

# VEHICULE HYBRIDE TOYOTA PRIUS

## PARTIE I - PRESENTATION DU SYSTEME ET DE SES MODES DE FONCTIONNEMENT

**Objectif :** comprendre l'architecture du système HSD par une approche globale.

### I.A - Introduction

Dans le contexte actuel d'économie des énergies fossiles et de réduction des émissions de gaz nocifs, le système de propulsion hybride constitue une alternative intéressante à la propulsion classique par moteur thermique seul car il permet de réduire la consommation.

La spécificité de la solution retenue sur la Prius consiste à :

- Récupérer l'énergie du véhicule lors du freinage,
- Exploiter le moteur thermique à son rendement optimal.



Photo 1

### I.B - Architecture du système hybride HSD TOYOTA

Comme le montre le dessin la figure 1, la technologie hybride de TOYOTA, nommée HSD (Hybrid Synergy Drive) associe un moteur thermique à essence et sa transmission, à deux machines électriques et une batterie de puissance.

Le schéma de principe ci-contre et le figure 1 mettent en évidence les deux machines électriques (le moteur électrique et la génératrice) reliées au moteur thermique par un train épicycloïdal.

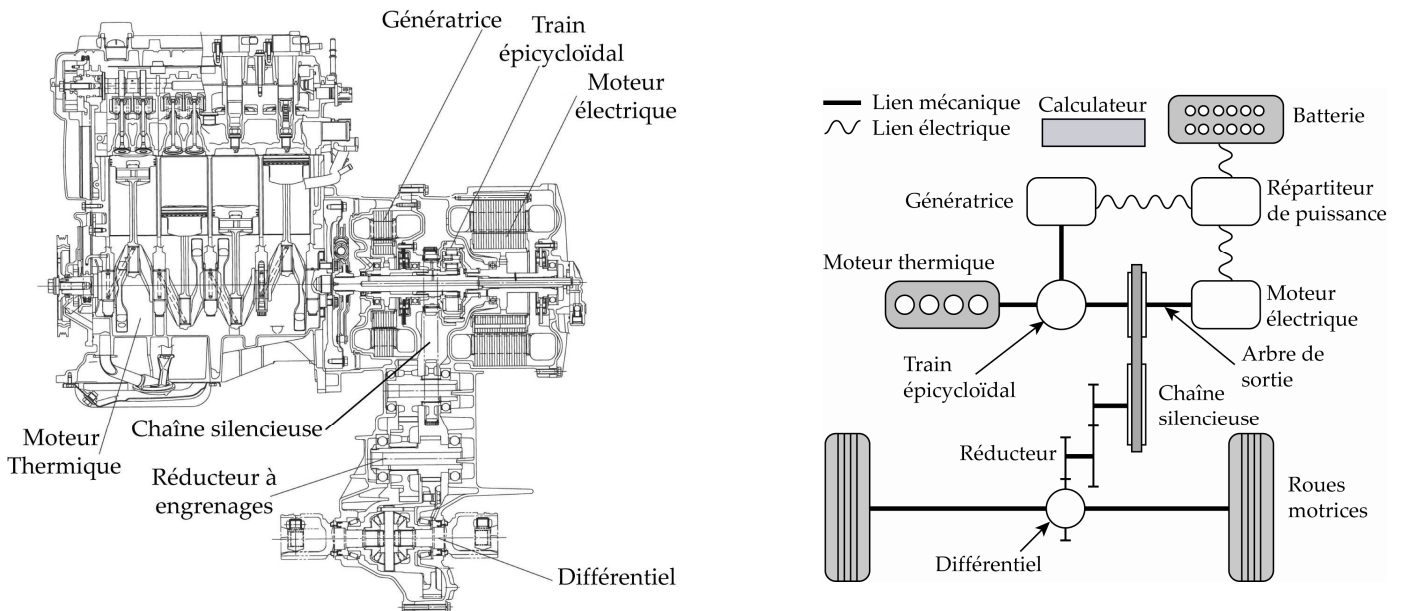


Figure 1

A partir de la position de la **pédale d'accélérateur** et de la vitesse du véhicule, le **calculateur** détermine la **vitesse de rotation optimale du moteur thermique** et la consigne d'**ouverture du papillon des gaz**. La puissance en sortie du moteur thermique est transmise, grâce à un **train épicycloïdal**, à la **chaîne silencieuse** et à la **génératrice**. Un **asservissement en vitesse** de la génératrice permet de contrôler la vitesse de rotation du moteur thermique.

Le **répartiteur de puissance** gère les échanges de puissance électrique entre la **génératrice**, le **moteur électrique** et la **batterie**.

Le **moteur électrique** entraîne la chaîne silencieuse, seul ou en complément du moteur thermique. Il récupère également l'énergie cinétique ou potentielle du véhicule lors des phases de ralentissement.

Les chaînes d'énergie et d'information, figure 2, permettent de percevoir l'organisation des différents composants du HSD. Les fonctions des capteurs relatifs à l'enfoncement de la pédale de frein, au sélecteur de marche et à la température de l'eau du moteur thermique seront développées ultérieurement.

