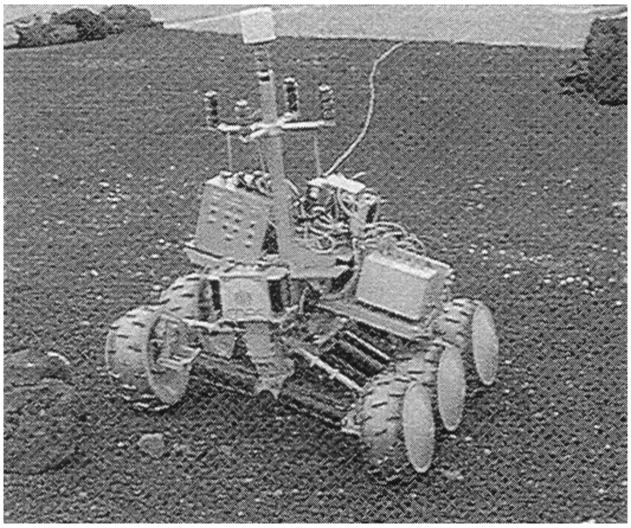
Véhicule d'exploration de Mars : IARES

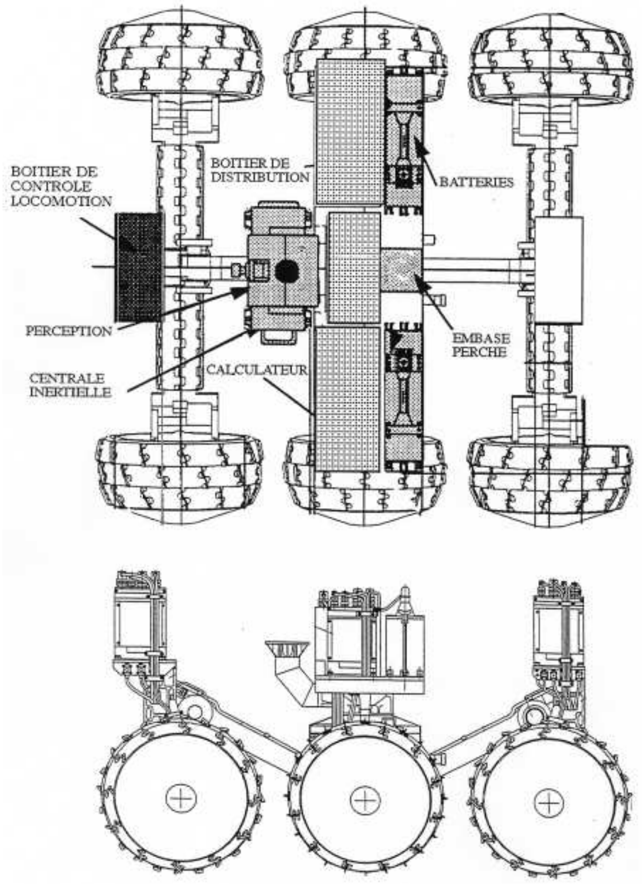


Dans le cadre de l'exploration du système planétaire, le C.N.E.S. (Centre National d'Etudes Spatiales) développe un prototype de véhicule martien comportant des capacités de large autonomie.

Les robots existants dédiés à l'exploration spatiale sont pilotés depuis la Terre au travers d'un mode de commande de type cartésien. C'est-à-dire que le véhicule est équipé d'un banc stéréovision simple fait de deux caméras décalées. Les images brutes qu'il capte sont envoyées au sol, via une station de réception. Elles sont présentées à un opérateur, sous forme d'images en relief ou sous forme de Modèle Numérique de Terrain (MNT), qui choisit alors l'itinéraire que devra emprunter le robot.

