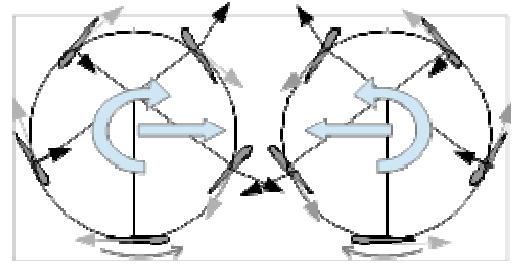


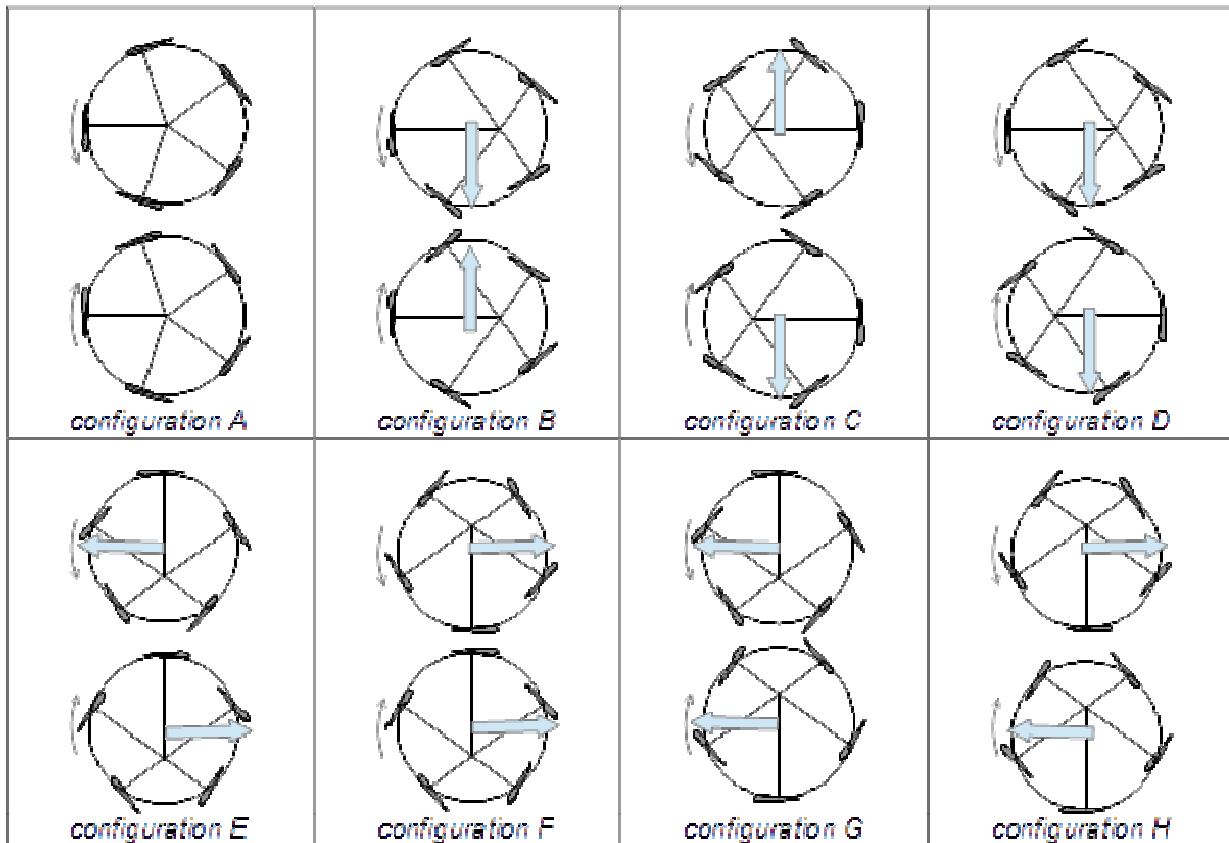
**CORRECTION PROPULSION A PAS VARIABLE**

**Q1.** L'annexe B2 propose le modèle global résultant des forces hydrodynamiques s'exerçant sur les pales. En raisonnant sur ce modèle on peut déduire que pour annuler le couple hydrodynamique induit, il est nécessaire d'adjoindre un deuxième rotor tournant en sens inverse. (Pb identique au cas des hélicoptères à double rotor de type PUMA).