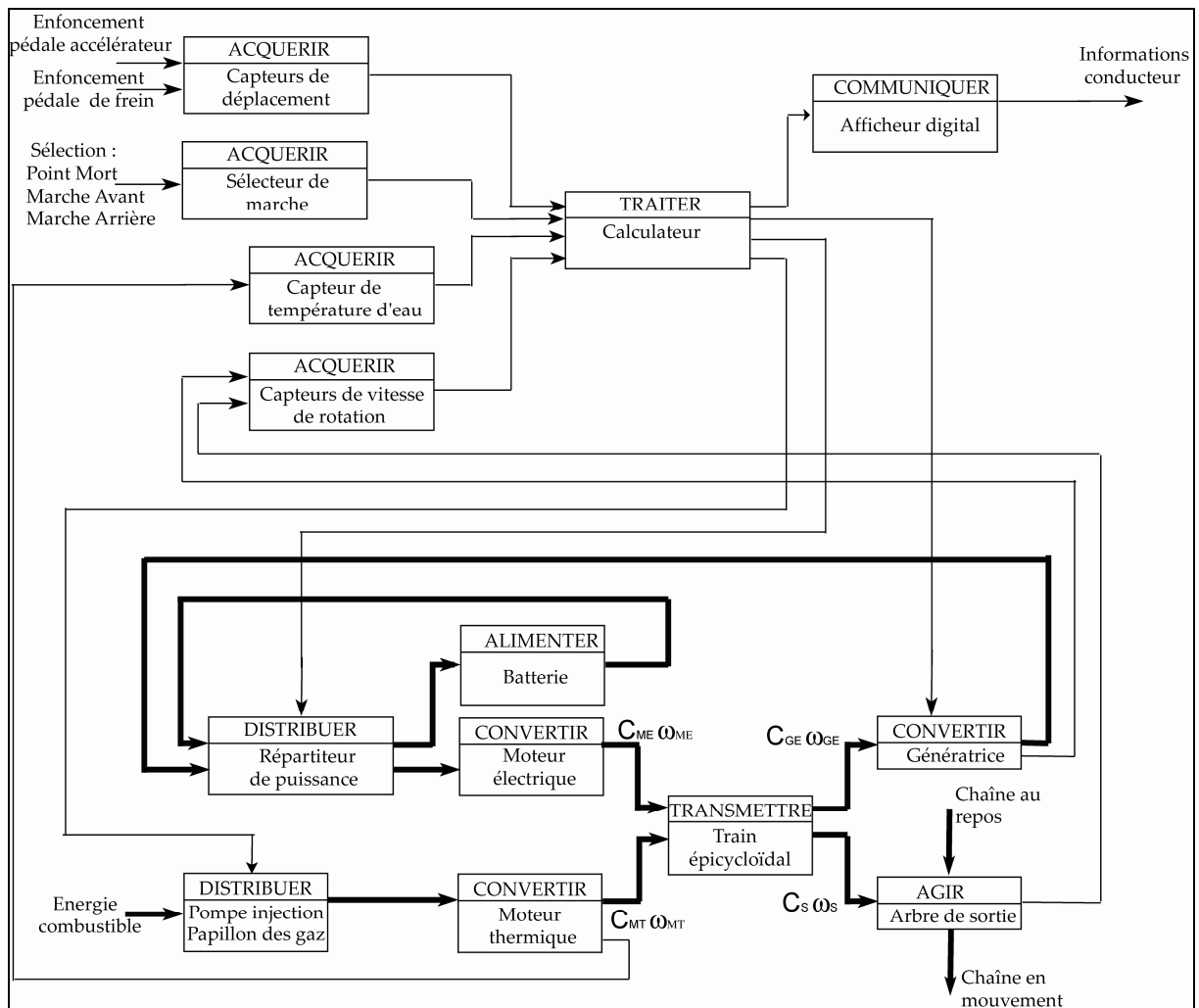


Figure 2 – Chaîne d'information (partie supérieure) et Chaîne d'énergie (partie inférieure)

### Caractérisation des fonctions de service en phase d'utilisation

Le Cahier des Charges, tableau 1, caractérise les fonctions de services du système HSD.

Fonctions de service	Critères	Niveaux
<b>FS1</b> : permettre au combustible d'entraîner le véhicule	Réduction de la consommation par rapport aux véhicules traditionnels comparables	40 %
	Consommation en cycle mixte	4,3 l pour 100 km
	Vitesse maximale	170 km/h
	Temps d'accélération de 0 à 100 km/h	10,9 s
	Temps d'accélération de 50 à 80 km/h	4,4 s
	Puissance maximale du système hybride	110 kW à 85 km/h
<b>FS2</b> : respecter l'environnement	Réduction des émissions nocives de CO <sub>2</sub>	40 % en dessous des normes européennes
<b>FS3</b> : être commandé par le conducteur	Positions du sélecteur Enfoncements des Pédales	PM/MA/MAR Accélérateur/frein
<b>FS4</b> : s'adapter à la vitesse du véhicule	Vitesse de passage du mode tout électrique au mode hybride (démarrage du moteur thermique)	50 km/h
<b>FS5</b> : alimenter en énergie les composants auxiliaires	Puissance maximale absorbée par les « consommateurs » d'énergie (climatisation, direction assistée, confort, ...)	4 kW maxi
<b>FS6</b> : récupérer l'énergie cinétique du véhicule en freinage	Pourcentage de l'énergie cinétique récupérable	70 %

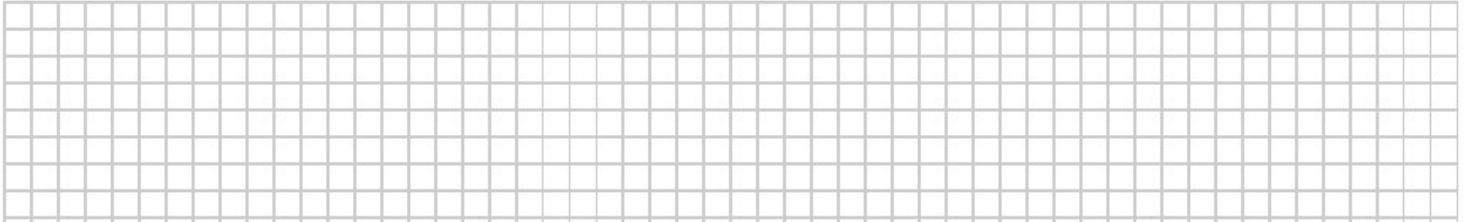
Tableau 1

**Remarque :** la performance de consommation en cycle mixte est à comparer à une consommation de 7,7 l / 100 km pour un véhicule à essence classique aux caractéristiques comparables.

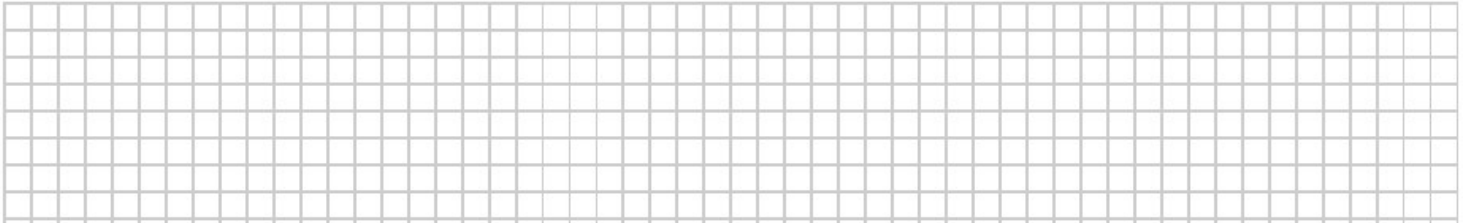
1. Citer au moins trois solutions technologiques permettant d'acquérir une vitesse de rotation dans le contexte du système étudié.



