

Sciences de l'Ingénieur – DM 14

TUYÈRE À OUVERTURE VARIABLE POUR BANC D'ESSAIS DE TURBORÉACTEURS

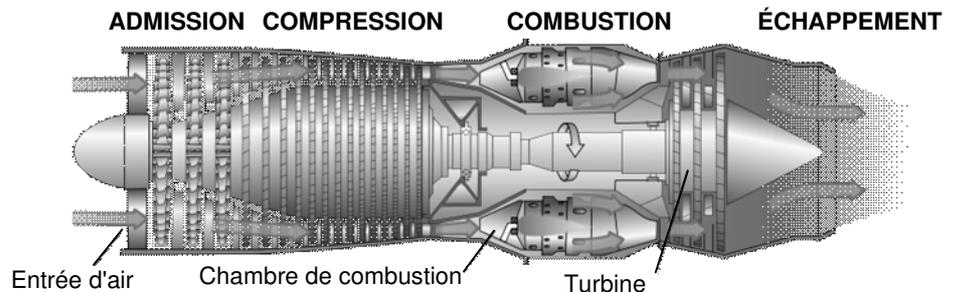
Les propulseurs utilisés dans les applications militaires ou civiles subissent, avant leur mise en service, des tests de certification visant à contrôler leur bon fonctionnement et le respect des normes de sécurité. Ces tests consistent à simuler au sol les conditions de vol subies par le propulseur et à observer les réactions de celui-ci consécutives à des commandes de pilotage.

La DGA (Direction Générale de l'Armement) dispose dans son centre d'essais des propulseurs, situé à Saclay (91), de bancs d'essais dédiés à la certification et à la mise au point de différents types de propulseurs d'avions ou de missiles.

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN TURBORÉACTEUR

Un turboréacteur est un propulseur fonctionnant sur le principe d'action réaction. La différence de vitesse entre l'air entrant et les gaz produits entraîne une variation de quantité de mouvement et donc un effort de poussée (voir *document 1*).

L'air ambiant est conditionné à l'entrée puis comprimé à l'aide de compresseurs centrifuges à étages multiples. Le carburant est alors injecté dans la chambre de combustion, mélangé à l'air puis enflammé, ce qui produit ainsi l'énergie permettant l'accélération des gaz au passage de la tuyère d'éjection à ouverture variable. Leur passage dans une turbine permet en outre d'entraîner les étages de compression.



