deuxième axe normal au plan du plateau circulaire (l'axe Phi) actionné par un motoréducteur M2.

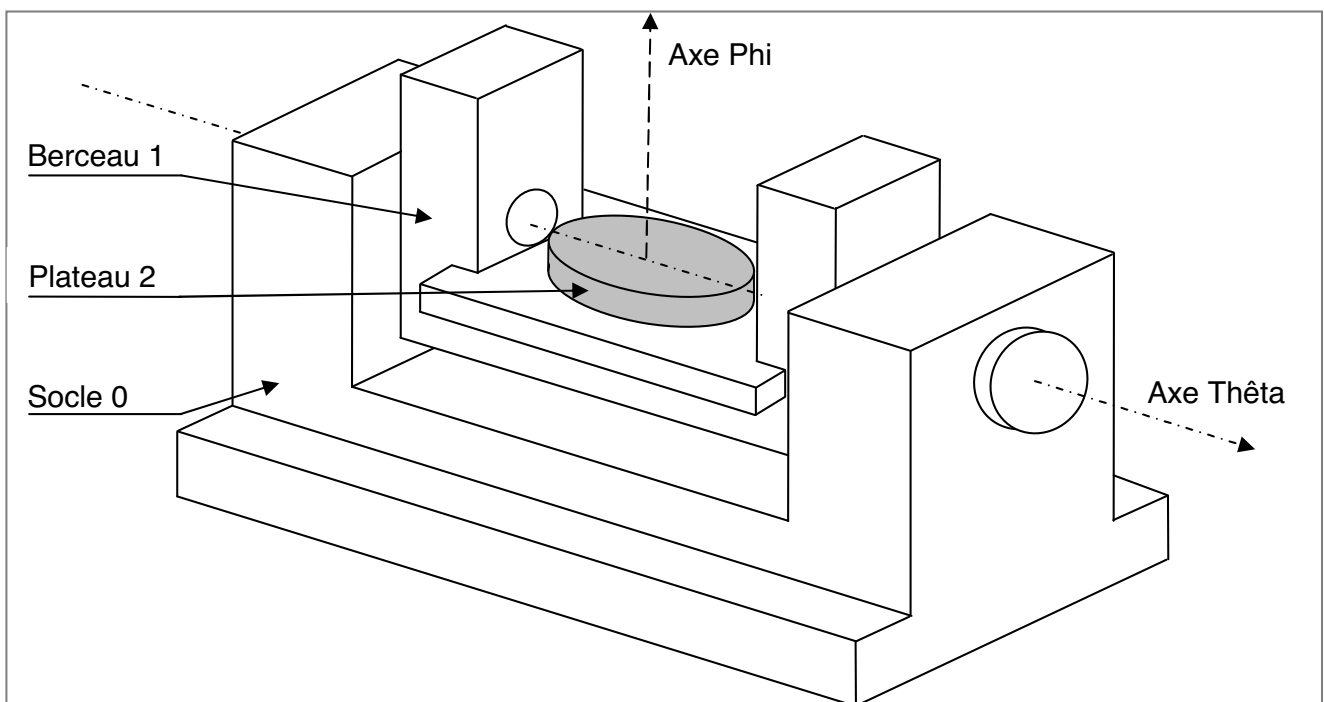


Figure 1 : la partie opérative du testeur

Le testeur présenté ici est ainsi muni d'une partie opérative constituée de 2 axes en série, perpendiculaires entre eux et à motorisations indépendantes.

Le premier axe est actionné par deux moteurs montés à chaque extrémité et commandés simultanément.

Le deuxième axe est actionné par un troisième moteur indépendant des deux premiers.

Chaque moteur est donc nécessairement munis d'un « codeur » c'est-à-dire d'un capteur mesurant la position angulaire du rotor par rapport au stator.

Caractéristiques de la partie opérative :

PERFORMANCES		AXE Phi	AXE Thêta
Charge centrée 80 Kg			
Volume charge Ø 700 x 500 mm			
Orthogonalité des axes 2 "			
Intersection des axes 0,05 mm	POSITION	Phi : φ	Thêta : θ
Dimensions (H x L) 1500 x 3200 mm			
Masse de la table 1150 Kg			
Masse de la partie commande 300 Kg			
Puissance consommée 25 KW	Précision		
		$\pm 5'' = \pm 5/3600 \text{ deg}$	$\pm 5'' = \pm 5/3600 \text{ deg}$
	Résolution		
		10^{-3} deg	10^{-3} deg
	VITESSE maxi		
		50 deg.s^{-1}	50 deg.s^{-1}
	Précision		
		0,001 %	0,001 %
	ACCÉLÉRATION maxi		
		100 deg.s^{-2}	35 deg.s^{-2}

On rappelle que un degré d'angle vaut soixante minutes d'angle et trois mille six cents secondes d'angle soit 1 deg = 60' = 3600''.

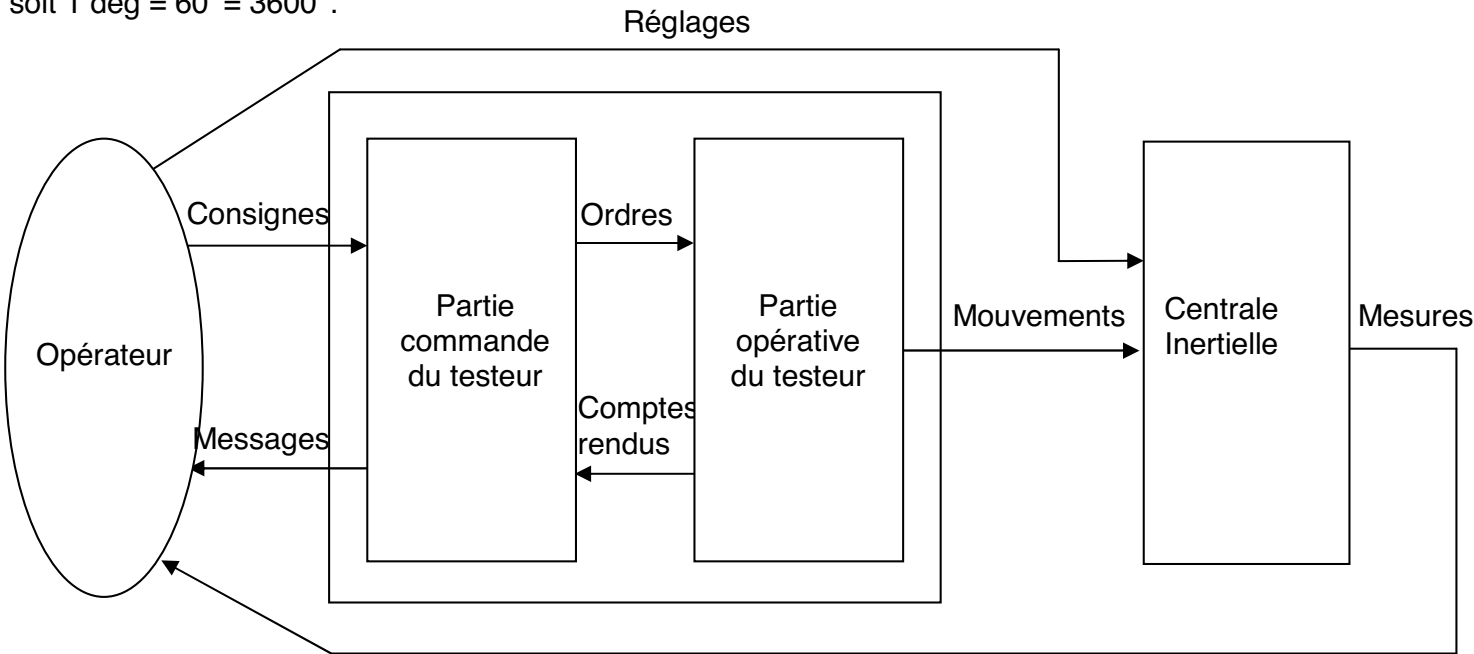


Figure 2 : la chaîne fonctionnelle

Le testeur dans sa phase de qualification d’une centrale inertielle sera l’objet de notre étude.