2. Citer au moins deux solutions technologiques permettant d'acquérir un déplacement dans le contexte du système étudié.



3. Proposer deux solutions technologiques alternatives à la chaîne silencieuse dans le contexte du système étudié.



### **I.C - Analyse des performances à partir de résultats de simulation**

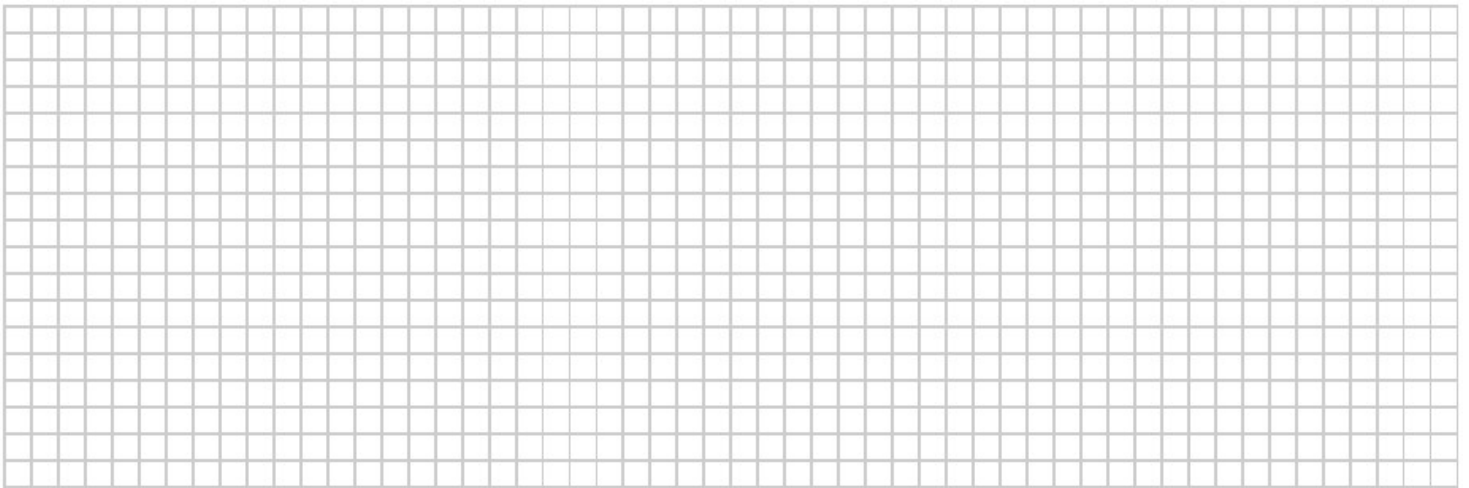
L'objectif est de construire un modèle dynamique du véhicule Prius.

Ce modèle, sous forme de schéma bloc, permet, après simulation numérique, d'obtenir les courbes temporelles d'évolution (annexe 1) :

- de la vitesse du véhicule  $V$  en km/h,
- de la puissance électrique consommée ou générée par le moteur électrique  $P_{ME}$  en Watt,
- de la puissance mécanique fournie par le moteur thermique  $P_{MT}$  en Watt.

Par la suite, on utilisera ces courbes pour valider les performances. Le schéma bloc sera justifié et complété au cours du sujet.

4. En analysant la courbe de votre choix, valider les temps d'accélération figurant dans le cahier des charges.



**Objectif :** *déterminer les paramètres de l'asservissement associé en mode hybride.*

La gestion optimale des **modes de fonctionnement** du système hybride (paragraphe II.B) permet d'optimiser la consommation d'énergie chimique. La vitesse du moteur thermique est asservie (par le biais d'un **asservissement de la vitesse** de la génératrice) à des valeurs optimales définies par le calculateur (paragraphe II.C). Le moteur est ainsi exploité à son rendement maximal. Il existe quatre modes principaux de fonctionnement du véhicule hybride :

<b>Mode</b>	<b>Commentaires</b>
<b>Mode 1 : tout électrique</b>	Le moteur électrique entraîne le véhicule en puisant l'énergie électrique dans la batterie. Le moteur thermique est généralement arrêté.
<b>Mode 2 : hybride</b>	Le moteur thermique entraîne le véhicule. La puissance du moteur thermique en fonctionnement se répartit dans le train épicycloïdal entre : <ul style="list-style-type: none"> <li>• La puissance directement transmise aux roues,</li> <li>• La puissance transmise à la génératrice qui alimente alors directement le moteur électrique.</li> </ul>
<b>Mode 3 : récupération d'énergie</b>	Le moteur électrique, entraîné par le véhicule, récupère une partie de l'énergie cinétique et la convertit en énergie électrique qui recharge la batterie.
<b>Mode 4 : mode mixte</b>	Le moteur électrique et le moteur thermique entraînent le véhicule, lors de fortes accélérations. Dans ce mode, le moteur électrique est alimenté non seulement par l'énergie délivrée par la génératrice mais aussi par la batterie, ce qui correspond au cumul des deux modes 1 et 2. Ce mode de fonctionnement ne sera pas étudié ici.

**Tableau 2**

**II.A - Contrôle de la vitesse du moteur thermique en fonctionnement hybride**

En mode hybride, la vitesse de rotation du moteur thermique est réglée afin de le faire fonctionner à son rendement maximum. Ce contrôle ne pouvant être réalisé au niveau du papillon des gaz, c'est un asservissement en vitesse de la génératrice qui permet de contrôler l'ensemble des autres vitesses de rotation.

La consommation du véhicule est directement liée aux qualités de cet asservissement. Cette partie s'intéresse à la justification et au dimensionnement d'un correcteur approprié.