L'idée des équipes de robotique du CNES est de donner au robot les moyens d'effectuer ses déplacements de manière plus autonome, c'est-à-dire en faisant beaucoup moins appel à l'opérateur resté sur erre. Dans ce mode, le robot est équipé d'un banc de stéréovision couplé à un calculateur. Le calculateur de bord construit une carte d'obstacles faisant apparaître les zones inconnues en noir, les zones dangereuses en rouge, les zones intermédiaires en bleu…Ensuite les calculs permettent de déterminer la trajectoire la plus sécurisante possible.

Le robot IARES a été conçu pour étudier la composition chimique de la surface de la planète Mars. Les principaux composants de ce robot sont:



• un corps, appelé 'Warm Electronic Box', dont la fonction est d'assurer la liaison entre les divers composants. Il supporte les batteries qui sont chargées par des capteurs solaires. Il protège également l'électronique embarquée des agressions extérieures.

• une tête périscopique orientable dont la fonction est d'orienter le système de vision appelé 'Pancam' (Panoramic Caméra) qui se trouve à 1,40 m de hauteur. Ce dernier fournit une vue en 3 dimensions de l'environnement. Le traitement des images acquises par les caméras du système Pancam permet à IARES de réaliser une cartographie des terrains et donc de trouver de manière autonome son chemin en évitant les obstacles. Cette autonomie de déplacement est renforcée par l'utilisation de quatre caméras de direction situées sur le corps.

• un bras articulé, dont la fonction est d'amener quatre outils (une foreuse, un microscope et deux spectromètres) à proximité d'une roche à étudier. L'étude de la roche par ces quatre outils se fait par des carottages horizontaux.

• six roues, animées chacune par un motoréducteur, dont la fonction est d'assurer le déplacement de IARES sur un sol caillouteux.

• un système de communication et des antennes hautes et basses fréquences, dont la fonction est de permettre à IARES de communiquer avec la Terre.

L'application proposée ici concerne l'étude de la régulation de vitesse d'une des roues motrices de cet engin.

Cahier des charges à respecter

Fonction	Critères	Niveaux
Assurer une vitesse d'avance constante du robot	**Stabilité** • Marge de gain • Marge de phase	MG = 6dB mini Mφ = 45°mini
	Précision **En poursuite** • Erreur statique en échelon **En régulation** • Influence d'un échelon en couple de perturbation en régime permanent	Nulle Nulle
	Rapidité • Temps de réponse à 5% à une entrée en échelon	0,5 seconde

Modélisation du moteur :

Les moteurs utilisés pour l'entraînement des roues sont des moteurs électriques à courant continu et aimants permanents à terres rares pour augmenter le rapport puissance/masse. Le comportement d'un moteur peut être modélisé par les équations suivantes :

(1) $u(t) = e(t) + R.i(t) + L\dfrac{di(t)}{dt}$

(2) $e(t) = K_e\omega_m(t)$

(3) $K_c i(t) = c_m(t)$

(4) $J_{me}\dfrac{d\omega_m}{dt} = c_m(t)$

On suppose les conditions initiales nulles

u(t)	tension d'induit (V)	
i(t)	courant d'induit (A)	
R	résistance d'induit (Ω)	**R = 1,1 Ω**
L	inductance de l'induit (H)	**L = 0,5.10^{-3} H**
$c_m(t)$	couple moteur (Nm)	
e(t)	force contre-électromotrice (V)	
J_{me}	inertie globale équivalente sur l'arbre moteur (kg.m²) on prendra	**J_{me} = 3,32.10^{-6} kg.m²**
Kc	constante de couple (Nm/A)	**Kc = 0,0255 Nm/A**
Ke	constante de force contre-électromotrice (V/rad/s)	**Ke = 0,026 V/rad/s**
$\omega_m(t)$	vitesse de rotation du moteur (rad/s)	

<u>Notation :</u> La transformée de Laplace d'une fonction scalaire f(t) de la variable temporelle t, est notée F(p) où p est la variable complexe associée à la transformée.