Diagramme simplifié des interacteurs pour cette phase de vie :

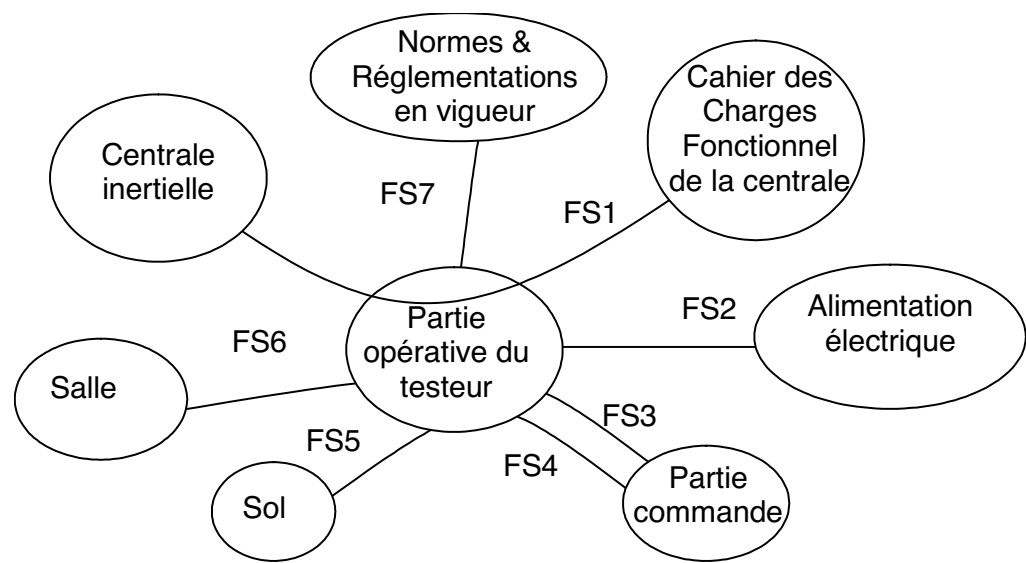


Figure 3 : le diagramme simplifié des interacteurs

Description des Fonctions de Services :

- FS1** : la partie opérative du testeur doit permettre de qualifier une centrale inertielle vis-à-vis du Cahier des Charges Fonctionnel.
- FS2** : la partie opérative du testeur doit être alimentée en énergie électrique.
- FS3** : la partie opérative du testeur doit répondre aux ordres de la partie commande.
- FS4** : la partie opérative du testeur doit informer la partie opérative de sa position en temps réel.
- FS5** : la partie opérative du testeur doit être stabilisée sur le sol.
- FS6** : la partie opérative du testeur doit pouvoir évoluer dans l’espace de travail d’une salle.
- FS7** : la partie opérative du testeur doit s’adapter aux normes et aux réglementations en vigueur.

Caractérisation de la Fonction de Service FS1 :

Qualification	Critère	Niveau
Guidage de l’axe Thêta	Limiter le rotulage	1’’ maxi soit 1/3600 deg maxi
Guidage de l’axe Thêta	Respecter la coaxialité	Ø 0,03 mm maxi
Guidage de l’axe Phi	Limiter le rotulage	1’’ maxi soit 1/3600 deg maxi
Guidage de l’axe Phi	Respecter la coaxialité	Ø 0,02 mm maxi
Contrôle de la position	Maintenir la position	±5’’ = ± 5/3600 deg
Contrôle de la vitesse	Respecter la vitesse	0,001%
...		

Étude de la Fonction de Service FS1 : Qualifier une centrale inertielle.

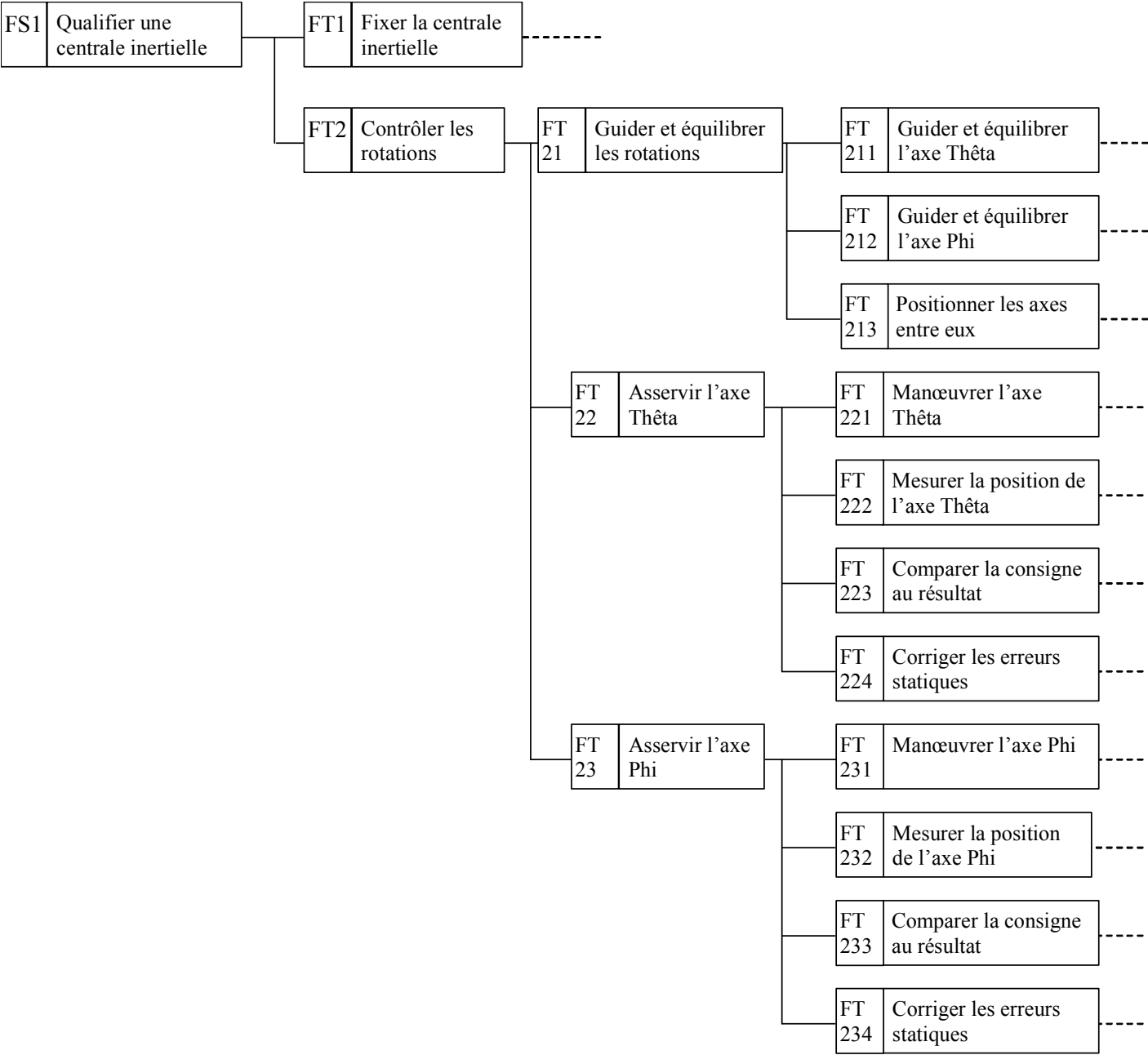


Figure 4 : FAST partiel

La centrale inertielle subit un test d'étalonnage où chaque axe du testeur est commandé séparément.

Dans ce sujet nous nous intéresserons au contrôle des déplacements des axes lors d'un de ces tests qui passe par un asservissement en position angulaire et en vitesse de rotation des axes équilibrés au mieux.

FONCTION TECHNIQUE FT132 : ASSERVIR LA VITESSE DE L'AXE PHI

Objectif de l'étude : Valider les performances de la boucle d'asservissement en vitesse de l'axe Phi.

Caractérisation de la Fonction de Service FS1 :

Qualification	Critère	Niveau
Stabilité	Respecter les marges de phase et de gain	Marge de phase : $M_{\varphi} = 45^{\circ}$ Marge de gain : $MG = 10 \text{ dB}$
Sensibilité aux perturbations de couple	Être insensible aux perturbations	Vitesse constante avec ou sans perturbation : $\Delta N = 0$

On souhaite effectuer une procédure d'étalonnage d'une centrale inertielle c'est-à-dire asservir en vitesse la chaîne de puissance de l'axe Phi du testeur.
Ce dernier est composé d'un moteur à courant continu, d'un variateur et d'un réducteur de vitesse.

Pour simplifier l'étude et obtenir cependant un bon ordre de grandeur, le variateur et le réducteur de vitesse ne sont pas pris en compte dans la chaîne d'action dans l'étude suivante.
Le moteur principal de l'axe Phi de la partie commande du testeur a les caractéristiques suivantes (Extrait des documents Leroy Somer) :

Modèle du moteur	Puissance nominale	Vitesse nominale	Couple moteur nominal	Tension nominale	Intensité nominale	Résistance d'induit	Inductance d'induit	Moment d'inertie à vide
MS 1322 M	12 kW	2320 tr.min^{-1}	49 N.m	460 V	25,9 A	$1,32 \Omega$	0,65 H	$0,05 \text{ kg.m}^2$

MODÉLISATION DU MOTEUR

Le comportement linéarisé du moteur autour de son point d'équilibre est modélisé par les quatre équations suivantes :

Équation mécanique :

Équation électrique :

Équation de couplage tension – vitesse :

Équation de couplage couple – intensité :

$c_m(t) + c_r(t) = J_{eq}.d\omega(t)/dt$

$u(t) = R.i(t) + e(t) + L. di(t)/dt$

$e(t) = k_e.\omega(t)$

$c_m(t) = k_t.i(t)$

Avec :

- $c_m(t)$ est le couple fourni par le moteur

$\omega(t)$ est la vitesse de rotation du rotor en rad.s^{-1}

$i(t)$ est l'intensité dans l'induit du moteur

R est la résistance d'induit
- $c_r(t)$ est le couple résistant perturbateur appliqué à l'arbre moteur

$u(t)$ est la tension d'alimentation du moteur

$e(t)$ est la force électromotrice du bobinage du moteur

L est l'inductance d'induit

$J_{eq} = 28 \text{ kg.m}^2$ est l'inertie équivalente rapportée à l'arbre moteur de l'ensemble entraîné $S = \{ 2 \text{ U } 3 \}$.