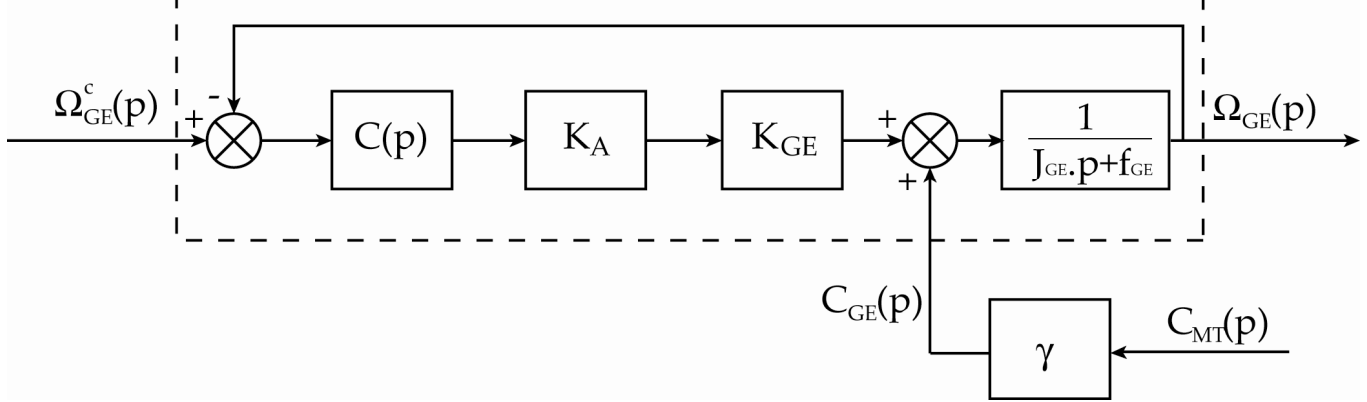
Les performances attendues de cet asservissement sont les suivantes :

<b>Critères</b>	<b>Niveaux</b>
<b>Précision</b>	Erreurs statiques : <ul style="list-style-type: none"> <li>○ nul vis à vis d'une commande en échelon du type <math>\omega_{GE}^C(t) = \omega_0 u(t)</math>, <math>\omega_0</math> constante, et <math>u(t)</math> la fonction échelon unité.</li> <li>○ nul vis à vis d'une perturbation constante du type <math>c_{MT}(t) = C_0 u(t)</math>, <math>C_0</math> constante.</li> </ul>
<b>Rapidité</b>	Pulsation de coupure à 0dB de la FTBO : $\omega_{0dB} = 1,5 rad / s$
<b>Stabilité</b>	Marge de phase $M_\varphi > 45^\circ$

**Tableau 3**

Le modèle est extrait du modèle complet du système HSD. Un asservissement (non étudié ici) régule le courant dans la génératrice. Ainsi, les comportements mécanique et électrique de la génératrice se modélisent par le schéma bloc figure 3 où  $C_{MT}$  est assimilé à une perturbation extérieure.

Asservissement de vitesse de la génératrice



Avec  $K_{GE} = 2Nm/A$  ;  $K_A = 0,5A/V$  ;  $J_{GE} = 0,2kg.m^2$  ;  $f_{GE} = 0,05Nms$  et  $\gamma = 0,28$ .

**Figure 3**

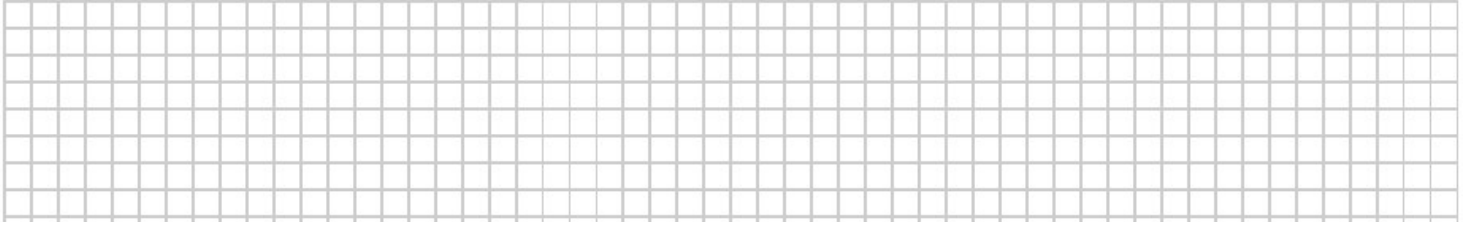
Dans un premier temps le correcteur est unitaire tel que :  $C(p) = 1$ .

5. Déterminer l'expression de  $\Omega_{GE}(p)$  en fonction de  $\Omega_{GE}^c(p)$  et de  $C_{MT}(p)$  en mettant l'expression sous la forme  $\Omega_{GE}(p) = H(p).\Omega_{GE}^c(p) + G(p).C_{MT}(p)$ . Donner les fonctions transferts  $H(p)$  et  $G(p)$  sous forme canonique.

Nous considérons dans un premier que la perturbation extérieure  $C_{MT}(p)$  est nulle.

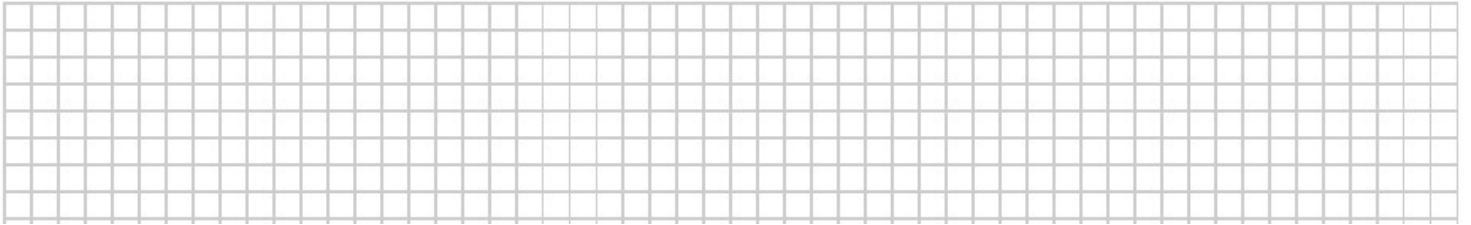
6. Déterminer l'expression numérique de  $H(p)$ .