**Q2.** Sans redessiner toutes les actions sur chaque pale, on peut reproduire par analogie avec la question précédente les forces globales sur chaque propulseur (les moments restent identiques).

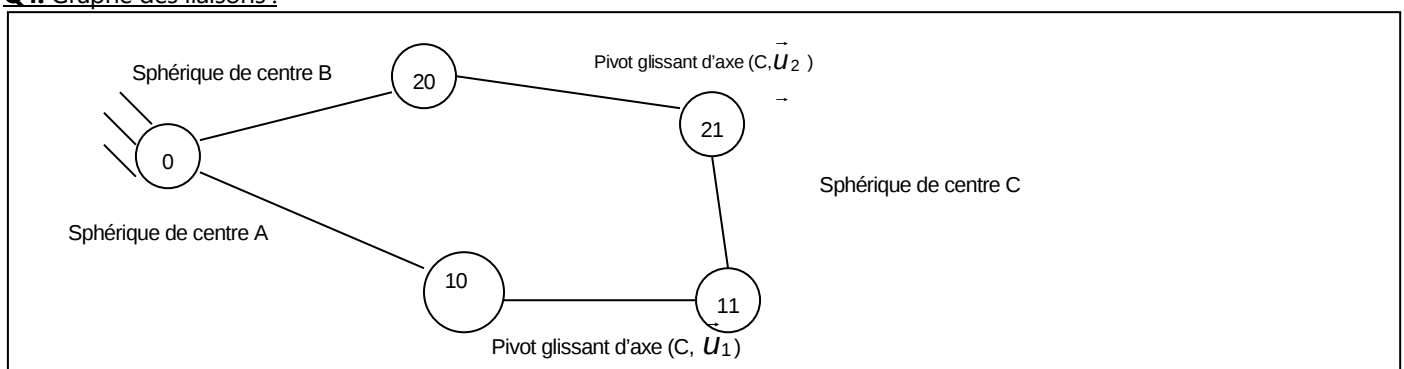
Ainsi on obtient :



**Q3.** La configuration « avant toute » correspond donc à F, « arrière toute » à G, « tribord toute » à D compte-tenu de l'orientation défini dans l'énoncé (avant du bateau à droite).

Les configurations B et C correspondent au cas où les résultantes hydro-dynamiques se compensent. On considérera qu'elles correspondent à la manœuvre « stop » dans la mesure où elles sont stables en cas de perturbation. La configuration A (neutre) ne permet pas de stopper le navire. (dérive possible car il n'y a pas de résultante sur chaque propulseur)