Hypothèse simplificatrice :
les constantes de couplage mécanique k_t et électromoteur k_e seront supposées égales, notées $k = k_e = k_t$, et valent $k \approx 1,89 \text{ [u.s.i.]}$

On cherche à représenter le fonctionnement du moteur sous la forme du schéma bloc ci-contre en utilisant les quatre équations précédentes et en supposant des conditions initiales nulles.

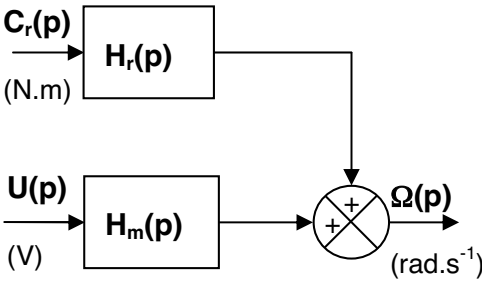


Figure 7 : Schéma bloc

Les deux fonctions de transfert $H_m(p)$ et $H_r(p)$ sont notées :

$$H_m(p) = \frac{k_m}{1 + \frac{2.z}{\omega_0} \cdot p + \frac{p^2}{\omega_0^2}} \quad \text{et} \quad H_r(p) = \frac{k_r \cdot (1 + \tau \cdot p)}{1 + \frac{2.z}{\omega_0} \cdot p + \frac{p^2}{\omega_0^2}} \quad \text{sous leurs formes canoniques.}$$

Q1) Déterminer les expressions des gains statiques k_m et k_r , de la constante de temps τ , du facteur d'amortissement z et de la pulsation propre ω_0 . Effectuer les applications numériques.

ÉTUDE DES PERFORMANCES EN CHAÎNE DIRECTE

Selon des usages courants, on notera systématiquement pour toute la suite du problème :

- $\omega(t)$: la vitesse de rotation du rotor exprimée en radians par seconde (rad.s^{-1})
- $N(t)$: la même vitesse de rotation du rotor mais exprimée en tours par minute (tr.min^{-1})

On se propose tout d'abord d'étudier un modèle simplifié de mise en énergie :
on applique un échelon de tension d'amplitude $U_0 = 460 \text{ V}$ aux bornes du moteur.

Celui-ci ayant atteint, en régime permanent, la vitesse de rotation nominale $N_0 = 2320 \text{ tr.min}^{-1}$, l'utilisation de la climatisation dans l'enceinte crée brusquement un couple résistant perturbateur au niveau du joint tournant. Ce couple résistant perturbateur est modélisable par un échelon d'amplitude $C_{r0} = -25 \text{ N.m}$.

On note N_{r0} la nouvelle vitesse de rotation du moteur en régime permanent exprimée en tours par minute.

Q2) Influence de cette perturbation en régime permanent :

- Déterminer les expressions littérales de N_0 (en tr.min^{-1}) et de N_{r0} (en tr.min^{-1}) en fonction de U_0 , C_{r0} , k_r et k_m (en unités du système international).
- En déduire l'erreur statique (en tr.min^{-1}) c'est-à-dire ici l'écart $\Delta N = N_0 - N_{r0}$ en fonction de C_{r0} et k_r .
- Faire l'application numérique de ΔN .

ÉTUDE DE LA BOUCLE FERMÉE

Afin de réduire la sensibilité du moteur aux perturbations extérieures, c'est-à-dire au couple résistant perturbateur, on boucle le système en comparant la tension de consigne à la tension image de la vitesse de rotation du moteur.

Cette tension image est produite par le capteur incrémental supposé proportionnel et donc de fonction de

$$\text{transfert : } H_{\text{capteur}}(p) = \frac{V(p)}{\Omega(p)} = a.$$

On insère également dans le système un correcteur de fonction de transfert $C(p)$.

On peut donc représenter le système selon les deux schémas blocs équivalents suivants :

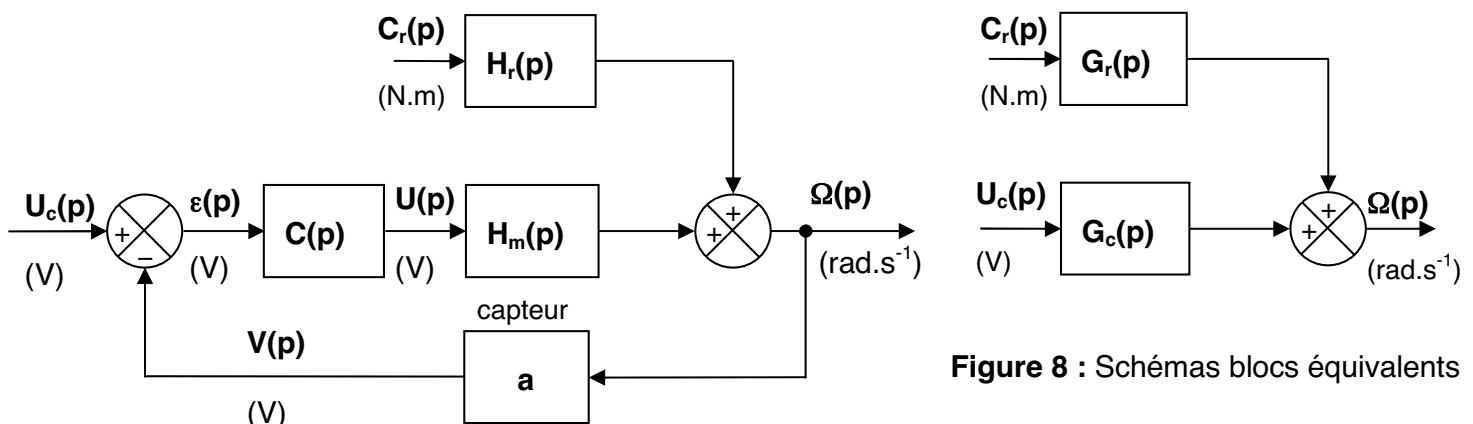


Figure 8 : Schémas blocs équivalents

Q3) Exprimer $G_c(p)$ et $G_r(p)$ en fonction de $H_r(p)$, $H_m(p)$, $C(p)$ et a .

ÉTUDE DU SYSTÈME ASSERVI NON CORRIGÉ

Le système est non corrigé donc $C(p) = 1$.

On suppose que la dynamique de la tension de commande permet au système de rester en fonctionnement linéaire.

Le capteur incrémental est défini tel que : $a.k_m = 1$.

Q4) Mettre $G_C(p)$ et $G_R(p)$ sous forme canonique et donner les expressions des gains statiques G_{C0} et G_{R0} , du facteur d'amortissement z^* et de la pulsation propre ω_0^* des fonctions $G_C(p)$ et $G_R(p)$ en fonction des gains k_m , k_r , du facteur d'amortissement z et de la pulsation propre ω_0 . Effectuer les applications numériques sans oublier que $a.k_m = 1$.

Q5) Le système asservi non corrigé est-il plus rapide ou plus lent que la chaîne directe si on leur applique une entrée échelon ? Justifier.

a) Étude de la stabilité du système asservi non corrigé

Le moteur est représenté par la fonction de transfert : $H_m(p) = \frac{\Omega(p)}{U(p)} = \frac{0,5}{(1 + 10.p).(1 + 0,5.p)}$. On considère ici

que le système n'est pas perturbé donc que le couple résistant perturbateur est nul, soit $C_r(p) = 0$.

On note $H_a(p) = \frac{V(p)}{\varepsilon(p)}$ la fonction de transfert en boucle ouverte non corrigée (voir figure 8 avec $C(p) = 1$).

Q6) Exprimer $H_a(p)$ en fonction de $H_m(p)$. Comme ici $C(p) = 1$ et $a.k_m = 1$ déduire numériquement la fonction de transfert en boucle ouverte non corrigée $H_a(p)$.

On appelle respectivement $G_{dB-i}(\omega)$ et $\varphi_i(\omega)$ les expressions analytiques du gain (en dB) et de la phase (en rad) de la fonction de transfert $H_i(p)$.

Le diagramme de Bode de $H_m(p)$ est donné sur le document réponse DR2.

Q7)

- Sur le document réponse DR2, tracer en bleu les diagrammes asymptotiques en gain et en phase de la fonction de transfert $H_m(p)$ puis en rouge ceux de la fonction de transfert en boucle ouverte $H_a(p)$; il est demandé de préciser clairement les valeurs :
 - des pulsations de cassures
 - des pentes des asymptotes de gains,
 - des gains aux intersections des asymptotes
 - des valeurs des phases asymptotiques.
- De quelle manière obtient-on donc le diagramme de Bode de $H_a(p)$ à partir de celui de $H_m(p)$?
- Donner la valeur de la différence de gain ΔG et la valeur de la différence de phase $\Delta \varphi$ tels que $G_{dB-a}(\omega) = G_{dB-m}(\omega) + \Delta G$ et $\varphi_a(\omega) = \varphi_m(\omega) + \Delta \varphi$.