Document 1 – Structure d'un turboréacteur

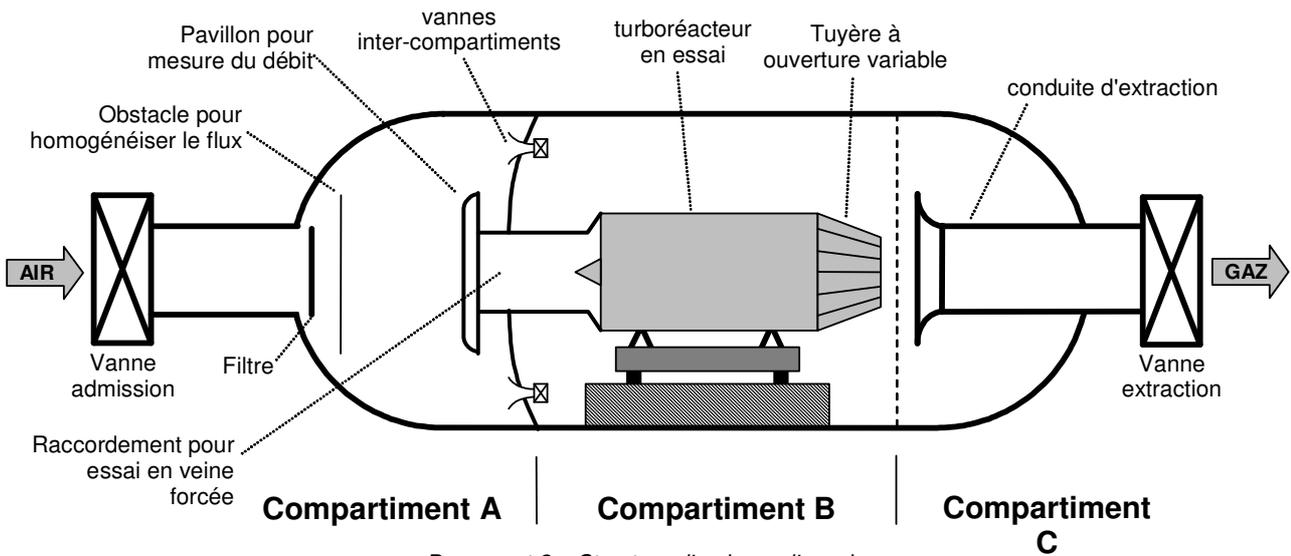
LE BANC D'ESSAIS

Un banc d'essais de turboréacteur est constitué de trois compartiments (voir *document 2*). Le premier compartiment (A) est alimenté par une soufflerie et a pour fonction de conditionner le flux d'air en amont de la turbomachine testée. Il est ainsi possible de contrôler le débit, la température et la pression de l'air en admission. Le deuxième compartiment (B) contient le propulseur à tester. Celui-ci est maintenu par une structure porteuse permettant entre autres les mesures des efforts de poussée. Il est séparé du compartiment (A) par une cloison étanche munie d'un orifice permettant le passage de l'air calibré. Le flux d'air peut alors être laissé libre en amont du réacteur ou guidé par un raccordement jusqu'à l'entrée de celui-ci, permettant ainsi des essais dits en "veine forcée". Le troisième compartiment (C) permet la collecte et l'évacuation des gaz produits lors de la combustion. La pression à l'intérieur du compartiment B est régulée afin de simuler différentes conditions d'altitude.

Des vannes inter compartiments permettent d'assurer une circulation d'air autour du réacteur afin de simuler le refroidissement externe du moteur en fonctionnement.

La pression du compartiment A est ajustable de 0,05 à 3 bar. Celle des compartiments B et C de 0,05 à 1,05 bar. La température d'alimentation du compartiment A est variable de -56 °C à +150 °C. La capacité de ventilation est réglable de 27 à 40 kg/s. En réglant ces différents paramètres, il est possible de simuler sur ce type de banc l'ensemble des conditions d'utilisation d'un turboréacteur.

TUYÈRE À OUVERTURE VARIABLE POUR BANC D'ESSAIS DE TURBORÉACTEURS

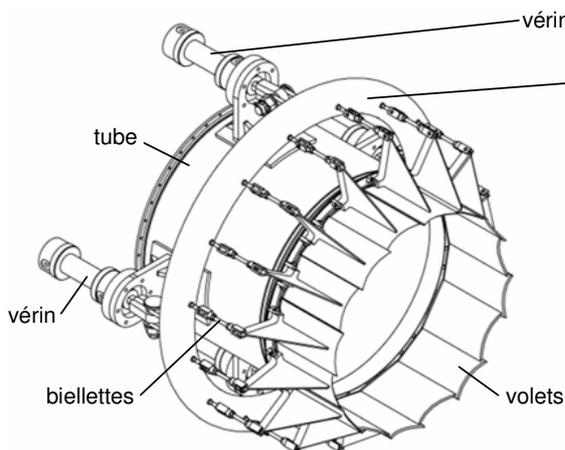


Document 2 – Structure d'un banc d'essais

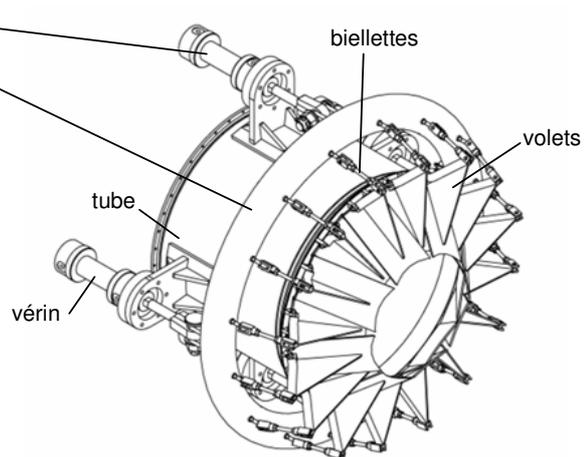
TUYÈRE A OUVERTURE VARIABLE

La tuyère à ouverture variable montée sur le tube, en aval de l'écoulement, a pour fonction de faire varier la section de la veine de fluide en sortie de tube. La solution imaginée consiste à disposer seize volets articulés sur la périphérie du tube qui permettent ainsi de réduire la section de passage du fluide (voir documents 4 et 5 ci-dessous). Ces volets sont mis en mouvement par seize bielles toutes identiques reliées à une pièce de forme torique (tore) elle-même mise en translation par quatre vérins hydrauliques répartis régulièrement autour du tube. Les commandes de ces vérins sont synchronisées et asservies en position. La DGA a confié la réalisation de cette commande à la société Bosch-Rexroth.

La consigne d'ouverture de la tuyère est élaborée au niveau de la console de pilotage. Elle est transmise à des modules de commande spécifiques à chaque vérin. Ceux-ci sont pilotés par des servo-distributeurs hydrauliques à commande électrique. Un contrôle de la position est effectué par un capteur à magnétostriction intégré dans le corps du vérin. Les caractéristiques de ces composants sont fournies en annexe 2.