7. Le système est-il stable en BF ?

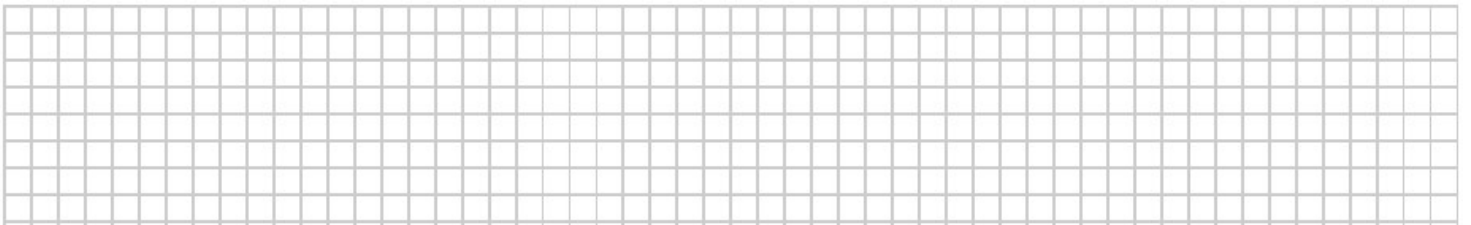


La perturbation extérieure  $c_{MT}(t)$  est maintenant modélisée par un échelon  $c_{MT}(t) = C_0.u(t)$ . La consigne de vitesse  $\omega^C_{GE}(t)$  est elle aussi un échelon  $\omega^C_{GE}(t) = \omega_0.u(t)$ .

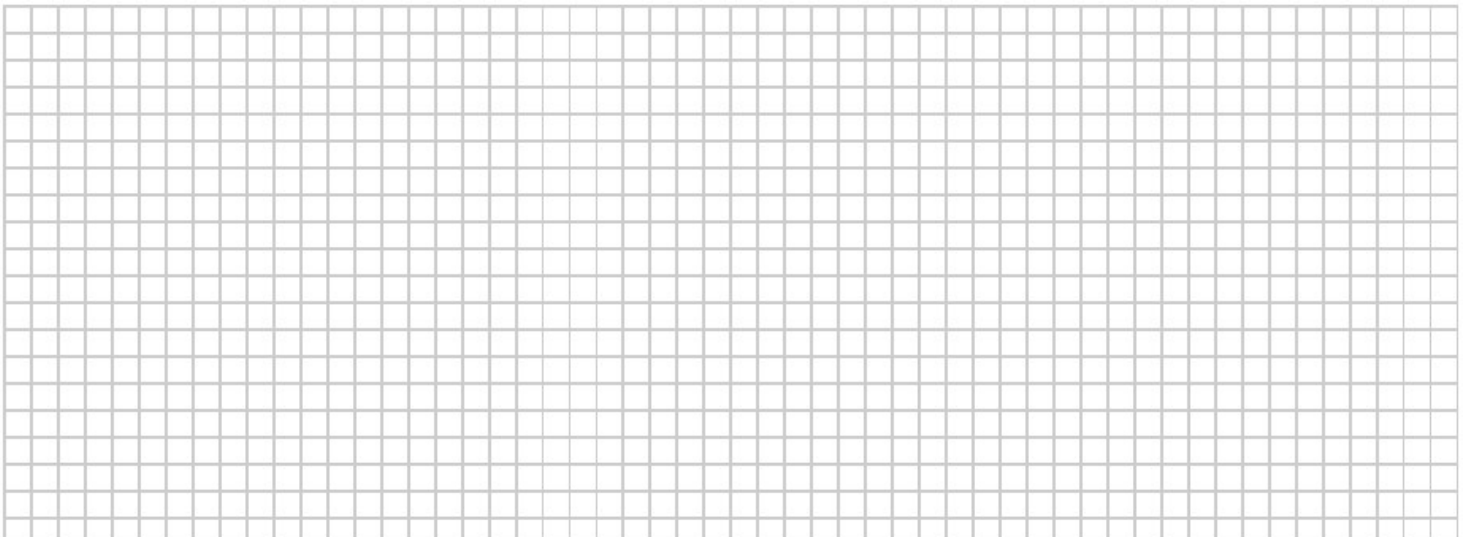
7. Déterminer l'expression de la FTBO du système vis-à-vis de la consigne  $\omega^C_{GE}(t)$ .



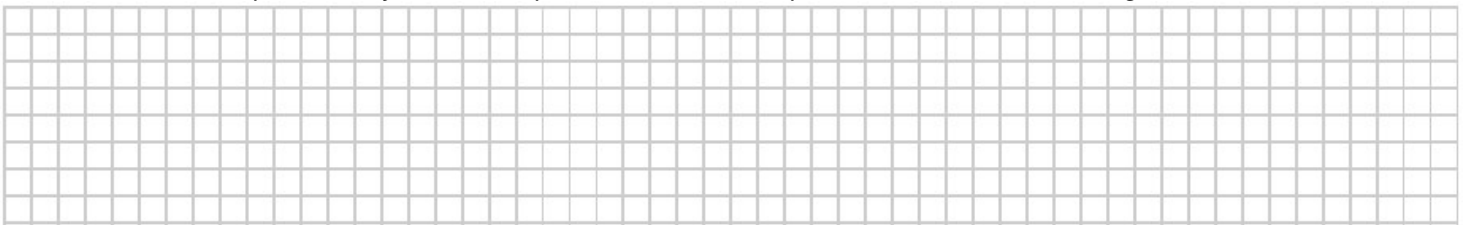
8. Déterminer l'erreur statique vis-à-vis de la consigne  $\omega^C_{GE}(t)$ . Conclure par rapport au cahier des charges (tableau 3).



9. Déterminer l'erreur statique vis-à-vis de la perturbation extérieure  $c_{MT}(t)$ . Conclure par rapport au cahier des charges (tableau 3).



10. Conclure sur la capacité du système à respecter les critères de précision du cahier des charges.



## II.B - Correction intégrale

Le premier correcteur envisagé est un correcteur intégral, tel que  $C(p) = C_1(p) = \frac{K_i}{p}$ .

12. Calculer l'erreur statique vis-à-vis de la consigne  $\omega^c_{GE}(t)$  et de la perturbation extérieure  $c_{MT}(t)$ . Conclure par rapport au cahier des charges (tableau 3).