En appliquant le critère du Revers, on pourrait vérifier ici que le système asservi non corrigé a un niveau de stabilité nettement supérieur à celui exigé par le Cahier des Charges Fonctionnel.

b) Sensibilité à la perturbation du système asservi non corrigé

On applique en consigne un échelon de tension d'amplitude U_{c0} permettant d'obtenir une vitesse de rotation en régime permanent de $N_0 = 2320 \text{ tr.min}^{-1}$ quand le couple résistant perturbateur est nul.

Brusquement on applique un couple résistant perturbateur modélisable par un échelon d'amplitude $C_{r0} = -25 \text{ N.m}$. On note N_{i0} la nouvelle vitesse de rotation du moteur en régime permanent et l'écart $\Delta N = N_0 - N_{i0}$.

Q8) Donner, par analogie avec la question (Q2), l'expression de ΔN et sa valeur numérique.

ÉTUDE DU SYSTÈME ASSERVI CORRIGÉ

a) Correction proportionnelle

On utilise maintenant un correcteur proportionnel de gain K_P donc $C(p) = K_P$.

On note $H_b(p) = \frac{V(p)}{\varepsilon(p)}$ la fonction de transfert en boucle ouverte corrigée par le correcteur proportionnel.

On considère ici que le système n'est pas perturbé donc que $C_r(p) = 0$. On a toujours $a.km = 1$.

Q9) Donner l'expression de la fonction de transfert $H_b(p)$ en fonction de K_P (voir figure 8).

Q10) Déterminer graphiquement, sur le document réponse DR2, les valeurs de la pulsation ω_1 et du gain $G_{dB-b}(\omega_1)$, coordonnées du point dont la phase $\varphi_b(\omega_1) = -135^\circ$.

On appelle MG la marge de gain et M_φ la marge de phase du système asservi.

Q11) Stabilité du système asservi avec correction proportionnelle :

- Évaluer la valeur de K_P pour que la marge de phase M_φ soit voisine de 45° .
- Sur le document DR2, tracer en vert les courbes réelles $G_{dB-b}(\omega)$ et $\varphi_b(\omega)$ pour cette valeur de K_P .
- Que vaut la marge de gain MG ?

On pourrait vérifier ici que si on augmente K_P , on réduit ΔN . Mais en contre partie, on peut aussi vérifier en appliquant le critère du Revers, que le système asservi corrigé présente un niveau de stabilité qui devient inférieur à celui exigé par le Cahier des Charges Fonctionnel.

Ce correcteur proportionnel n'est donc pas satisfaisant.

b) Correction proportionnelle et intégrale

A partir d'un système proportionnel de gain K_P^* et d'un système intégrateur pur de gain K_i , placés en parallèles, on réalise un correcteur proportionnel intégral.

Q12) Faire un schéma et montrer que la fonction de transfert du correcteur proportionnel intégral est de la forme : $C(p) = K(1+T.p)/p$.

Q13) Sur votre copie tracer le diagramme asymptotique de Bode de ce correcteur seul. Compléter avec l'allure des courbes réelles. Indiquer toutes ses valeurs caractéristiques (les pentes des asymptotes et la pulsation, le gain, les phases au point de cassure).

On note $H_c(p) = \frac{V(p)}{\varepsilon(p)}$ la fonction de transfert en boucle ouverte corrigée par le correcteur proportionnel et intégral.

On considère ici que le système n'est pas perturbé donc que $C_r(p) = 0$. On a toujours $a.km = 1$.

Q14) Donner l'expression de $H_c(p)$ en fonction de K et T en particulier (voir figure 8).

A l'aide d'un logiciel de simulation on obtient un réseau de 4 courbes qui sont les lieux de transfert dans le plan de Black de la fonction de transfert en boucle ouverte corrigée par le correcteur proportionnel et intégral pour quelques valeurs de K et de T (voir figure 9 ci-dessous).

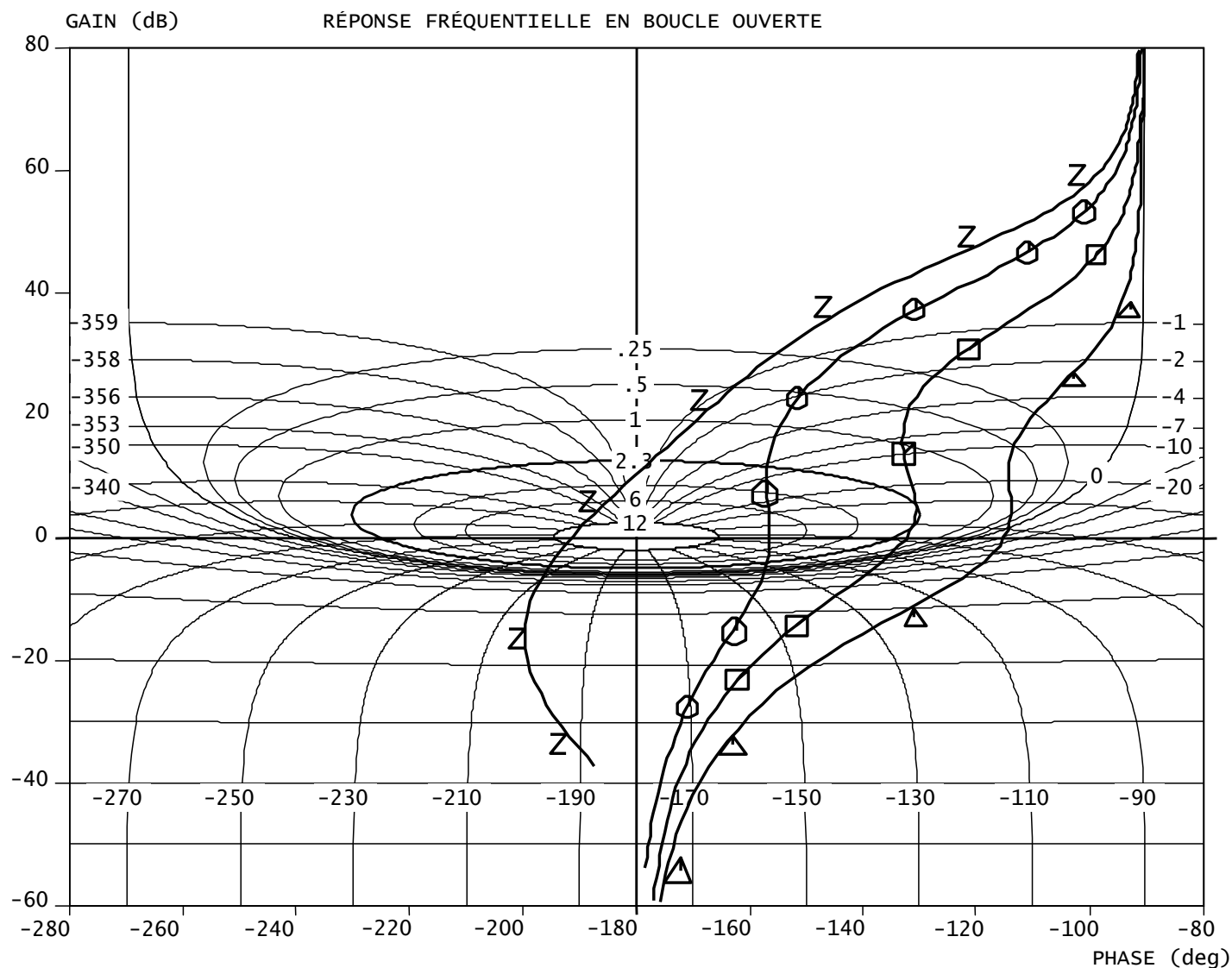


Figure 9 : Lieux de transfert

Chaque courbe correspond à un couple de valeur de K et de T différent selon le tableau suivant :

Courbe et cas	1	2	3	4
Repère	z	O	□	Δ
K	10	10	4	1
T (s)	0,1	1	2,5	5

Q15) Reproduire le tableau suivant sur votre copie et indiquer pour les 4 cas :

- si le système asservi est stable ou instable selon le critère du revers,
- une évaluation de la marge de gain,
- une évaluation de la marge de phase.

Cas	1	2	3	4
Stabilité				
Marge de gain				
Marge de phase				

On considère ici qu'une marge de gain supérieure à 10 dB et qu'une marge de phase supérieure à 45° permet d'assurer un bon niveau de stabilité pour le système asservi.

Q16) Ce niveau de stabilité est-il atteint ? Dans quel(s) cas ? S'il existe au moins 2 possibilités choisir le cas le plus favorable en terme de rapidité. Justifier.

Q17) Donner les équations qui définissent le point critique de stabilité et en déduire la condition limite de stabilité reliant K et T.
Dans le cas 1, pour $T=0.1$ trouver la condition de stabilité sur K.

Q18) Le système asservi avec correction proportionnelle et intégrale est-il encore sensible à la perturbation ? Justifier.

Conclusion de l'étude : On a donc vérifié partiellement la qualité de l'asservissement de l'axe Phi conformément au Cahier des Charges Fonctionnel.