Document 4 – Tuyère ouverte



Document 5 – Tuyère fermée

TUYÈRE À OUVERTURE VARIABLE POUR BANC D'ESSAIS DE TURBORÉACTEURS

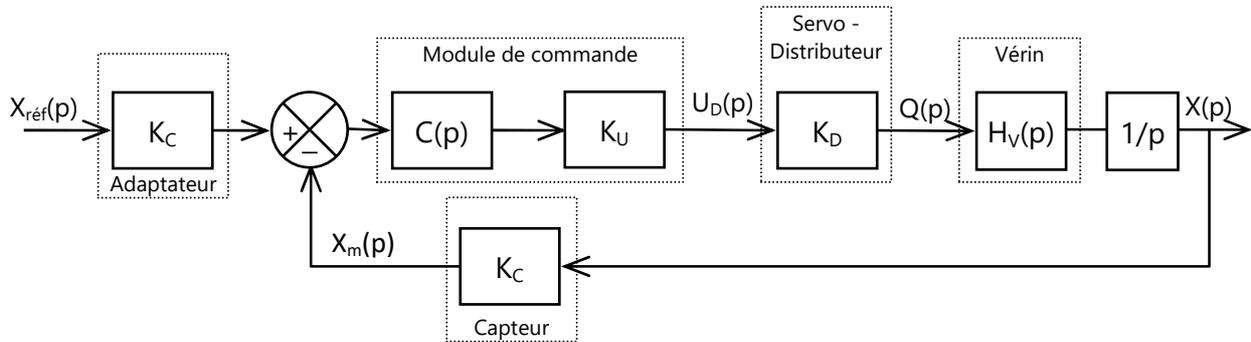
CHOIX DU CORRECTEUR DE L'ASSERVISSEMENT EN POSITION DU VERIN

Objectif : Cette partie a pour objectif de choisir et de régler le correcteur de la chaîne fonctionnelle assurant la fonction de service.

On donne ci-dessous un extrait du cahier des charges relatif à la fonction de service.

Fonction de service	Critères d'appréciation	Niveau
Faire varier le diamètre de la veine de fluide	Rapidité <ul style="list-style-type: none"> Temps de réponse à 5% 	4 s pour le déplacement maximal
	Précision <ul style="list-style-type: none"> Erreur statique pour le vérin Erreur de traînage pour le vérin 	0 mm 1 mm pour une consigne de 25 mm/s
	Stabilité Marges de stabilité	Marge de gain > 15 dB Marge de phase > 45°

Afin de simplifier l'étude et en reprenant les résultats de la partie B, nous adopterons dans cette partie le schéma bloc suivant pour modéliser la chaîne fonctionnelle :



Grandeurs physiques

- $X_{réf}(p)$: diamètre de consigne de la section d'ouverture de la tuyère
- $U_D(p)$: tension de commande du servo-distributeur hydraulique
- $Q(p)$: débit de fluide fourni par le servo-distributeur au vérin
- $X(p)$: déplacement de la tige du vérin
- $X_m(p)$: estimation du déplacement par le capteur

Fonctions de transfert et gains

- $C(p)$: fonction de transfert du correcteur de la chaîne de commande
- K_U : gain du convertisseur numérique analogique
- K_D : gain du servo-distributeur hydraulique
- K_C : gain du capteur de déplacement
- $H_v(p)$: fonction de transfert du vérin hydraulique

Valeurs numériques : $K_C = 2 \cdot 10^5 \text{ m}^{-1}$; $K_U = 5 \cdot 10^{-4} \text{ V}$ et $K_D = 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} / \text{V}$