1. Exprimer les équations (1) à (4) dans le domaine de Laplace. Rédiger le schéma bloc du moteur, entrée U(p), sortie $\Omega_m(p)$.
2. Déterminer la fonction de transfert du moteur $H(p)=\dfrac{\Omega_m(p)}{U(p)}$
   Exprimer les paramètres caractéristiques de H(p) : Km, ζ et ω_0 .
3. Déterminer numériquement Km, ζ et ω_0
4. Sans faire le calcul de l'expression littérale de la sortie $\omega_m(t)$, tracer l'allure de la sortie $\omega_m(t)$ pour une entrée en échelon $u_0(t) = 20$. Donner le nom du régime de fonctionnement.
   Préciser toutes les valeurs particulières et, à l'aide de l'annexe, déterminer le temps de réponse à 5%.
5. Exprimer H(p) numériquement et mettre H(p) sous la forme : $H(p)=\dfrac{K_m}{(1+T_1p)(1+T_2p)}$.

Pour la suite, on prendra Km=38.5 rad/s/V, T1=0.005s et T2= 0.0005s

La réponse à une entrée échelon $u_0(t) = 20$ est $\omega m(t) = 770\left(1 - \frac{10}{9}e^{-200t} + \frac{1}{9}e^{-2000t}\right)$

6. Justifiez la modélisation du premier ordre pour H(p) : $H(p) = \frac{K_m}{(1+T_1 p)} = \frac{38.5}{(1+0.005p)}$
   Donner l'expression littérale de la sortie $\omega_m(t)$ à une entrée échelon $u_0(t) = 20$ et tracer l'allure de la sortie $\omega_m(t)$ pour une entrée en échelon $u_0(t) = 20$.
   Préciser toutes les valeurs particulières et donner le temps de réponse à 5%.

Régulation de vitesse :

La première solution envisagée est de réaliser la régulation de la vitesse comme le montre la figure 1. La génératrice tachymétrique de gain Kg = 0,1 V/rad/s, délivre une tension proportionnelle à ω_m qui est comparée à la consigne. L'amplificateur de puissance est de gain A = 5. La fonction de transfert du correcteur est notée C(p), et celle du moteur H(p).

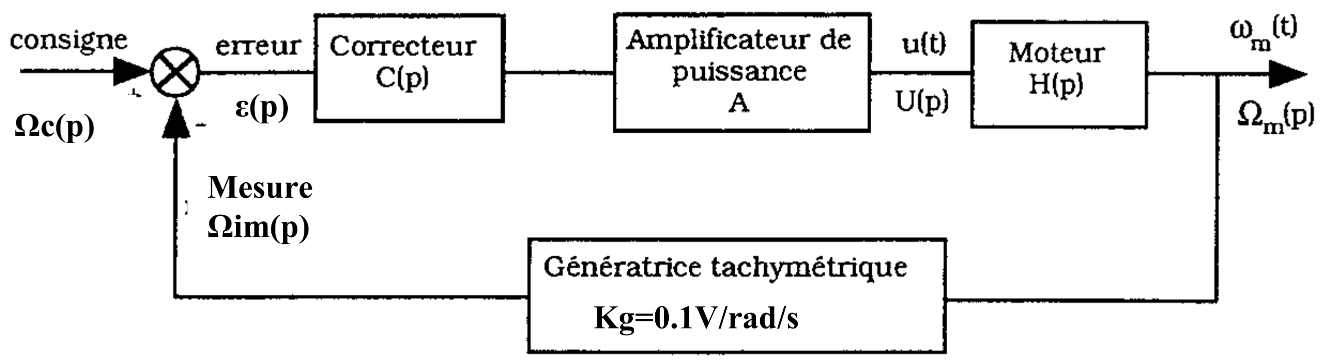


Figure 1 : Régulation de vitesse

Dans la suite du problème, et indépendamment des résultats précédents, la fonction de transfert du moteur sera $H(p) = \frac{38,5}{(1+0,5.10^{-3}p)(1+5.10^{-3}p)}$

Etude temporelle avec correction proportionnelle : $C(p) = K$

7. Déterminer la fonction de transfert en boucle fermée, notée $F_1(p)$, du système de la figure 1 en fonction de K. Montrer ainsi que cette fonction de transfert peut-être mise sous la forme

$$F_1(p) = \frac{\Omega_m(p)}{\Omega_c(p)} = \frac{K_s}{1+2\xi p/\varpi_0 + (p/\varpi_0)^2}$$

   Identifier Ks, ξ et ϖ_0 en fonction de K et des constantes du système.