**Q4.** Graphe des liaisons :

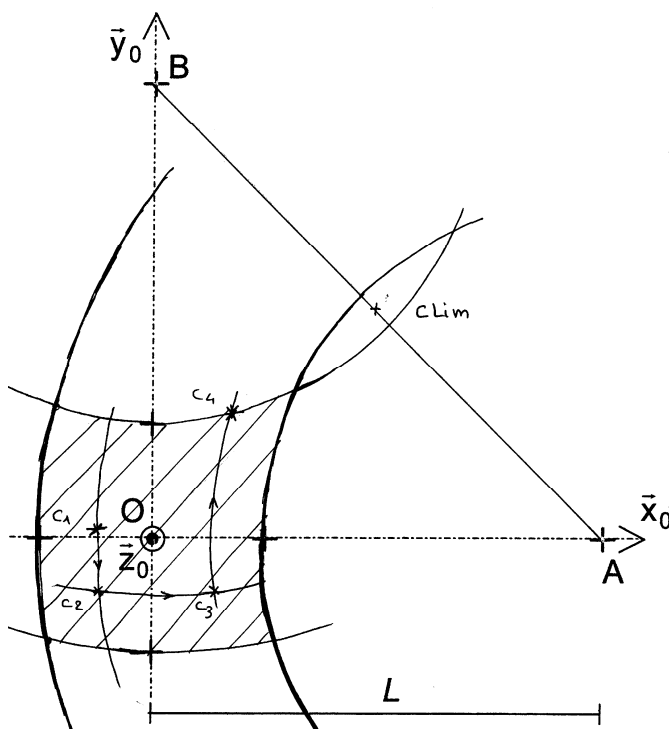


**Q5. Mobilité de la chaîne :** On constate qu'il n'y aucune contrainte géométrique d'assemblage du mécanisme. Le modèle proposé est donc isostatique. Sachant que  $h = 0 = 6\mu + M_C - N_C$ , avec  $\mu = 1$  et  $N_C = 13$ , on obtient  $M_C = 7$ . On décompose intuitivement  $m_C$  en  $\mu = 2$  (les deux translations des vérins) et  $m_i = 5$  (les deux rotations propres des tiges et des corps des vérins, plus la rotation globale de l'ensemble autour de l'axe AB)

**Q6. Condition d'appartenance de C au plan  $(J, \vec{x}_0, \vec{y}_0)$  :** Le système a une structure triangulaire (ABC) que les mobilités utiles ont pour tâche de modifier. Parmi les mobilités internes, les rotations propres des vérins ne modifient pas cette configuration. En conséquence, seule la mobilité interne de l'ensemble autour de l'axe (AB) est nécessaire pour que C se situe dans le plan.

**Q7. Expressions littérales de  $\lambda$  et  $\mu$  :** La relation de Chasles appliquée au triangle (ABC) nous permet d'écrire  $\vec{AC} + \vec{BC} + \vec{CA} = \vec{0}$ , soit  $\lambda \vec{u}_1 - \mu \vec{u}_2 - L \vec{y}_0 + L \vec{x}_0 = \vec{0}$  ce qui conduit à  $\lambda^2 = \rho^2 + L^2 - 2L\rho \cos(\theta)$  et

$$\mu^2 = \rho^2 + L^2 - 2L\rho \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)$$



**Q8.** La non linéarité de ces relations vient de leur forme quadratique et de la présence de fonctions circulaires. Le couplage tient au fait que chacune des variables est liée aux deux autres.

**Q9. Lieu du point C :** (voir)

**Q10. trajectoire du point C :** (voir)

**Q11. pilotage simultané des vérins :** Si on admet que  $\lambda = \mu$ , alors le point C se déplace sur la bissectrice de l'angle (AOB). Dans ce cas  $\theta = \pi/4$  et les équations précédentes deviennent  $\lambda^2 = \mu^2 = \rho^2 + L^2 - L\rho\sqrt{2}$ . On en déduit

$$\rho = \frac{L - \sqrt{2\lambda^2 - L^2}}{\sqrt{2}} \quad (\text{l'autre solution n'étant pas}$$

acceptable puisque  $\rho \leq L \frac{\sqrt{2}}{2}$ ).