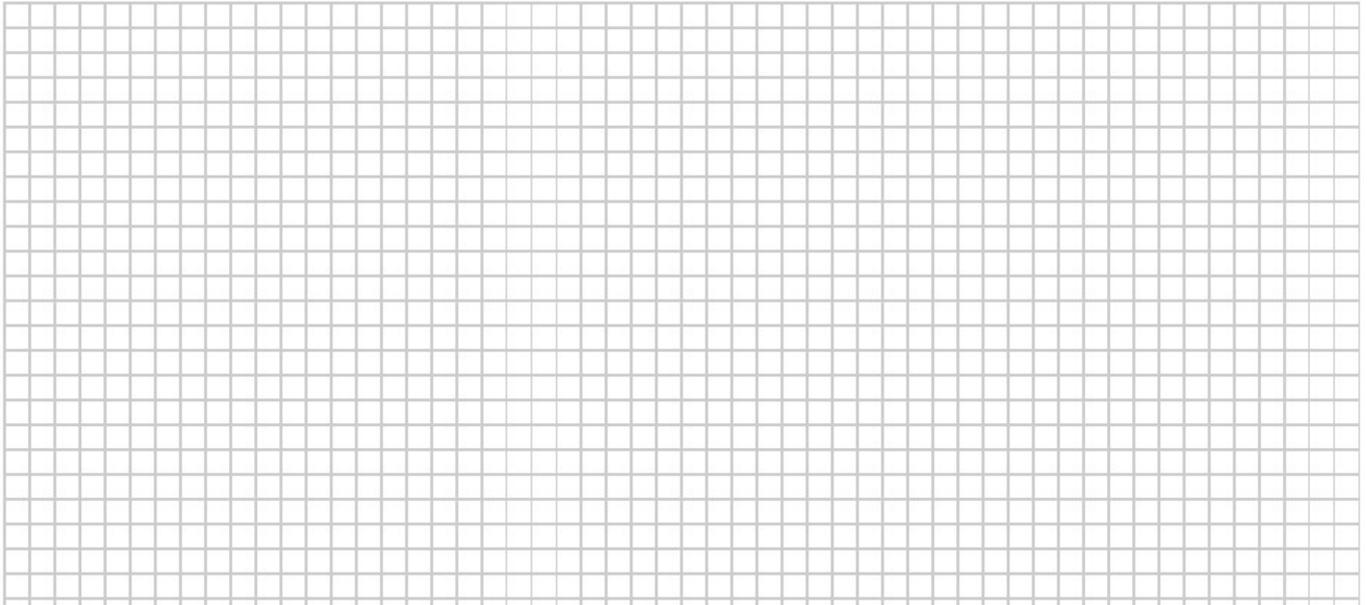
1 – MODÉLISATION DE LA BOUCLE OUVERTE NON CORRIGÉE

Objectif : il s'agit ici de proposer un modèle du comportement en boucle ouverte non corrigée de la chaîne fonctionnelle.

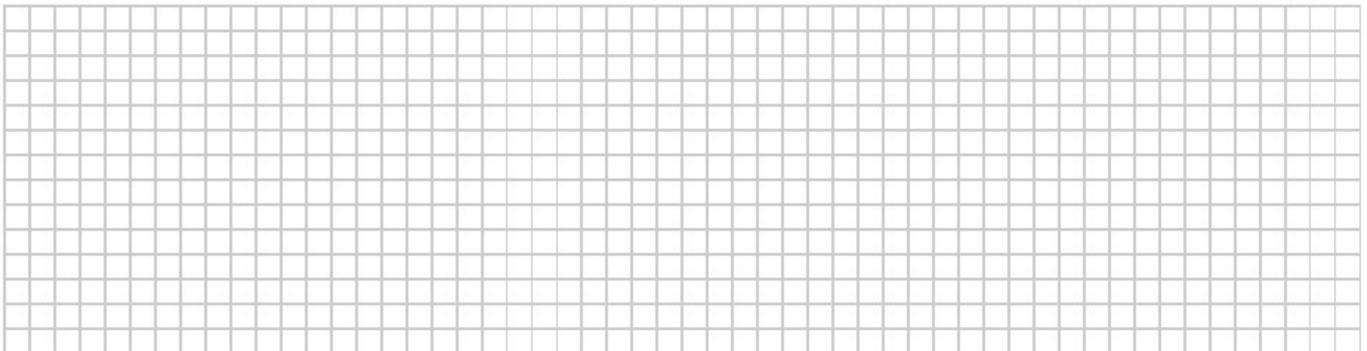
On donne sur le document réponse 1 la représentation dans le plan de Bode de la fonction $H_v(p) = \frac{\dot{X}(p)}{Q(p)}$.

TUYÈRE À OUVERTURE VARIABLE POUR BANC D'ESSAIS DE TURBORÉACTEURS

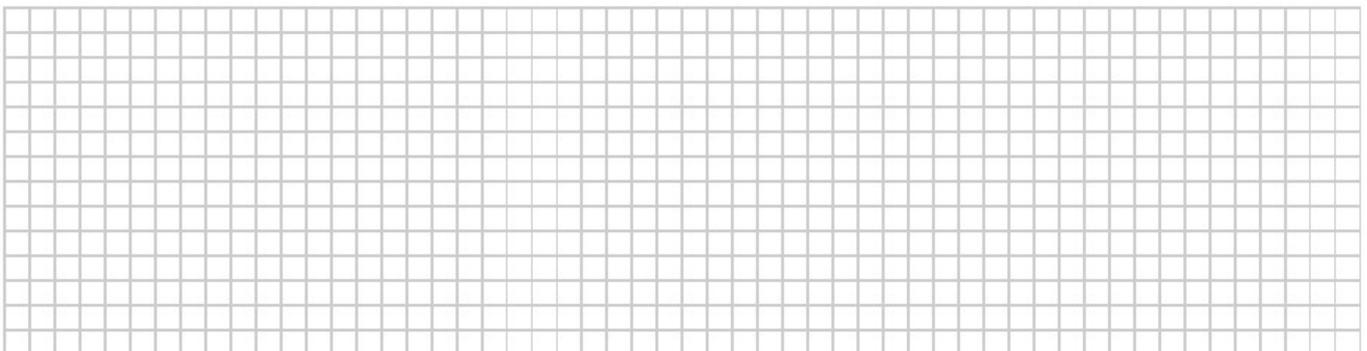
- Q1.** Proposer à partir de ce tracé, une expression pour la fonction de transfert $H_v(p)$. On justifiera la réponse en traçant les diagrammes asymptotiques correspondants sur le DR1 et en déterminant tous les coefficients utiles. On précise que les coefficients ont été choisis afin d'optimiser la rapidité du vérin.