8. Pour quelle valeur de K, appelée K_0, ce système possède-t-il un coefficient d'amortissement $\xi = 0,7$
   Déterminer les valeurs de la pulsation propre et du gain statique pour cette valeur de K, notée K_0.
   Exprimer $F_1(p)$ numériquement.

9. Tracer la réponse indicielle ωm(t)à un echelon ωc(t)=10 rad/s.
   Calculer la valeur finale, le premier dépassement, la pseudo période , l'instant et la valeur du premier maximum et le temps de réponse à 5%.

10. Déterminer, pour C(p)=K, la fonction de transfert en boucle ouverte du système $G_1(p) = \frac{\Omega_{im}(p)}{\varepsilon(p)}$.

11. A partir du schéma de la figure 1, démontrer que $\varepsilon(p)=\frac{\Omega c(p)}{1+G1(p)}$.

    En déduire, à l'aide du théorème de la valeur finale, l'erreur statique $\varepsilon s=\lim_{t\to\infty}\varepsilon(t)$ pour l'entrée $\omega c(t)=10$. Exprimer εs en fonction de K, puis de K_0. Interpréter ce résultat par rapport à la classe du système en boucle ouverte et conclure quand au respect du cahier des charges. Proposer une solution de correcteur pour respecter le cahier des charges s'il n'est pas respecté.

Etude fréquentielle en bouce ouverte avec correction proportionnelle : $C(p) = K$

La réponse fréquentielle en boucle ouverte de $G_1(p)$, est représentée, sur le document réponse 1, par le diagramme de Bode pour K = 1.

12. Tracer ,sur ce document, en utilisant deux couleurs différentes, les diagrammes asymptotiques de gain et de phase pour K=1 et $K = K_0=0.27$.

13. Pour ces deux valeurs de gain, déterminer à l'aide du diagramme asymptotique de Bode, les pulsations de coupure à 0dB ω_{c0}. En déduire les bandes passantes à 0dB exprimées en Hz.

14. Mesurer, pour les deux valeurs de gain précédentes, les marges de phase du système. Préciser les marges de gains et conclure quant aux critères du cahier des charges dans chaque cas.

Etude fréquentielle en bouce fermée avec correction proportionnelle : $C(p) = K$

La réponse fréquentielle en boucle fermée de $F_1(p)$, est représentée, sur le document réponse 2, par le diagramme de Bode pour une certaine valeur de K à déterminer.
Par soucis de précision, un tableau de valeurs est fourni en dessous du diagramme de bode.

15. Justifier, en apportant toutes les précisions nécessaires, la forme $\frac{K_s}{1+\frac{2\xi}{\varpi_0}p+\frac{p^2}{\varpi_0{}^2}}$ pour $F_1(p)$ en précisant la particularité du facteur d'amortissement.

16. A partir du bode et du tableau de valeur fourni, déterminer Ks, ζ, ω_0 et ω_r.
    En déduire, grâce aux relations de la question 7, la valeur de K.

17. Tracer, sur les diagrammes de bode et de phase du document réponse 2, les diagrammes asymptotique de gain et de phase.

    Le système est soumis à une entrée sinusoïdale non déphasée de pulsation ω et d'amplitude Ω_{c0}.

18. Exprimer l'équation de l'entrée $\omega_c(t)$ et de la sortie $\omega_m(t)$.

19. Pour ω=100 rad/s et $\omega=\omega r$, déterminer et tracer l'allure de $\omega_c(t)$ et $\omega_m(t)$ en précisant les valeurs particulières judicieuses.