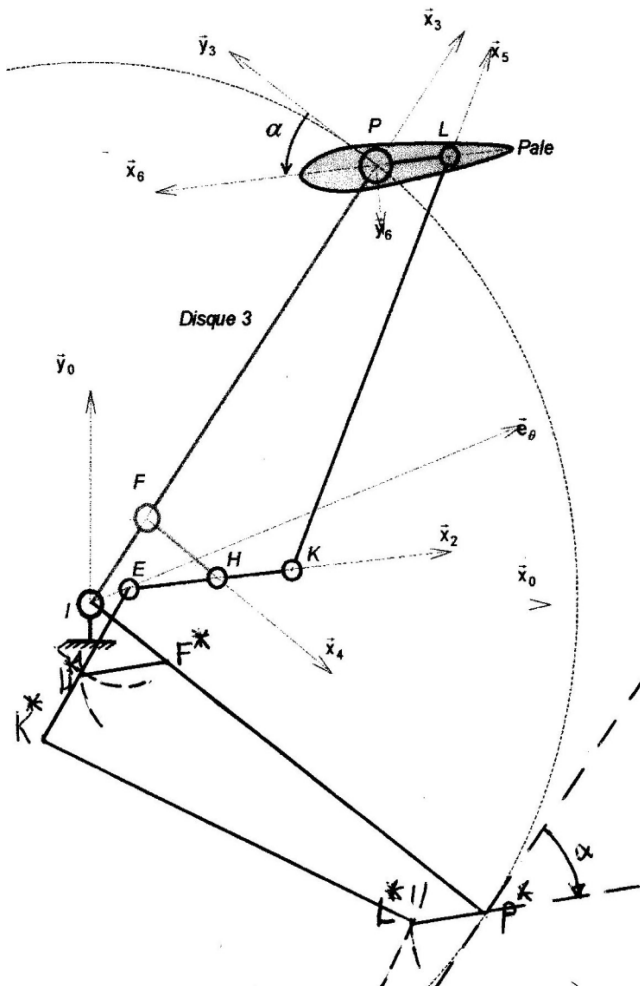
**Q12. calcul de  $\lambda_{\min}$  :** La configuration limite du système est définie lorsque les points ABC sont alignés. (le système

devient théoriquement irréversible). Dans ce cas  $\overline{AB} = L\sqrt{2} = \lambda + \mu$ . Si l'on accepte être dans le cadre de la question

précédente, alors  $\lambda = \mu = L \frac{\sqrt{2}}{2} \leq \frac{3}{4}L$ .

**Q13. degré d'hyperstatisme du modèle de mécanisme de transformation de mouvement :** On observe une mobilité utile (rotation de 4/3) et une mobilité interne (rotation de 2/3) soit  $m_C = 2$  et on a  $l_C = 5$ , donc en appliquant la formule  $h = 6 \cdot 1 + 2 - 5 = 3$ . **Solution isostatique équivalente :** Les contraintes géométriques sont deux contraintes angulaires autour d'axes dans le plan et une contrainte de hauteur selon la verticale. Il suffit de remplacer une des liaisons pivot par une liaison sphère cylindre d'axe z pour rendre le modèle isostatique.

**Q14.** C et E étant disposés symétriquement par rapport au point O,  $C(\rho_C, \theta_C) \Rightarrow E(\rho_E = \rho_C, \theta_E = \theta_C + \pi)$

**Q15 et Q16**

Incidence de la pale : Le système propulsif comporte 4 pales par rotor. Tracer le segment  $IP^*$  en effectuant une rotation de  $-90^\circ$  autour de I du  $[IP]$ . Placer  $F^*$  tel que  $IF=IF^*$ . Placer le point  $H^*$  en sachant que  $EH=EH^*$  et  $FH=F^*H^*$ .  $H^*$  se trouve donc à l'intersection du cercle de centre E et de rayon EH et du cercle de centre  $F^*$  et de rayon  $FH$ . On a deux intersections possibles, on conserve la disposition la plus réalisable. Placer le point  $K^*$  sur la droite  $(EH^*)$  en sachant que  $EK=EK^*$ . De même, Placer  $L^*$  en recherchant l'intersection du cercle de centre  $K^*$  et de rayon KL et le cercle de centre  $P^*$  et de rayon PL. On choisit la disposition la plus probable.