- Q2.** En déduire la valeur du gain statique en boucle ouverte non corrigée du système. On notera ce terme K_{BONC} . Tracer en rouge, sur le document réponse 1, le diagramme de la fonction de transfert en boucle ouverte du système complet non corrigé.



- Q3.** Le système comporte-t-il un risque d'instabilité ? Si oui, préciser pour quelle valeur du gain du correcteur l'instabilité est possible. Conclure.

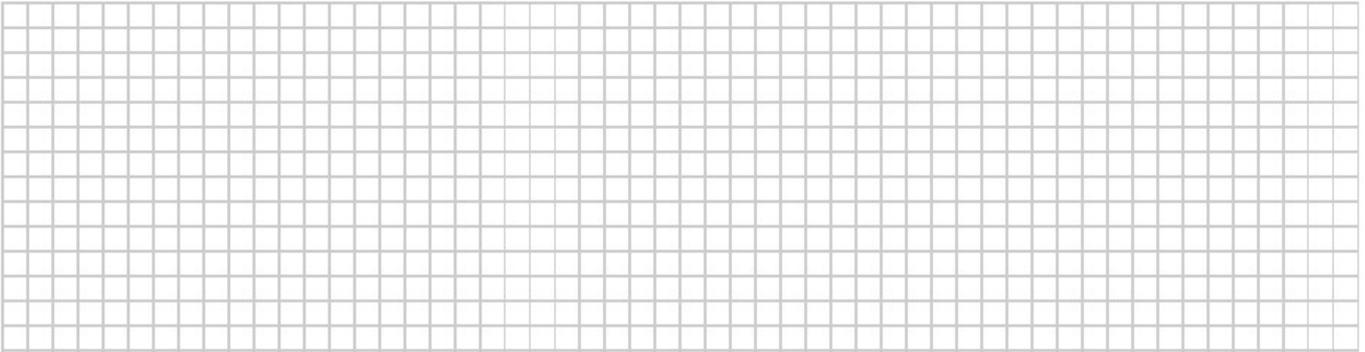
**2 – RÉGLAGE D'UNE CORRECTION PROPORTIONNELLE**

Objectif : Il s'agit ici de proposer un réglage pour une correction proportionnelle afin de satisfaire aux performances du cahier des charges.

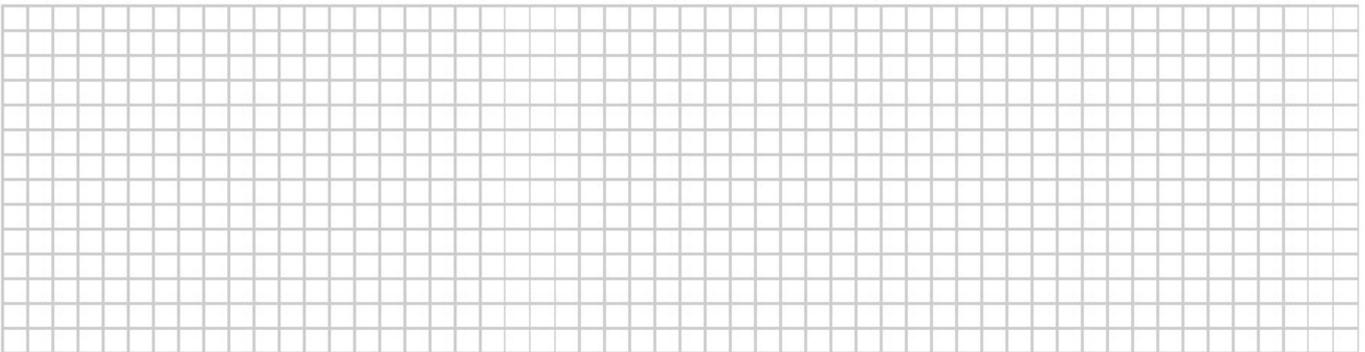
TUYÈRE À OUVERTURE VARIABLE POUR BANC D'ESSAIS DE TURBORÉACTEURS

En partant du principe qu'il y a toujours un réglage à effectuer, on adopte dans cette partie un correcteur de fonction de transfert : $C(p) = K_{COR}$.

Q4. Donner une expression littérale de la fonction de transfert en boucle ouverte ainsi corrigée.