Annexe : Centrale inertielle

Une centrale inertielle est un système de navigation entièrement autonome muni en général de trois gyroscopes (mesure de la vitesse angulaire du mobile par rapport au référentiel galiléen), de trois accéléromètres (mesure de l'accélération du mobile par rapport au référentiel galiléen) et d'un calculateur qui permet à un engin mobile de connaître en continu sa position et sa vitesse par rapport à un référentiel terrestre.

Chaque gyroscope est consacré à une mesure angulaire qui permet de mesurer une variation dans l'attitude d'un engin mobile. L'attitude est définie par trois angles (le roulis, le tangage et le lacet), il faut donc trois gyroscopes.

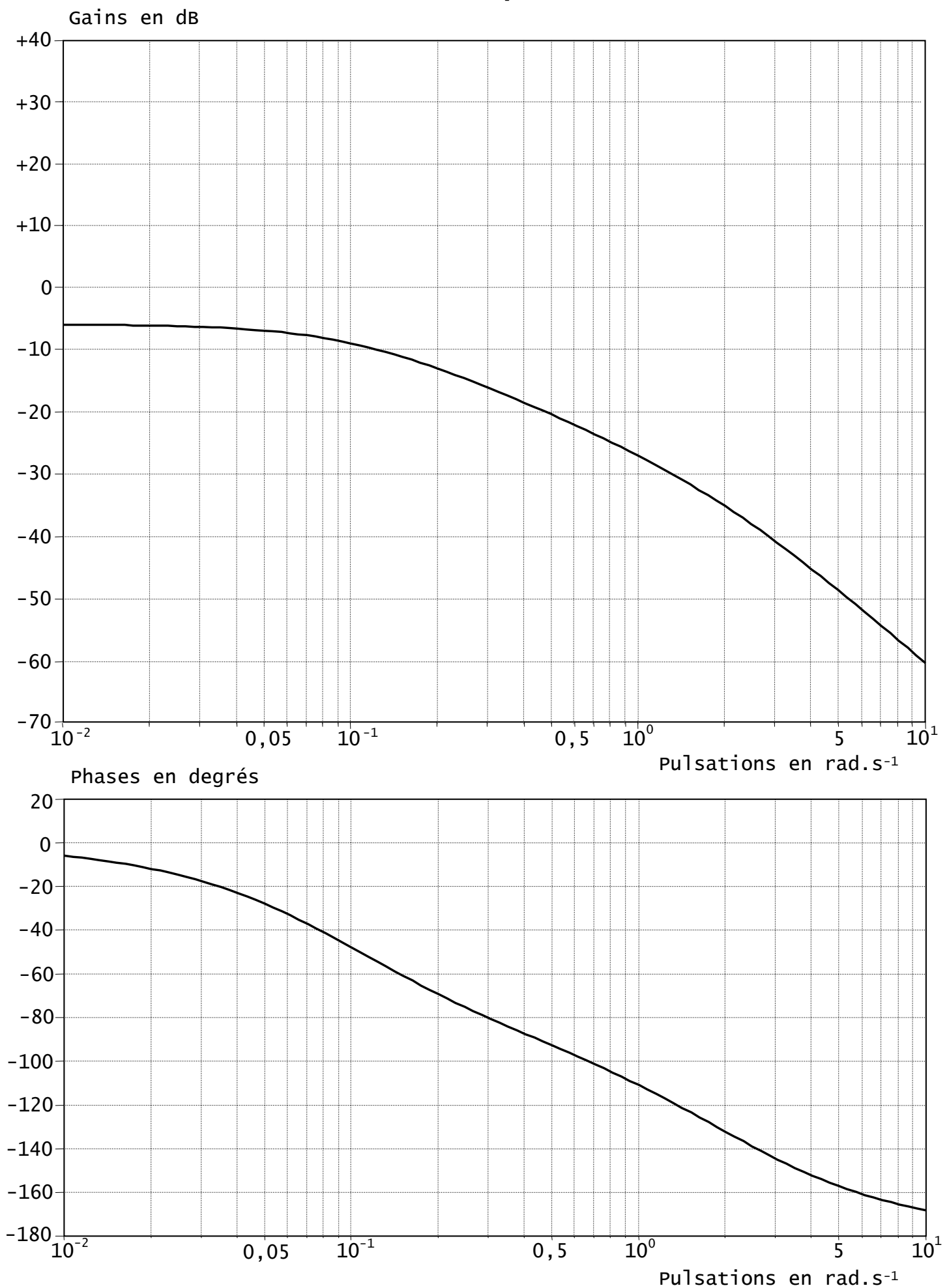
Le calculateur à partir des informations données par les gyroscopes et les accéléromètres délivre la position et la vitesse (sous entendu position et vitesse d'un point de référence lié au mobile).

En fait, il doit faire une intégration de l'accélération pour évaluer la vitesse, puis une intégration de la vitesse pour évaluer la position.

Tous les avions modernes (civils ou militaires) sont équipés de telles centrales.



Document Réponse DR2 :



ANNEXE

Pulsation de coupure a 0 dB : ω_{c0} , $G_{dB}(\omega_{c0})=0$ ou $G(\omega_{c0})=1$

Pulsation critique : ω_c , $\varphi(\omega_c) = -180^\circ$

Marge de gain : $MG = -G_{dB}(\omega_c) = -20 \log |H_{bo}(j \omega_c)|$

Marge de Phase : $MP = 180^\circ + \varphi(\omega_{c0})$

Point Critique : $H_{bo}(j\omega) = -1$

$$\star |H_{bo}(j\omega)| = 1 ; |H_{bo}(j\omega)|_{dB} = 0dB$$

$$\text{Arg}(H_{bo}(j\omega)) = -180^\circ$$

N.B. : les documents réponses DR3 et DR4 (pages 7 et 8) sont à compléter et à

1. Présentation du problème

1.1. Le moteur GE 90

La Société Nationale d'Etudes et de Construction des Moteurs d'Avions (S.N.E.C.M.A.) produit des moteurs d'avions civils et militaires. Elle développe, entre autres, le GE 90, un moteur de forte poussée pour avions gros porteurs qui équipe depuis 1995 les Boeing B777. Le compresseur du GE90 est réalisé en étages (tronçons cylindriques) qu'il faut assembler par soudure.

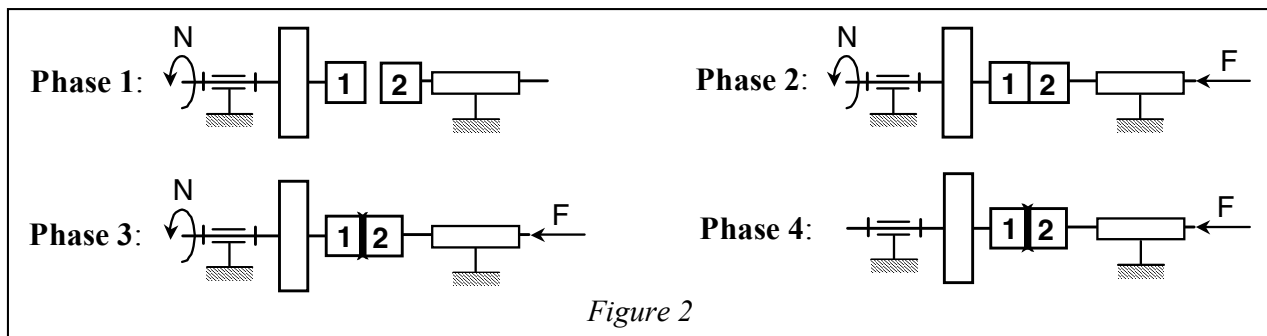
1.2. Le soudage par friction inertielle

Le soudage par fusion permet d'assembler deux pièces en dépassant localement la température de fusion des matériaux. Il modifie les caractéristiques de ces matériaux et, en particulier, fait chuter de façon significative la durabilité des pièces en fatigue. Ce procédé ne permet pas, en particulier, de satisfaire la durée de vie des moteurs imposée par la Société Boeing.

Le soudage par friction inertielle permet l'assemblage sans atteindre la température de fusion. Il altère peu la qualité métallurgique des matériaux. De plus, la rapidité d'exécution de l'opération de soudage entraîne une réduction des coûts de production et il est possible de souder des matériaux très différents. Le but de cette étude est de valider les performances du système de soudage par friction inertielle utilisé par la SNECMA pour souder les différents éléments du rotor du moteur GE 90.

1.3. Le principe du soudage par friction inertielle

Le principe du soudage de deux pièces (notées 1 et 2) peut être décrit en quatre phases:



Phase 1 ($t \leq t_0$) : La pièce à souder n° 1, solidaire d'un ensemble de volants d'inertie, est mise en rotation grâce à un moteur hydraulique. Quand la vitesse de rotation N a atteint la vitesse de soudage N_s désirée, l'alimentation du moteur hydraulique est coupée. La pièce à souder n°1 est alors libre en rotation.

Phase 2 ($t_0 < t \leq t_1$) : Un vérin hydraulique de poussée amène la pièce à souder n°2 en contact avec la pièce n°1 et exerce l'effort F nécessaire au soudage.