Valeur de l'angle d'incidence :  $\alpha = -44^\circ$

**Q17. Fermeture des chaînes cinématiques :**

Avertissement : Contrairement au navire dont la géométrie (axes de tangage, roulis...) se définit dans le repère  $(I, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ , le mécanisme de transformation de mouvement, lui se définit naturellement dans le repère  $(I, \vec{e}_\theta, \vec{e}_i, \vec{z}_0)$ . Pour ce mécanisme, l'incidence  $\alpha$  se détermine par rapport à  $\beta$ , et comme  $\beta$  est indépendant de  $\theta$  (qui reste fixe sur un tour),  $\alpha$  le sera aussi. De cette observation on en déduira que la résultante des forces hydrodynamiques moyenne sur  $1/4$  tour aura une direction fixe dans ce repère et que son intensité ne dépendra que de la distance IE donc de  $\rho$ . On en déduira aussi naturellement que le repère  $(I, \vec{e}_\theta, \vec{e}_i, \vec{z}_0)$  est bien le repère optimal de projection. (il est à noter de plus que contrairement à l'énoncé, la fonction recherchée ne peut faire intervenir à la fois  $\theta$  et  $\rho$ ).

Etude de la chaîne fermée  $0 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 0$  : fermeture vectorielle :  $\vec{IE} + \vec{EH} + \vec{HF} + \vec{FI} = \vec{0}$

fermeture angulaire :  $\varphi_{03} + \varphi_{34} + \varphi_{42} + \varphi_{20} = \beta + \varphi_{34} + \varphi_{42} + \varphi_{20} = 0$

nota : l'angle  $\varphi_{20}$  est notée  $\varphi_{2\theta}$  dans le sujet,  $\varphi_{42}$  n'est pas défini explicitement...

Etude de la chaîne fermée  $3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 3$  : fermeture vectorielle :  $\vec{FH} + \vec{HK} + \vec{KL} + \vec{LP} + \vec{PF} = \vec{0}$

fermeture angulaire :  $\varphi_{34} + \varphi_{42} + \varphi_{25} + \varphi_{56} + \varphi_{63} = \varphi_{34} + \varphi_{42} + \varphi_{25} + \varphi_{56} - \pi/2 - \alpha = 0$

**Q18. Exploitation du système :** Le système obtenu est un système de 6 équations à 7 inconnues  $\varphi_{34}, \varphi_{42}, \varphi_{25}, \varphi_{56}, \varphi_{02}, \alpha, \beta$  faisant intervenir les paramètres géométriques  $\rho, d, e, r, L, c, R$ . En estimant que le rang du système est de 6, il est possible d'envisager obtenir une expression (non linéaire bien sûr) entre  $\alpha$  et  $\beta$  ainsi que les paramètres géométriques.

**Q19.** La réponse indicielle donnée sur la figure C1 est typique d'un second ordre dans la mesure où elle présente des

dépassements et une tangente horizontale à l'origine. on notera  $D(p) = 1 + 2 \frac{\zeta}{\omega_0^v} p + \frac{1}{(\omega_0^v)^2} p^2$ .

**Q20.** La réponse présente un premier dépassement de 16%  $= (1,6-1)/1$ . D'après la fig C9, cela correspond à une valeur pour  $\zeta$  de 0.5 (sans dimension). Par ailleurs, le temps de réponse à 5% est de 44.5ms. Sachant que, d'après l'abaque C8, le temps de réponse réduit pour  $\zeta = 0,5$  est de 5.2, on en déduit que  $\omega_0^v = 117.4 s^{-1}$ .

Rq : la courbe a pour ordonnée  $v/K_{vh}$ . En réalité, l'ordonnée doit plutôt être  $v/K_v \cdot q_{v0}$ . De toute façon cela n'a pas d'incidence sur la réponse.

**Q21.** Toutes les réponses harmoniques présentent une atténuation de 3dB pour une phasage de  $-45^\circ$ . Cela caractérise le comportement de systèmes du premier ordre.