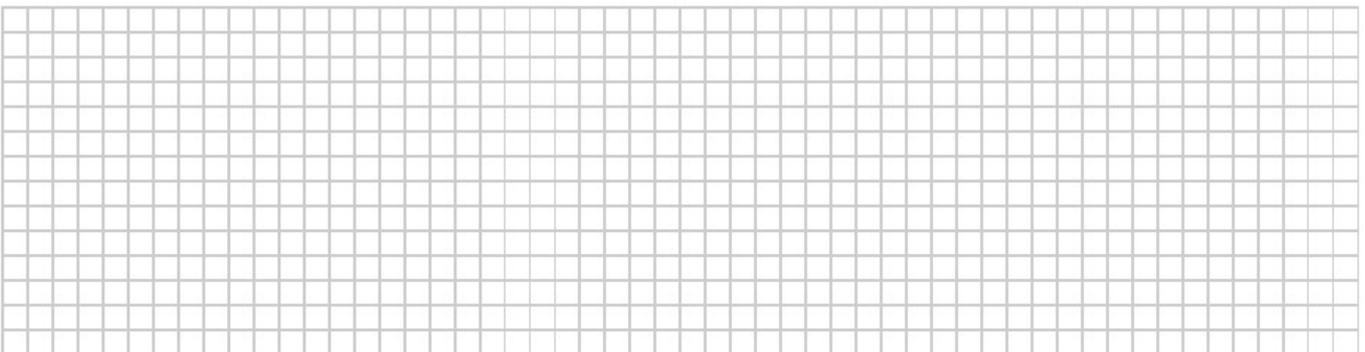


Q5. Régler le gain du correcteur de sorte à respecter les clauses de précision du cahier des charges.

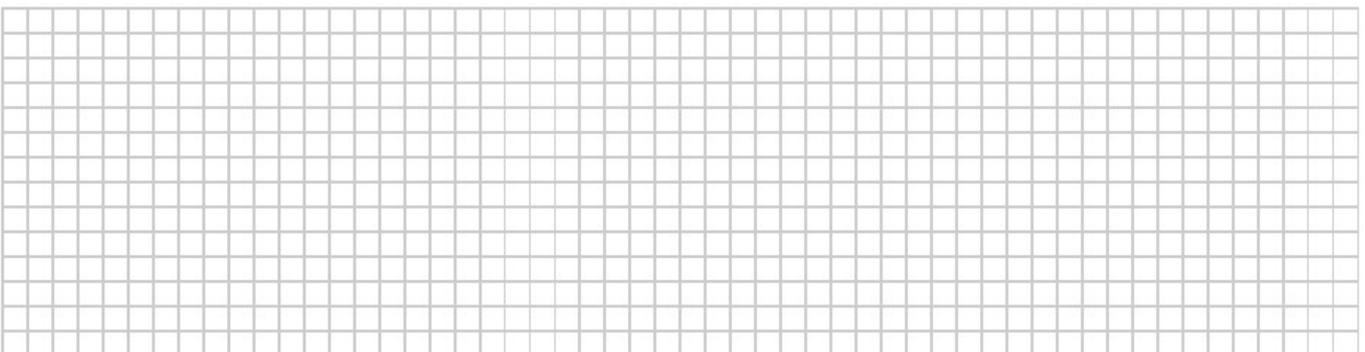


Q6. Tracer sur le document réponse 2 le diagramme de Bode de la fonction de transfert en boucle ouverte du système ainsi corrigé (asymptotes et allures des courbes réelles).

Q7. Vérifier si le modèle ainsi corrigé respecte toutes les clauses du cahier des charges.



Q8. Effectuer une synthèse de cette partie.