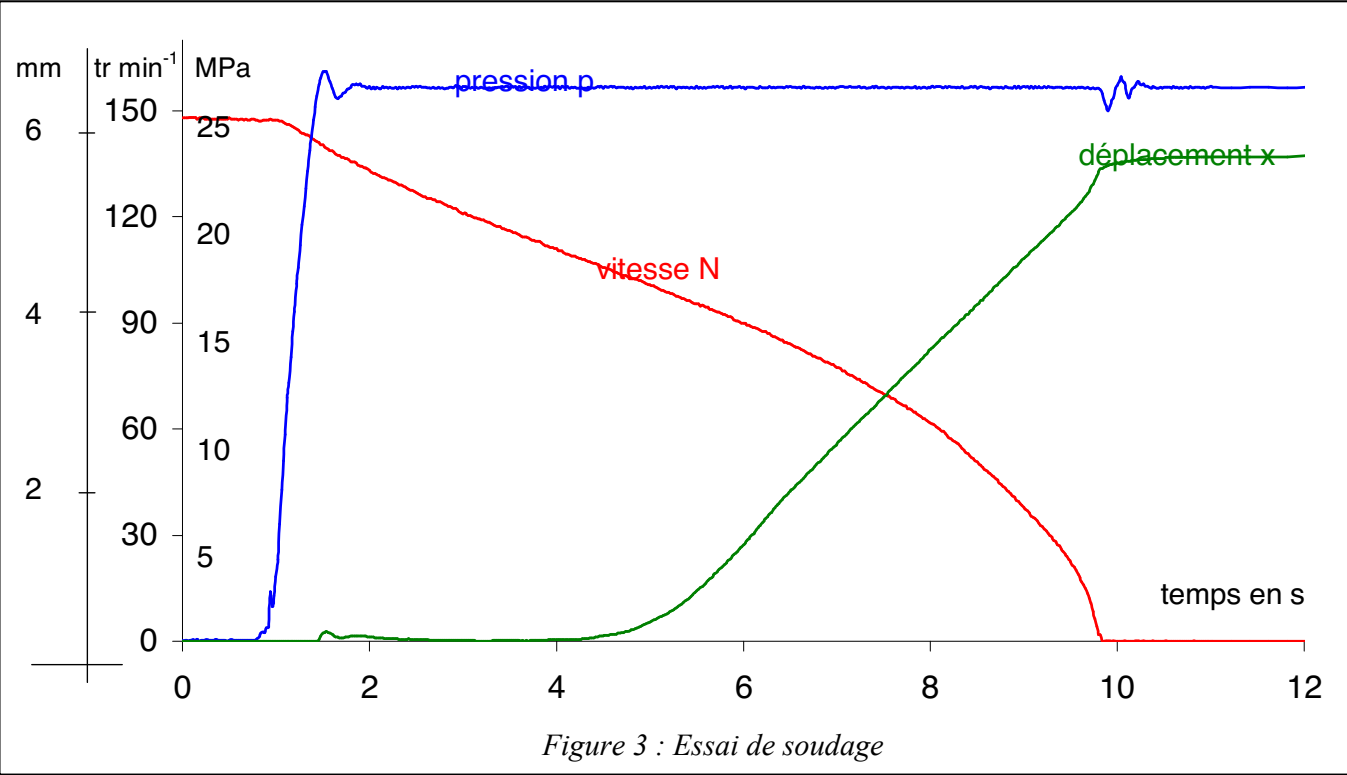
Phase 3 ($t_1 < t \leq t_2$) : Les conditions thermo-mécaniques du soudage sont réalisées: le vérin de poussée avance sous effort contrôlé. Cette phase cesse avec la rotation de la broche. L'énergie cinétique s'est alors transformée intégralement en énergie thermique permettant la soudure des deux pièces.

Phase 4 ($t_2 < t \leq t_3$) : L'effort F est maintenu pendant une dizaine de secondes (phase de forgeage).

Au cours d'un essai de soudage, les évolutions des paramètres suivants ont été mesurés :

- la vitesse de rotation $N(t)$ de la broche,
- la pression $p(t)$ dans le vérin hydraulique de poussée, de section $0,137 \text{ m}^2$,
- le déplacement $x(t)$ du vérin de poussée.

L'enregistrement de ces trois grandeurs est donné ci dessous :



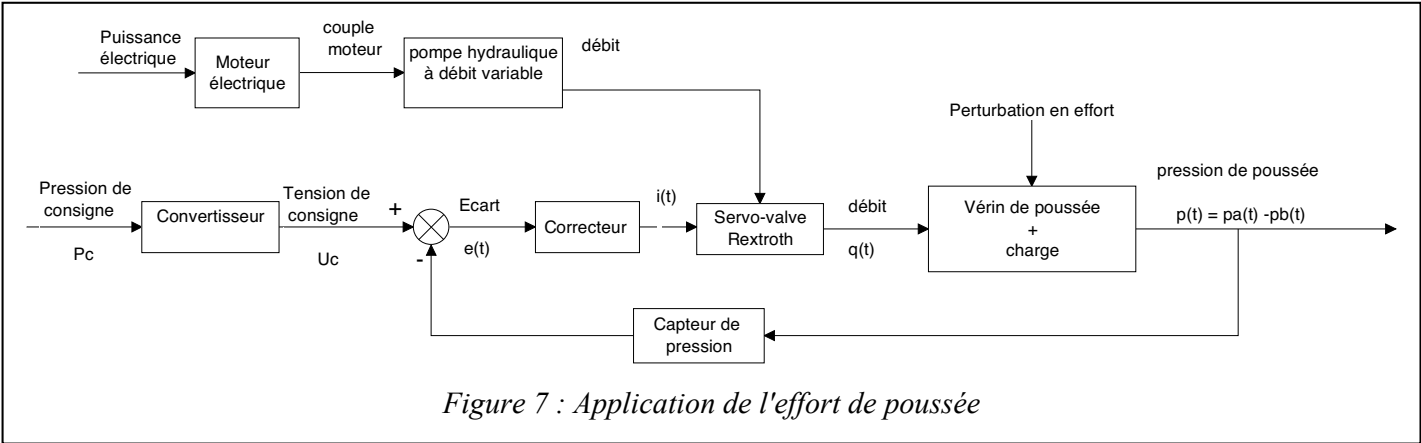
2. Étude de FT : "Assurer l'effort de soudage nécessaire"

2.1. Objectifs de l'étude

L'objet de cette étude est de vérifier les performances de la machine MTI 480 concernant l'application de l'effort de poussée. Le cahier des charges partiel impose les valeurs ci dessous :

	Fonction technique	Critères	Niveaux
FT	Appliquer l'effort de soudage nécessaire.	- Stabilité - Précision - Rapidité - Amortissement - Régulation	- Marge de phase $M\Phi \geq 60^\circ$. - Ecart statique nul en poursuite. - Pulsation de coupure à 0 dB : $\omega_c = 40 \text{ rad s}^{-1}$ - Pression maximale $p_{\text{MAX}} = 3 \times 10^7 \text{ Pa}$ - Dépassement maximal $D = 10 \%$ - Insensibilité en régime permanent aux perturbations.

2.2. Contexte de l'étude



La chaîne fonctionnelle qui décrit l'application de l'effort de poussée est représentée figure 7.

Durant la phase 2, le vérin hydraulique de poussée amène la pièce à souder n° 2 en contact avec la pièce n° 1 et exerce l'effort F nécessaire au soudage. L'énergie cinétique se transforme alors en énergie thermique sans avancement notable du vérin de poussée. Pendant cette phase, le déplacement du piston de poussée est limité par la raideur de la machine. La servo-valve REXROTH a un débit faible (compensation des déplacements). Le système fonctionne en poursuite.

Durant la phase 3, les conditions thermo-mécaniques du soudage sont réalisées. Il y a soudage des deux pièces et avancement du vérin de poussée sous effort contrôlé. Cette phase cesse avec la rotation de la broche. La servo-valve REXROTH a un débit important (compensation du phénomène de fusion).

Au début de la phase 4, l'arrêt de la rotation de la broche provoque une diminution de l'effort résistant donc de la pression de soudage. Le système fonctionne alors en régulation.

Le principe retenu est de piloter la différence de pression entre les deux chambres du vérin de poussée afin de contrôler l'effort appliqué pour effectuer le soudage. Bien que la raideur du système soit différente pendant les phases 2 et 3, le modèle de calcul proposé retient une raideur équivalente constante pendant ces deux phases.