**Q22.** Le gain statique se détermine lorsque  $\omega \rightarrow 0$ . Donc  $K_{sv} = 4.61 dB = 1,7 m^3 s^{-1} A^{-1}$

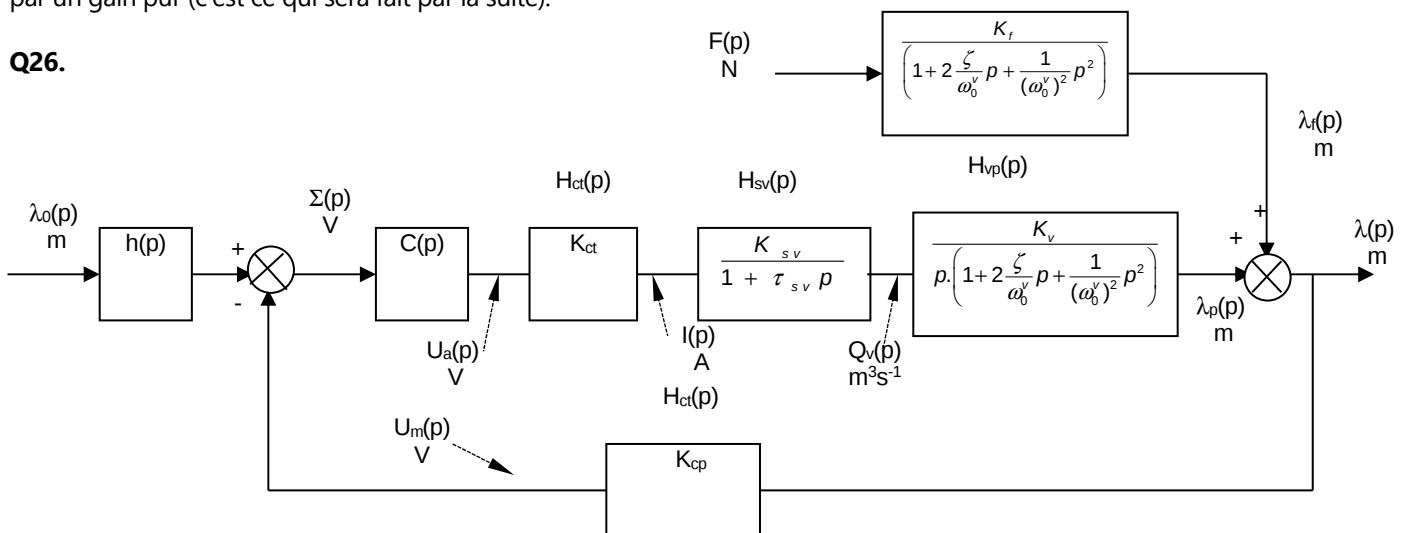
**Q23.** Pour les différentes servo- vannes, la borne supérieure de la bande passante à  $-3\text{dB}$  est :

| Sv  | A  | B  | C  | D   |
|-----|----|----|----|-----|
| fsv | 20 | 50 | 75 | 125 |

**Q24.** Une augmentation de la bande passante caractérise une augmentation de la rapidité du système ( critère relatif). A la cassure, la pulsation réduite vaut 1. On en déduit alors que  $\omega_{vh} = \omega_0^v = 117\text{rd/s}$  et que  $f_{vh} = 19\text{Hz}$ .

**Q25.** Les servo valves c et d conviennent puisque leur BP dépasse  $3 \times 19\text{ Hz}$ . Si l'on prend une servo valve à BP élevée, cela signifie que sa dynamique pourra être négligée devant celle de l'actionneur. En conséquence, elle pourra être modélisée par un gain pur (c'est ce qui sera fait par la suite).

**Q26.**



**Q27.** Le bloc  $h(p)$  est un adaptateur qui transforme la consigne en une tension compatible au niveau du comparateur. Pour que l'écart soit nul lorsque consigne et position atteinte sont égales, il est nécessaire d'avoir  $h(p) = H_{cp}(p)$ . L'unité de  $h(p)$  est le  $\text{V m}^{-1}$ .