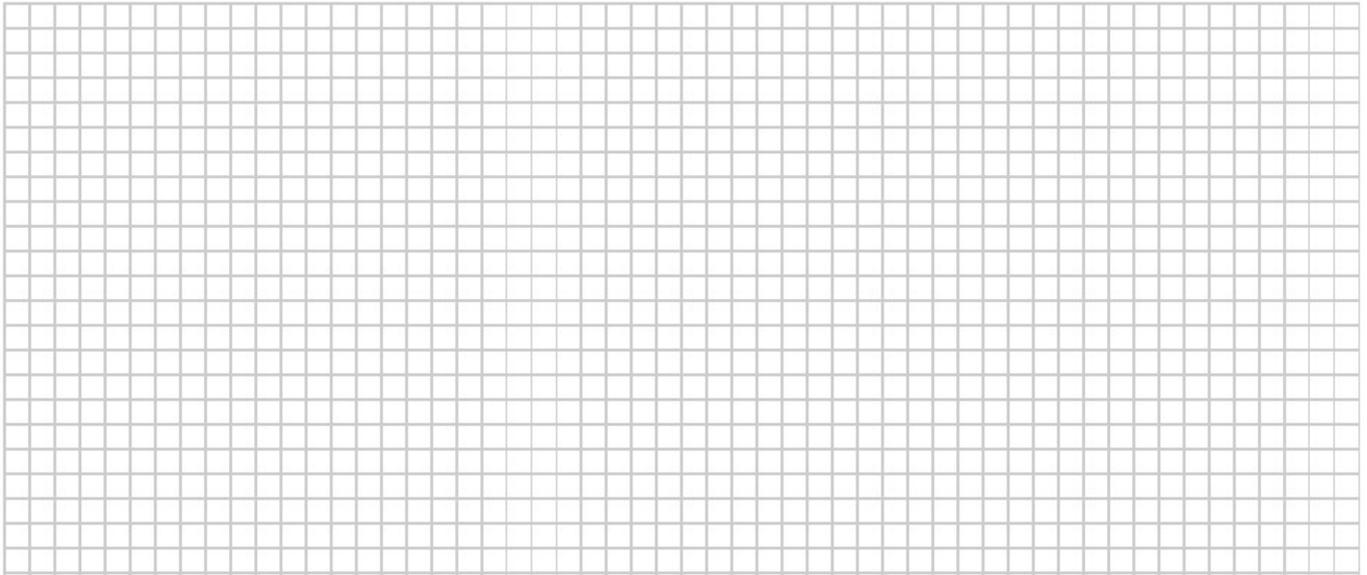


TUYÈRE À OUVERTURE VARIABLE POUR BANC D'ESSAIS DE TURBORÉACTEURS**3 – RÉGLAGE D'UNE CORRECTION PROPORTIONNELLE DÉRIVÉE**

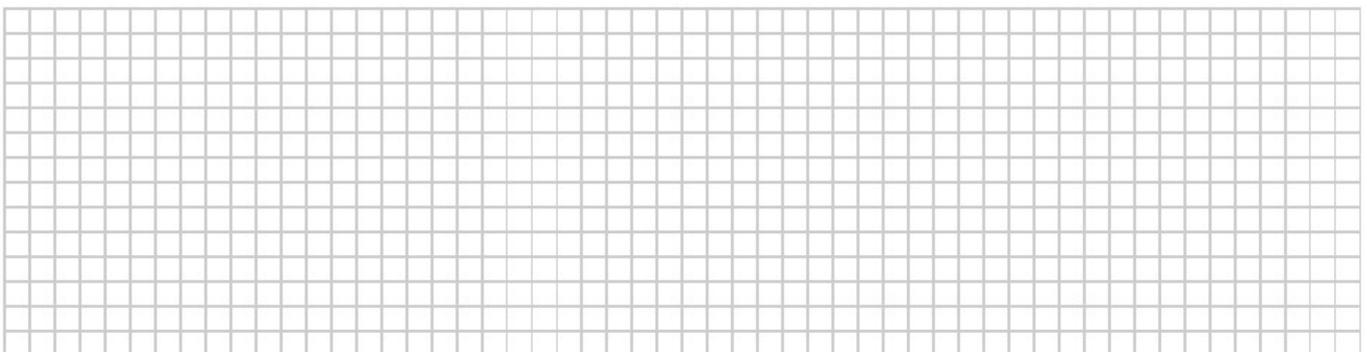
Objectif : Il s'agit ici de proposer un réglage pour un correcteur à avance de phase afin de satisfaire aux performances du cahier des charges.

Pour pallier les défauts énumérés à la fin de la partie précédente (étude avec un correcteur P), on propose un correcteur de fonction de transfert : $C(p) = K_{\text{COR}} \frac{1+0,175 \cdot p}{1+0,05 \cdot p}$ (on conserve le gain proportionnel déterminé dans la partie précédente). Cette fonction a pour objectif de redonner de la phase dans l'intervalle de pulsations où le gain en dB s'annule ; ceci permet d'augmenter la marge de phase relativement indépendamment des autres critères de qualité du modèle étudié.

- Q9.** Tracer le diagramme de Bode de la fonction $\frac{1+0,175 \cdot p}{1+0,05 \cdot p}$ sur le document réponse 2 (asymptotes et allure réelle).
- Q10.** Tracer le diagramme de Bode asymptotique de la fonction de transfert en boucle ouverte corrigée avec le correcteur $C(p)$.
- Q11.** Effectuer un bilan des performances du système ainsi corrigé.

**4 – SYNTHÈSE DU TRAVAIL ACCOMPLI**

- Q12.** Résumer en quelques lignes l'étude effectuée.