2.3. Modèles retenus

2.3.1. Paramétrage et notations

Notation	Désignation	Valeur numérique
U_C	Tension de consigne	
$I(t) = I_0 + i(t)$	Courant de commande de la servo-valve	
$Q_V(t) = Q_{V0} + q_V(t)$	Débit volumique sortant de la servo-valve	
$Q_M(t) = Q_{M0} + q_M(t)$	Débit massique sortant de la servo-valve	
$P_A(t) = P_{A0} + p_A(t)$	Pression dans la chambre A du vérin	
$P_B(t) = P_{B0} = P_{ATM}$	Pression dans la chambre B du vérin	
$V(t) = V_0 + v(t)$	Volume dans la chambre A du vérin	
$X(t) = X_0 + x(t)$	Position du vérin de poussée	
ρ	Masse volumique de l'huile	
P_C	Pression de soudage de consigne	$261 \times 10^5 \text{ Pa}$
λ	Coefficient de frottement visqueux de l'huile	$2,8 \times 10^3 \text{ N m}^{-1} \text{ s}$
r	Coefficient de raideur équivalente	$3,1 \times 10^8 \text{ N m}^{-1}$
$B = \rho \frac{dp}{d\rho}$	Module de compressibilité de l'huile (supposé constant)	1500 MPa
V_0	Volume initial dans la chambre A du vérin	$0,1028 \text{ m}^3$
M	Masse de l'équipage mobile	10^3 kg
S	Section du piston du vérin de poussée	$0,137 \text{ m}^2$
K_S	Gain statique de la servo-valve	$37,5 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ A}^{-1}$
T_S	Constante de temps de la servo-valve	$0,04 \text{ s}$
K_C	Gain statique du capteur de pression	$1,25 \times 10^{-7} \text{ V Pa}^{-1}$

Le vérin de poussée est symétrique et le point de fonctionnement est défini ainsi par les conditions initiales sont les suivantes :

L'instant initial est l'instant du contact entre les pièces 1 et 2. A l'instant $t = 0$, on peut donc considérer que :

$$Q_A(0) = Q_{A0} = 0 ; P_A(0) = P_{A0} = P_{ATM} ; P_B(0) = P_{B0} = P_{ATM} ;$$

$$I(0) = I_0 = 0 ; V(0) = V_0 ; X(0) = X_0$$

On retiendra la notation p pour la variable de Laplace. On note donc $L[U_C(t)] = U_C(p)$;

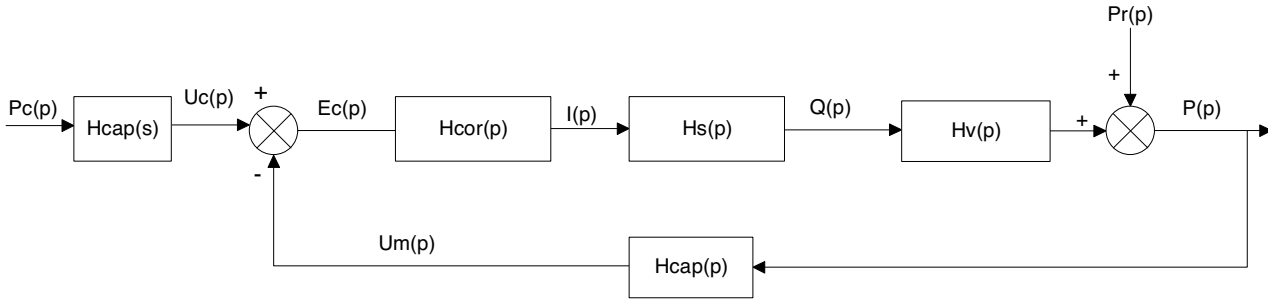
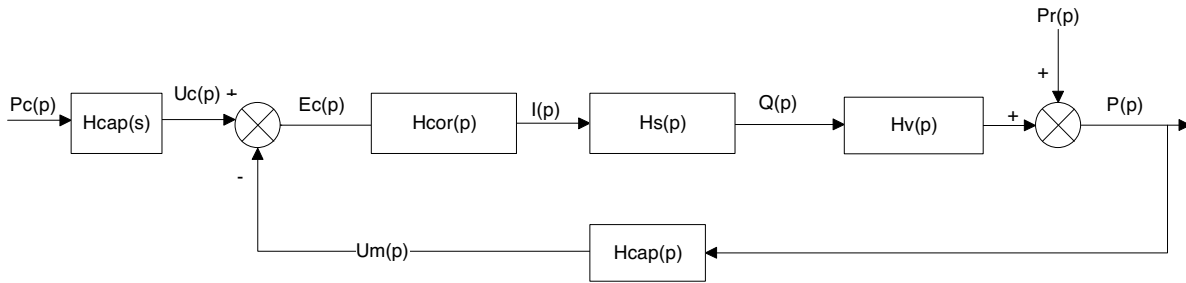


Figure 8 : Schéma bloc de l'asservissement de pression

$$L[p_A(t) - p_B(t)] = P(p) ; L[q(t)] = Q(p) ; L[i(t)] = I(p) ; L[x(t)] = X(p) ; \text{etc.}$$

Le schéma bloc de l'asservissement de pression est donné ci-dessous :



2.3.2. Modélisation du comportement de la servo-valve

Le comportement retenu est celui d'un modèle du premier ordre de gain statique K_S et de constante de temps T_S .

Question 1 : Ecrire la fonction de transfert de la servo-valve notée $H_s(p) = \frac{Q(p)}{I(p)}$ en fonction de K_S et de la constante de temps T_S .

2.3.3. Modélisation du comportement du capteur de pression

Le comportement retenu est celui d'un modèle proportionnel du type : $H_{CAP}(p) = K_C$

2.3.4. Modélisation du comportement du système {vérin + charge}

En appliquant le principe de conservation de la masse du fluide du vérin hydraulique, on démontre que :

$$q(t) = S \frac{dx(t)}{dt} + \frac{V_0}{B} \cdot \frac{d(p_A(t) - p_B(t))}{dt}$$

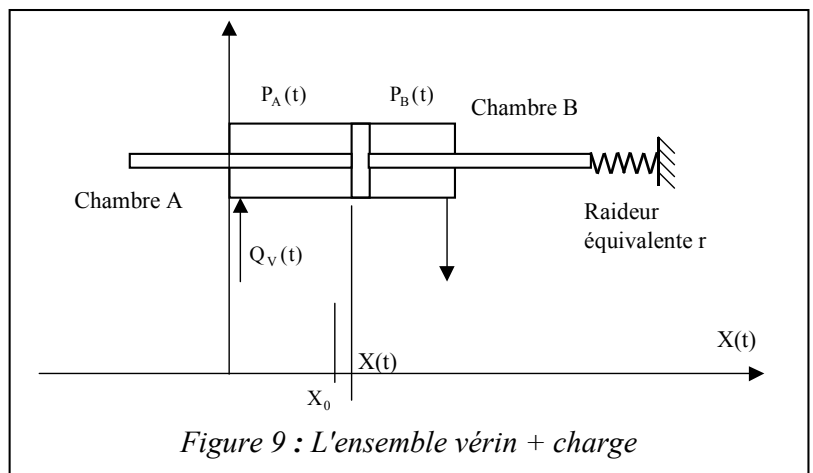


Figure 9 : L'ensemble vérin + charge

En appliquant le principe de la résultante dynamique à l'équipage mobile, en projection sur x, on démontre que : $M \cdot \ddot{x}(t) + \lambda \cdot \dot{x}(t) + r \cdot x(t) = S \cdot [p_A(t) - p_B(t)]$.

L'ensemble vérin + charge est modélisé sur la figure 10.

Question 2 : Déterminer les fonctions de transfert $H_1(p)$, $H_2(p)$ et $H_3(p)$ où $P(p)$ désigne la transformée de Laplace de $[p_A(t) - p_B(t)]$.

Question 3 : Déterminer la

fonction de transfert $H_v(p) = \frac{P(p)}{Q(p)}$. Mettre $H_v(p)$ sous la forme $H_v(p) = \frac{K_v}{p} \frac{1 + a_1 p + a_2 p^2}{1 + b_1 p + b_2 p^2}$.

Effectuer les applications numériques.

Question 4 : Déterminer l'expression littérale de la fonction de transfert en boucle ouverte

$$H_{bo}(p) = \frac{U_m(p)}{E_c(p)}.$$

2.4. Performances en poursuite du système de poussée sans correction

Dans une première approche, il n'y a pas de correcteur donc $H_{COR}(p) = 1$

Question 5 : En utilisant le document ressource DR3, conclure quant à la stabilité de l'asservissement étudié. Justifier la réponse. Le Cahier des Charges Fonctionnel est-il vérifié ?

2.5. Performances en poursuite du système de poussée avec correction proportionnelle

Dans une seconde approche, la correction proposée est proportionnelle donc $H_{COR}(p) = K_{COR}$

Question 6 : Calculer la valeur de K_{COR} qui assure une pulsation de coupure à 0 dB $\omega_c = 40 \text{ rad s}^{-1}$. Calculer alors la marge de phase du système ? En utilisant le document ressource DR3, retrouver ces résultats.

Question 7 : Si $p_c(t) = P_c u(t)$ où $u(t)$ désigne l'échelon unitaire, déterminer la valeur de l'écart statique ε_s .

Question 8 : En utilisant le document ressource DR3, déterminer le temps de réponse à 5% ainsi que le dépassement obtenu.

Question 9 : Déterminer la fonction de transfert en boucle fermée $H_{BF}(p) = \frac{P(p)}{P_c(p)}$.

Mettre $H_{BF}(p)$ sous la forme suivante: $H_{BF}(p) = K \frac{1 + a'_1 p + a'_2 p^2}{1 + b'_1 p + b'_2 p^2 + b'_3 p^3 + b'_4 p^4}$.

Déterminer numériquement les coefficients $a'_1, a'_2, b'_1, b'_2, b'_3$ et b'_4 .