Correction Proportionnelle Integrale : $C(p) = K\frac{1+Tp}{p}$

20. En utilisant les résultats de la question 11, déterminer l'erreur statique εs.

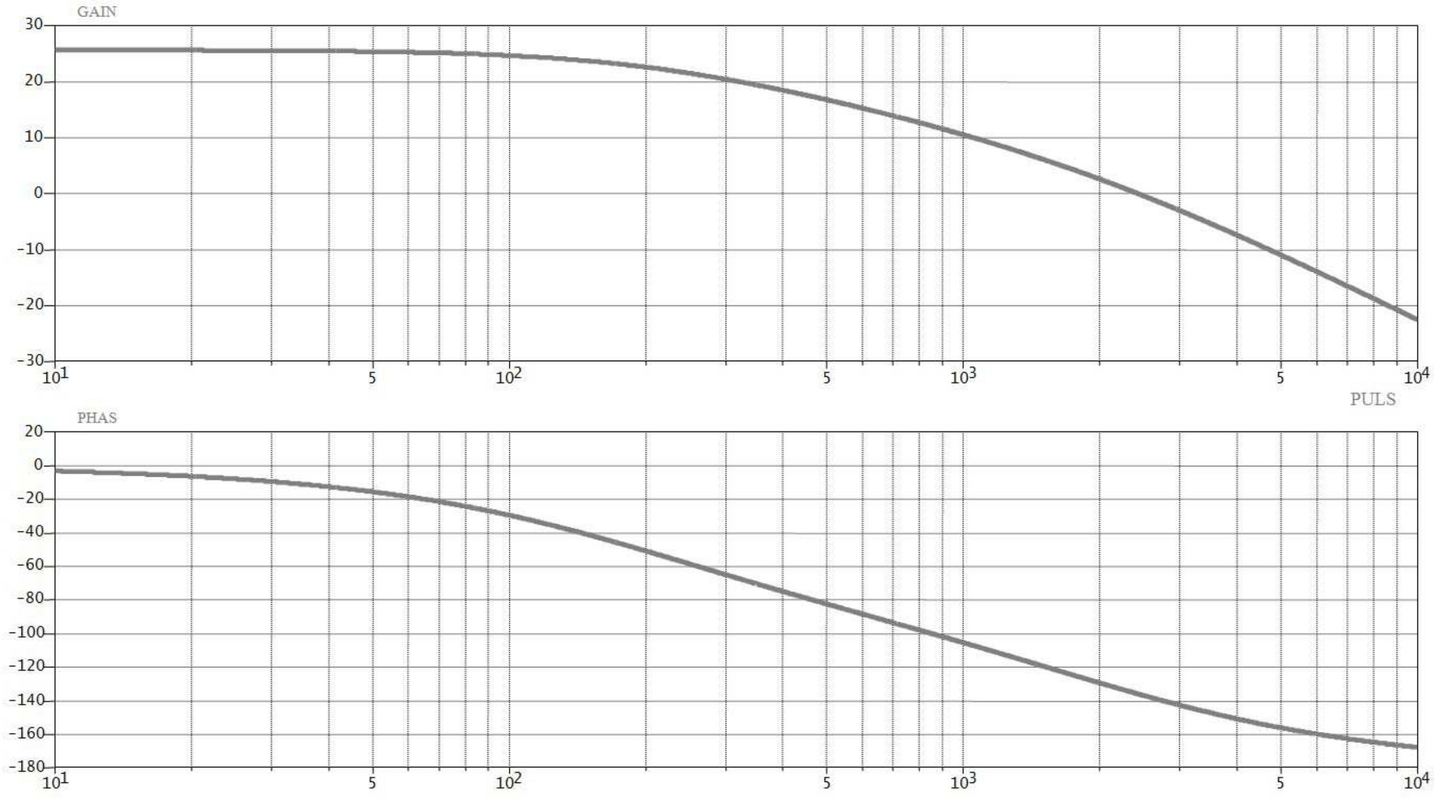
21. Tracer, sur votre copie, les diagrammes asymptotiques de gain et de phase de $C_1(p)=\frac{K}{p}$.