**Q28.** Le système est de classe 1 car il y a un intégrateur dans la chaîne directe. Son erreur statique en position est donc nulle en l'absence de perturbation. Le CdCF est alors vérifié pour ce critère puisqu'il impose un écart inférieur à  $1,5\text{mm}$ .

**Q29.** Le dépassement maxi imposé par le CdCF est de 1%. Pour une consigne de  $0,1\text{m}$ , cela correspond à une valeur maxi en sortie de  $0,101\text{m}$ . Seules les valeurs de 10 et de 15 permettent, d'après la figure C4, de respecter ce critère.

**Q30.** Pour ces valeurs, les temps de réponse à 5% sont respectivement de  $0,15$  et  $0,12\text{s}$ . La contrainte de  $0,11\text{s}$  maxi n'est pas respectée.

**Q31.** Si l'on veut respecter simultanément les critères de dépassement et de rapidité, il est nécessaire d'augmenter la valeur du gain. Cela est possible car il reste une marge sur le dépassement. (lorsque  $k_{cor} = 15$  le dépassement n'est que de  $0,25\%$ ). Par régression linéaire, la valeur réelle qui respecte le critère dépassement est de 16. Pour cette valeur le temps de réponse sera inférieur alors aux  $11\text{ms}$  préconisées. Le gain du correcteur agit dans deux sens contradictoires. Il augmente la rapidité mais aussi le dépassement. Un réglage de sa valeur reste un affaire de compromis.

**Q32.** Pour les basses fréquences, la boucle ouverte du système est assimilable à un intégrateur (on le vérifie avec la pente de  $-20\text{ dB/decade}$ ). Comme pour  $\omega = 10\text{rd/s}$ , le gain est de  $12\text{dB}$  (soit 40) et que  $K_{BO} = K_{cp} \cdot K_{ct} \cdot K_{sv} \cdot K_v \cdot K_{cor} = 15 \times 4,7 \times 31,84 \times 1/300 \times K_{cor}$  alors  $K_{cor} = 15$ .

**Q33.** Le système est stable en boucle fermée car le critère graphique du revers est vérifié. (On rappelle qu'un système est stable si pour  $0\text{ dB}$  la phase est supérieure à  $-180^\circ$  et si pour une phase de  $-180^\circ$  le gain est négatif).

**Q34.** Les marges de phase et de gain sont respectivement de  $63^\circ$  et  $9\text{dB}$ . Le CdCF n'est pas respecté pour le critère marge de gain (supposé  $>10\text{dB}$ ).

**Q35.** Pour assurer une stricte stabilité il faudrait remonter la courbe de gain de 9 dB soit multiplier le gain par 2,8 ce qui donnera  $K_{cor}=42$  (ceci dit, on ne respecte plus les autres critères). Pour respecter les marges de stabilité, le critère le plus restrictif étant celui de la marge de gain, il faudrait descendre la courbe de gain de 1 dB ce qui équivaut à multiplier le gain par 0,89. Dans ce cas  $K_{cor}=13,4$ .

**Q36.** Le rappel des réglages donne : temps de réponse :  $K_{cor} > 15$  + dépassement :  $K_{cor} < 16,5$  marge de phase :  $K_{cor} < 26$  (\*) marge de gain :  $K_{cor} < 13,4$  précision  $K_{cor}$  quelconque (\*) : pour une phase de  $-135^\circ$ , le gain est de  $-4,7\text{dB}$  ce qui autorise à remonter la courbe de 4,7dB et correspond à une multiplication du gain par 1,72 donc à un gain de 26.

**Q37.** Les contraintes marge de gain et temps de réponse étant incompatibles, le choix d'un correcteur proportionnel ne paraît pas approprié. Il serait préférable d'utiliser un correcteur P et D ou un correcteur à avance de phase (cf. cours à venir).