Les pôles de la fonction de transfert $H_{BF}(p) = \frac{P(p)}{P_c(p)}$ sont donnés ci dessous :

p_1	$-12,44 + 21,60j$
p_2	$-12,44 - 21,60j$
p_3	$-1,40 + 764j$
p_4	$-1,40 - 764j$

Question 10 : Conclure quant à la stabilité de l'asservissement étudié. Quel modèle simplifié peut-on associer au comportement de l'asservissement étudié en régime établi ? Justifier la réponse. Conclure conformément au Cahier des Charges Fonctionnel.

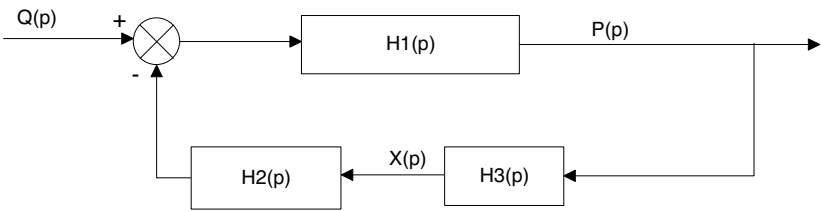


Figure 10 : Fonction de transfert de l'ensemble vérin+charge

2.6. Performances en poursuite du système de poussée avec correction proportionnelle et dérivée

Dans une troisième approche, la correction proposée est la suivante :

$$H_{\text{COR}}(s) = K_{\text{COR}} \left[\frac{1 + Ts}{1 + aTs} \right] \text{ avec } a < 1$$

Question 11 : Dans le plan de Bode, tracer les diagrammes asymptotiques de gain et de phase de ce correcteur. Donner l'allure des courbes en précisant la phase maxi φ_m de ce correcteur ainsi que la pulsation ω_m correspondante. Exprimer $\tan \varphi_m$ et ω_m en fonction de a et T . Justifier l'intérêt de l'emploi d'un tel correcteur.

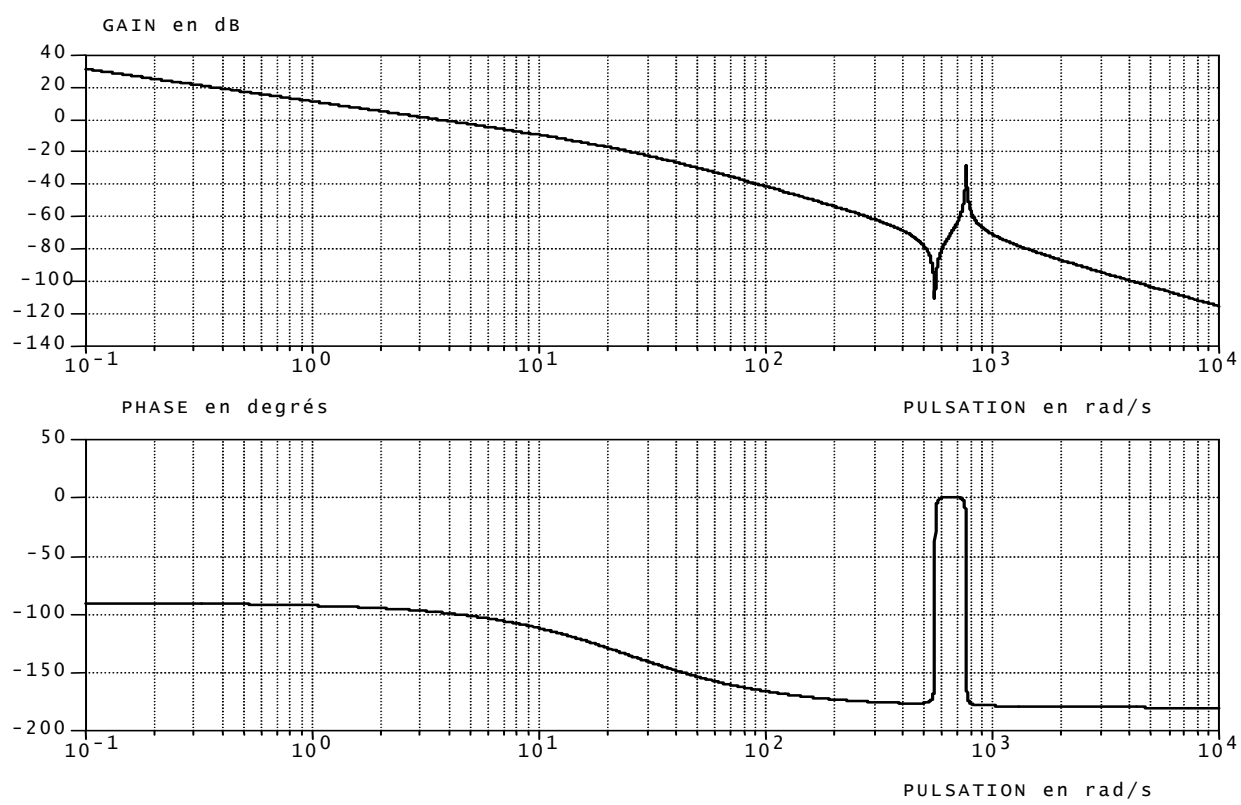
Question 12 : En plaçant le correcteur tel que $\omega_m = \omega_c = 40 \text{ rad s}^{-1}$, déterminer a , T et K_{COR} pour que le système étudié possède une marge de phase conforme au Cahier des Charges Fonctionnel.

Question 13 : En utilisant le document ressource DR4, déterminer la marge de phase du système corrigé, le temps de réponse à 5% ainsi que la valeur du dépassement en %. Conclure conformément au Cahier des Charges Fonctionnel.

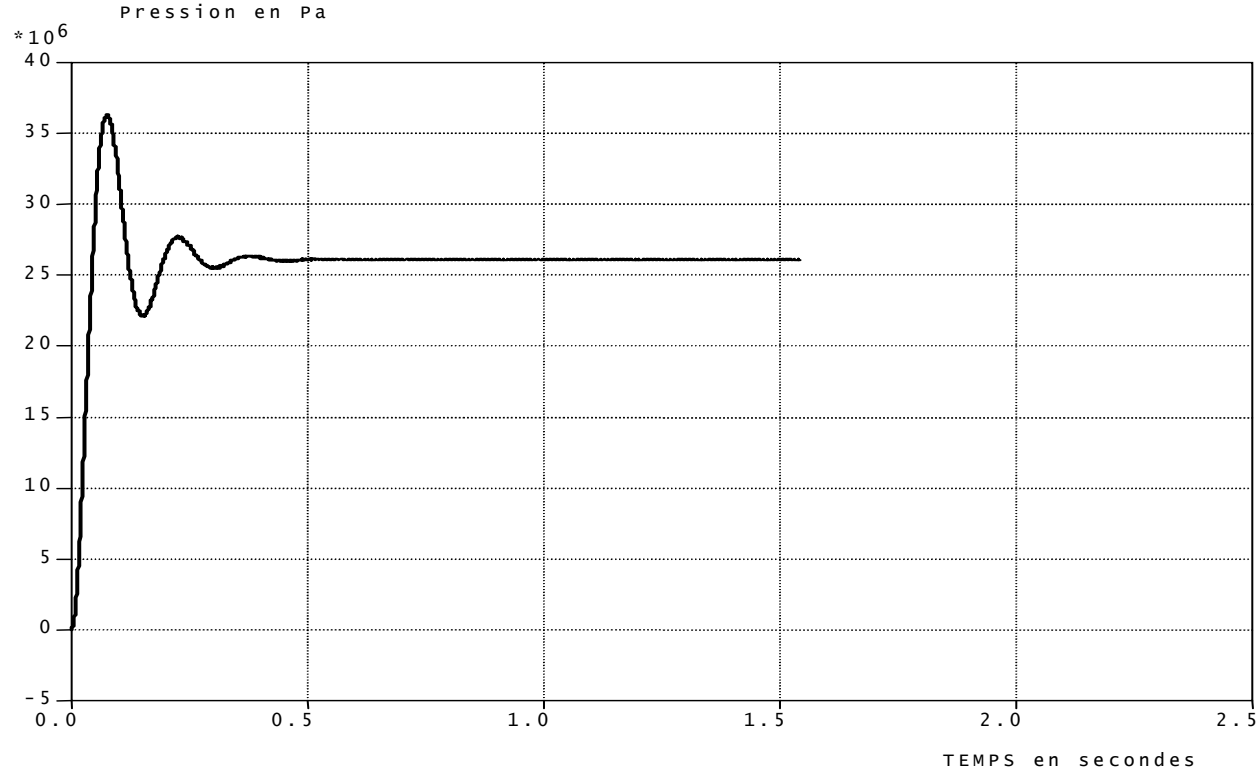
Question 14 : L'essai de soulage figure 3 montre qu'une chute de pression intervient lorsque la broche cesse de tourner. Justifier que l'influence de cette perturbation est effacée comme demandé par le cahier des charges fonctionnel.

DR 3 : Performances du système MTI 480

DR3A : Réponse fréquentielle en boucle ouverte sans correction proportionnelle $K_{COR} = 1$



DR3B : Réponse indicielle en boucle fermée avec correction proportionnelle $K_{COR} = 20,9$



DR 4: performances du système MTI 480

avec correcteur Proportionnel Dérivé