22. Tracer, sur votre copie, les diagrammes asymptotiques de gain et de phase de $C(p) = K\frac{1+Tp}{p}$.

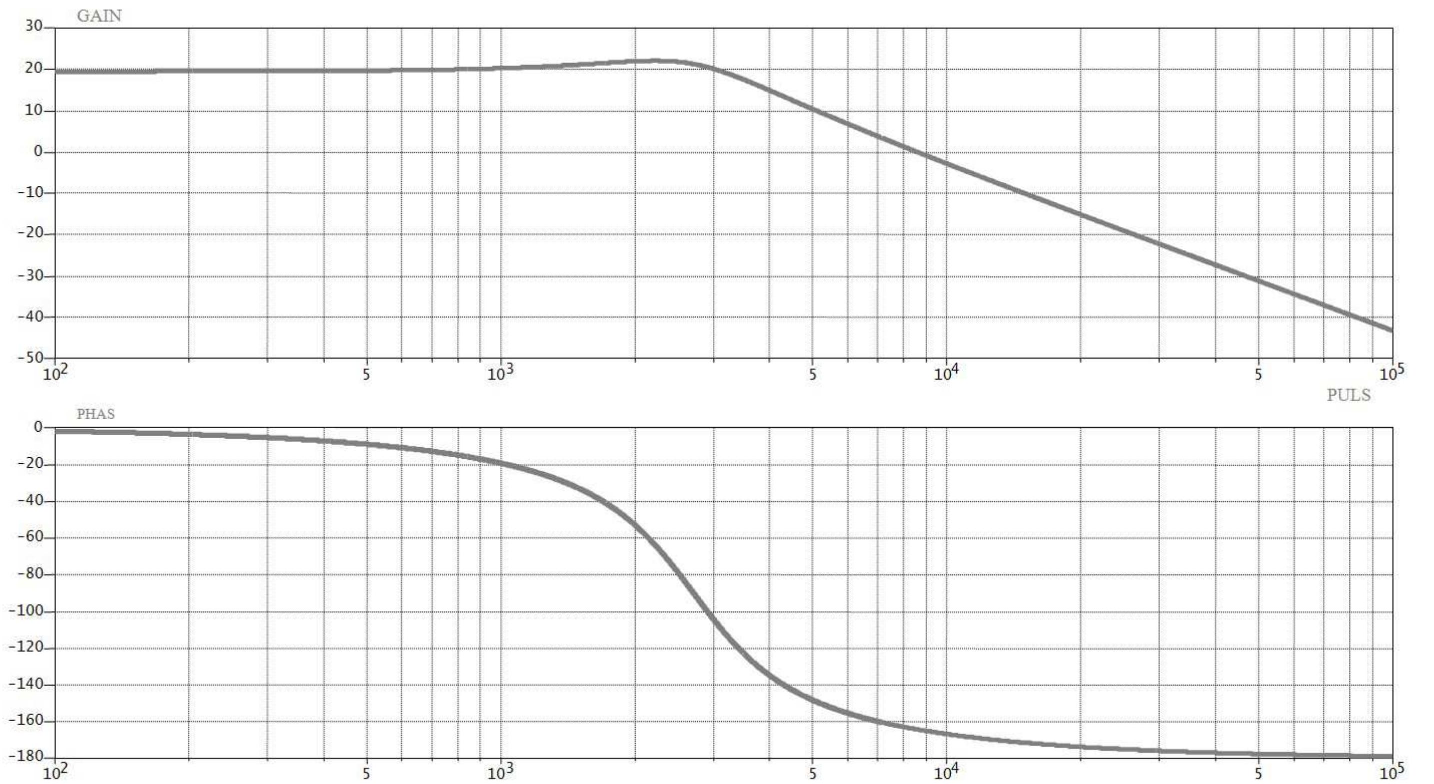
    On choisit K=100 et T = 0.002s

23. Tracer, en utilisant une couleur différente sur le document réponse 1, les diagrammes asymptotiques de gain et de phase du correcteur C(p) et du système corrige $C(p)*G_1(p)$.