TUYÈRE À OUVERTURE VARIABLE POUR BANC D'ESSAIS DE TURBORÉACTEURS

DOCUMENT REPONSE 1

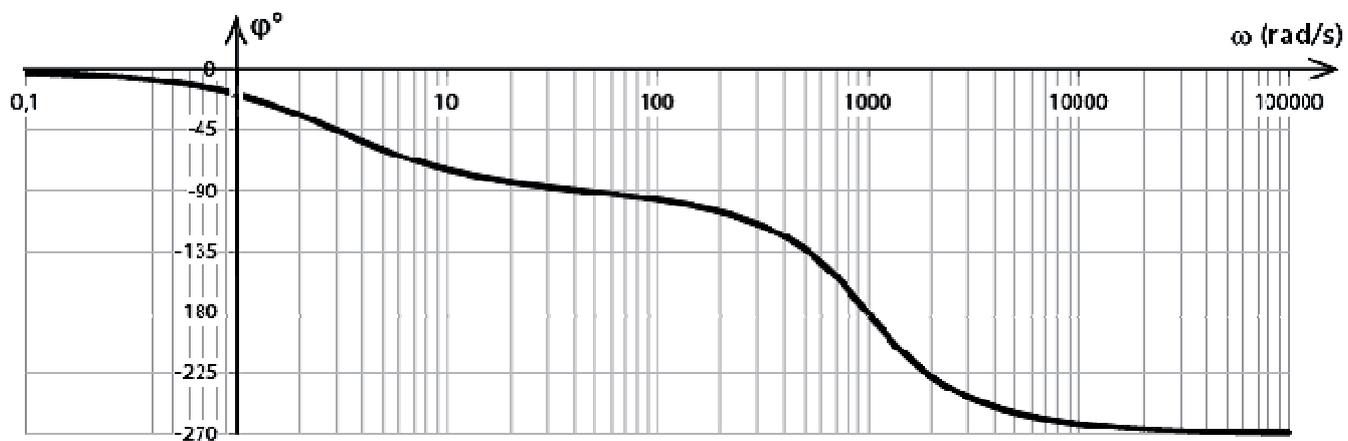
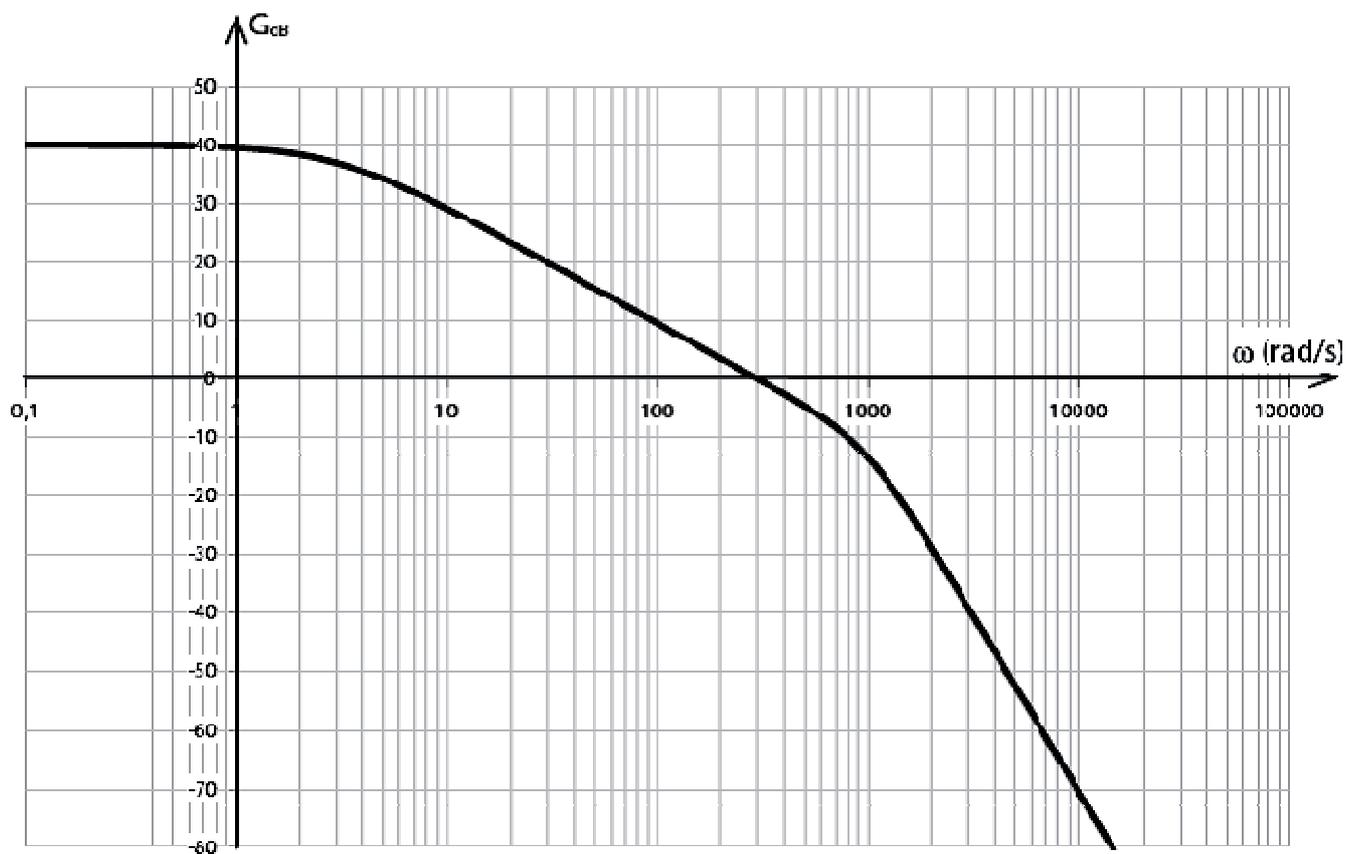


Diagramme de Bode de $H_v(p)$

TUYÈRE À OUVERTURE VARIABLE POUR BANC D'ESSAIS DE TURBORÉACTEURS

DOCUMENT REPONSE 2