13. Déterminer l'expression de la FTBO corrigée du système.

14. Déterminer la pulsation de coupure à 0 dB de la FTBO  $\omega_{BO}$  en fonction de  $K_i$ .

15. Déterminer la valeur de  $K_i$  pour vérifier exactement le critère de rapidité du cahier des charges.

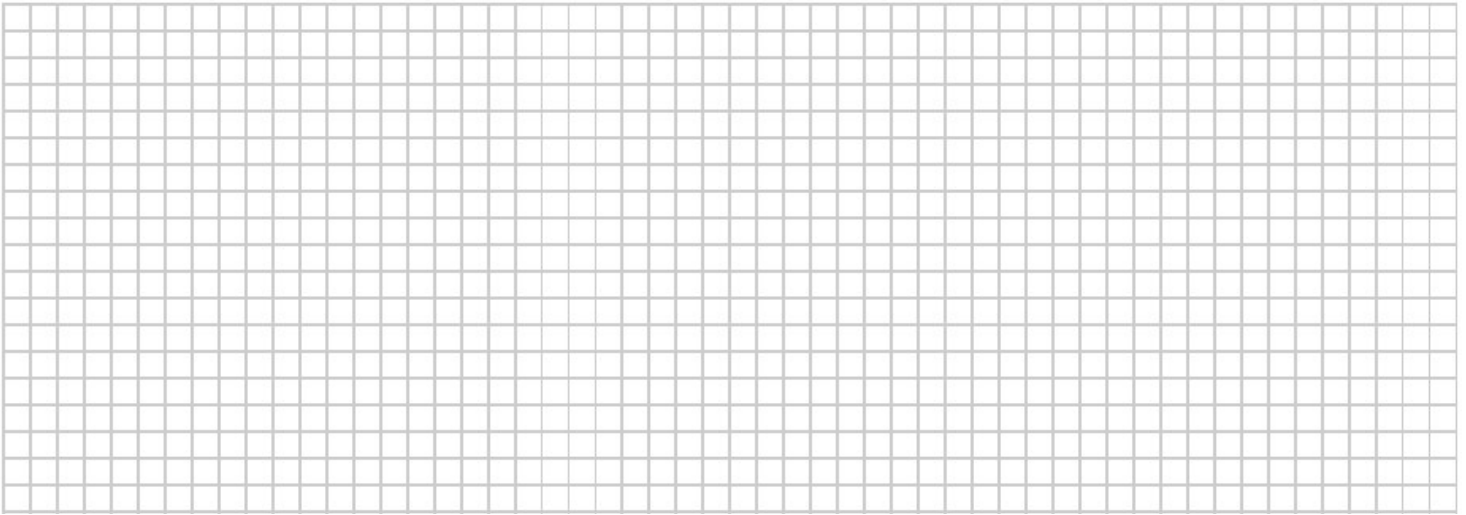
Le dernier critère à vérifier est celui de la stabilité. L'expression numérique de la FTBO est  $FTBO(p) = \frac{K_i}{p} \cdot \frac{20}{(4.p+1)}$ .

16. Tracer, sur le document réponse 1, les diagrammes asymptotiques de Bode de gain et de phase de la FTBO du système pour  $K_i = 1$ . Vous prendrez soin d'indiquer les pulsations de coupure, les pentes des asymptotes, et l'ordonnée à l'origine des deux diagrammes. Le tracé devra être justifié.

17. Le système est-il stable en BF ? Justifier.

18. Déterminer graphiquement la marge de gain MG et la marge de phase MP.

19. Déterminer la valeur de  $K_i$  pour vérifier le critère de stabilité du cahier des charges. Justifier. Conclure sur l'efficacité du correcteur.

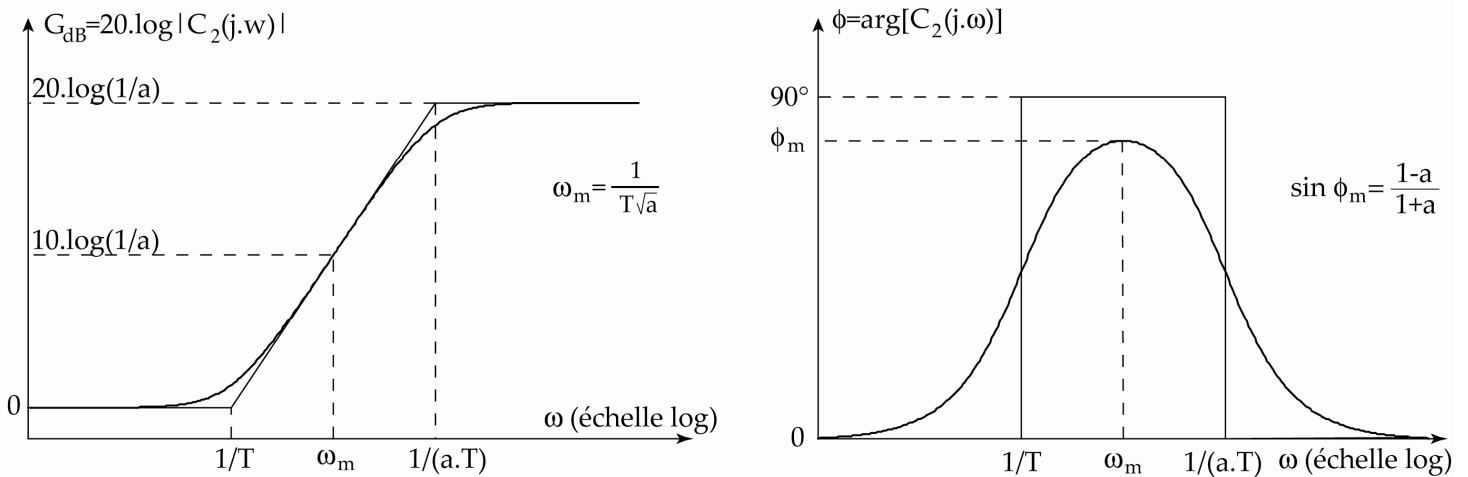


**II.C - Correction Intégrale associée à une correction à avance de phase**

La fonction de transfert du second correcteur envisagé est notée  $C(p) = \frac{K_i}{p} \frac{1+Tp}{1+aTp} = C_1(p)C_2(p)$  avec  $a < 1$  et

$$C_1(p) = \frac{K_i}{p} \text{ et } C_2(p) = \frac{1+Tp}{1+aTp}.$$

Le diagramme de Bode du correcteur  $C_2(p)$  est donné figure 4.



**Figure 4**

Afin d'apporter le maximum de marges de stabilité, on décide de placer  $\omega_m$  en  $\omega_{0dB}$  : la pulsation tel que le gain de la FTBO corrigée soit nul.