Document Réponse 1 : réponse fréquentielle en boucle ouverte



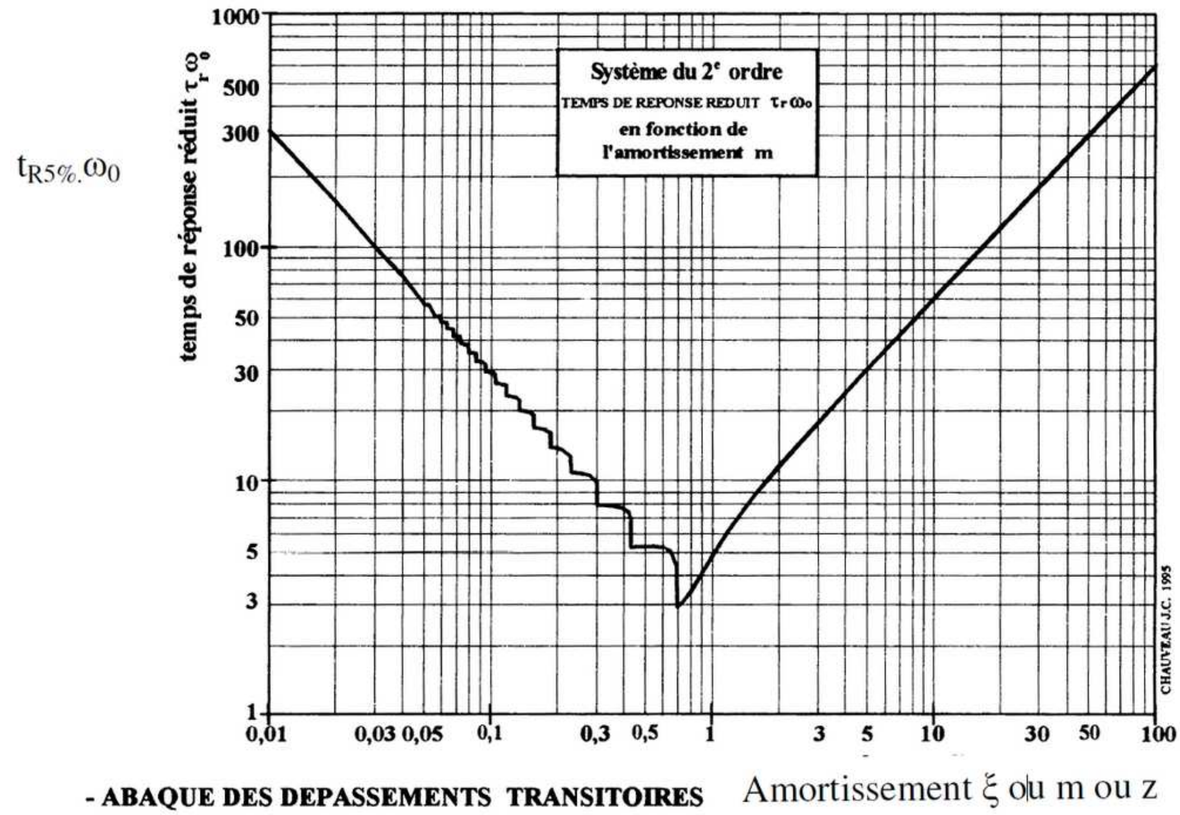
Document Réponse 2 : réponse fréquentielle en boucle fermée



ω (rad/s)	100	2000	ωr	2707	5000	10000	100000
GdB	19,52	21,98	22,09	21,31	10,4	-31	-43,12
φ (°)	-1.7	-53	-64,5	-90	-148	-177	-178,7

Annexe

- ABAQUE DU TEMPS DE REPONSE REDUIT



- ABAQUE DES DEPASSEMENTS TRANSITOIRES