20. Déterminer  $K_i$  pour que la pulsation  $\omega_m$  soit bien en  $\omega_{0dB}$ . (Vous utiliserez le tracé de la question 16 établi avec  $K_i = 1$ )

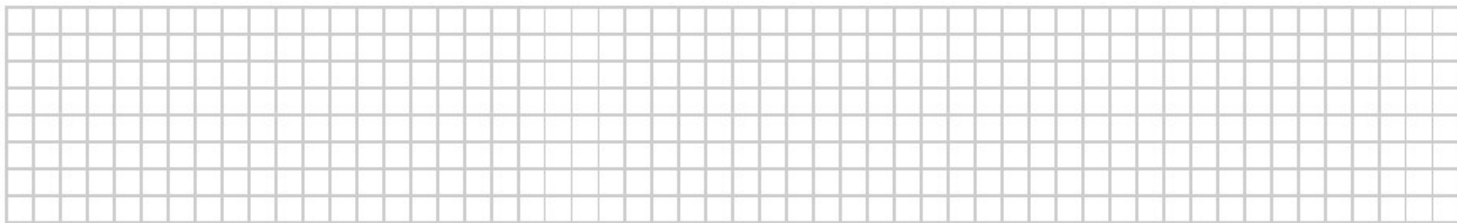




21. Pour cette valeur de  $K_i$ , déterminer  $\phi_m$  pour que la marge de phase soit effectivement de  $45^\circ$ .

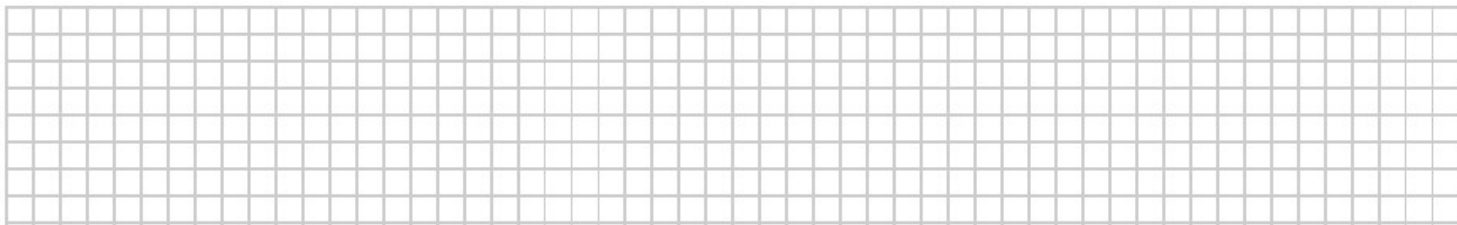


22. En déduire les valeurs de  $a$  et de  $T$ .

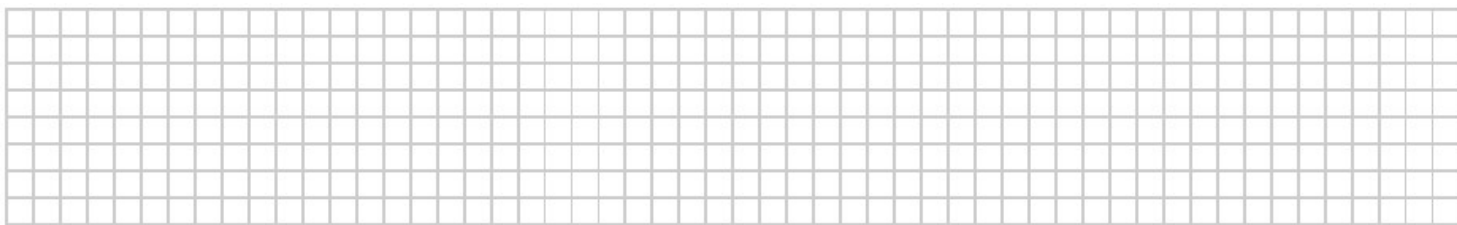


Les diagrammes de Bode de gain et de phase de la FTBO ont été tracés sur le document réponse 2 pour les valeurs de  $K_i$ ,  $a$  et  $T$  déterminées précédemment.

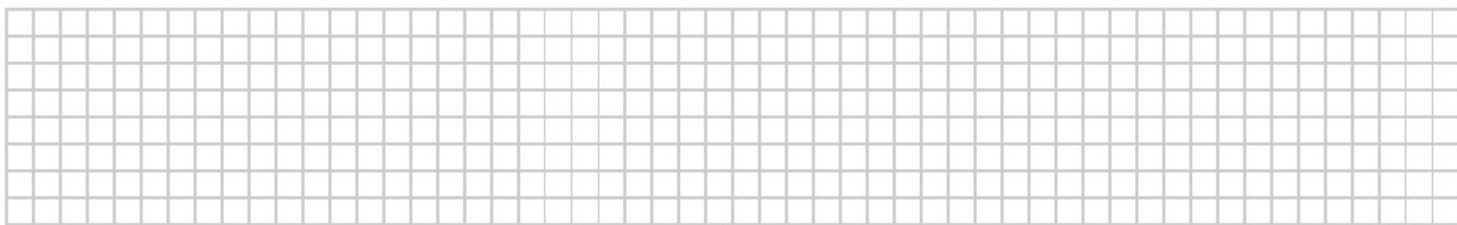
23. Vérifier le critère de stabilité du cahier des charges. Justifier.



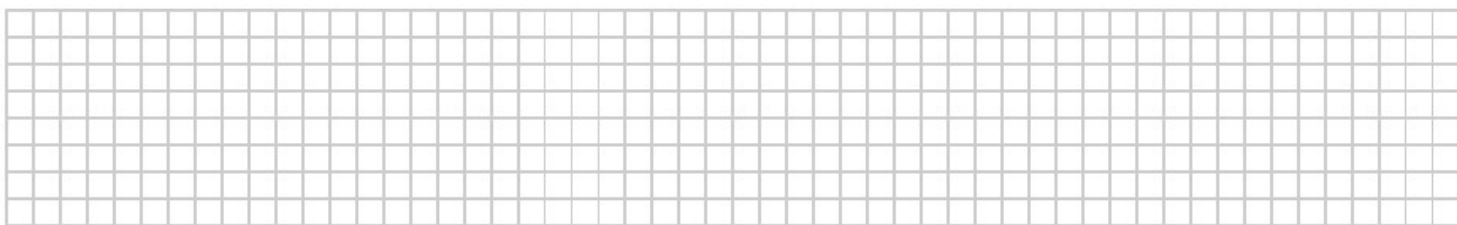
24. Que pensez-vous de la marge de gain du système ?



25. Vérifier le critère de rapidité du cahier des charges. Justifier.

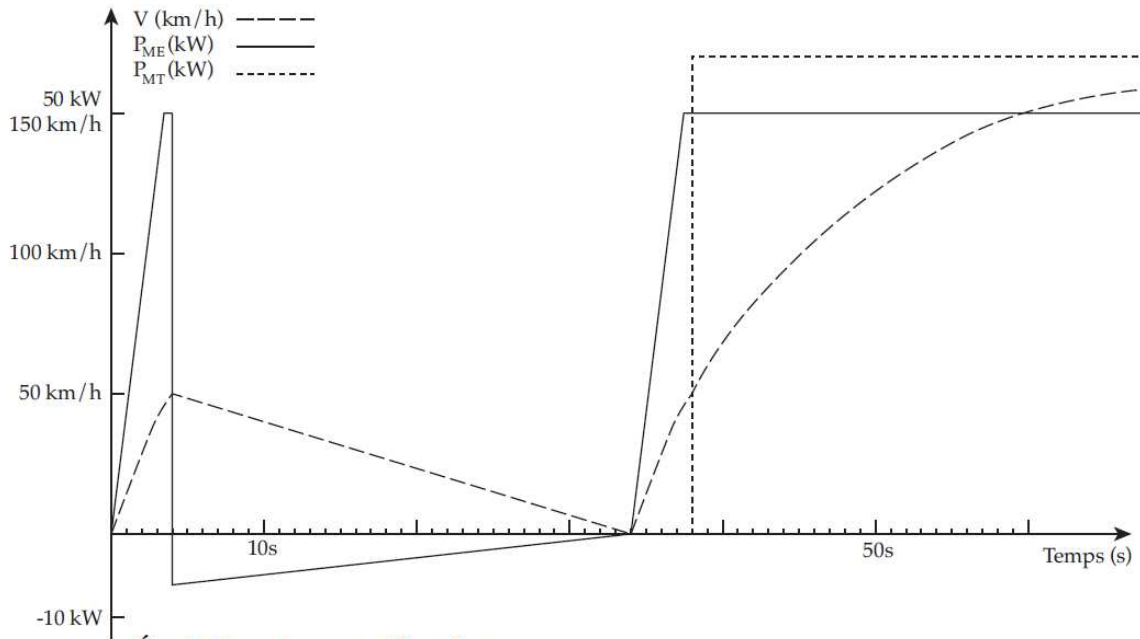


26. Conclure sur les capacités du correcteur à satisfaire l'ensemble des critères du cahier des charges (tableau 3).



**FIN**

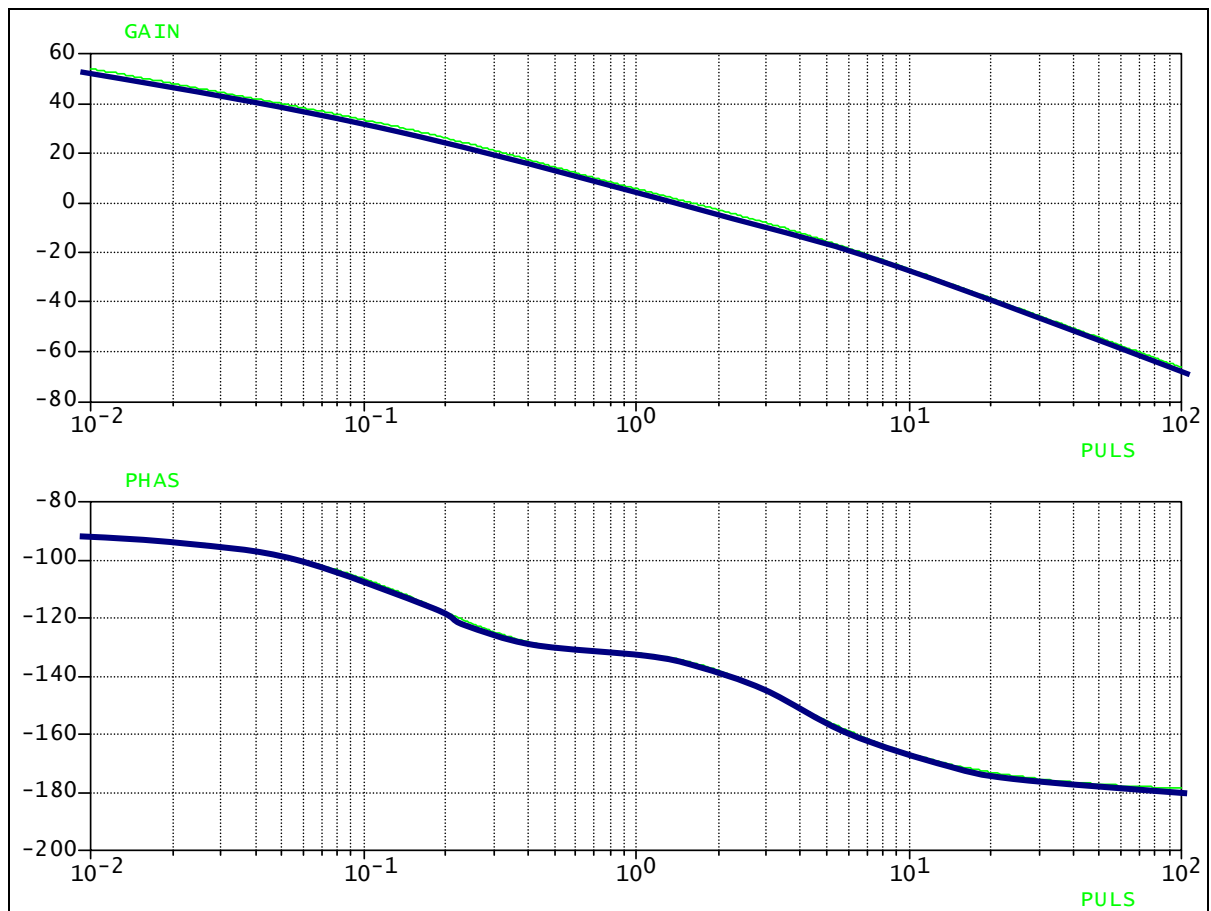
## ANNEXE 1



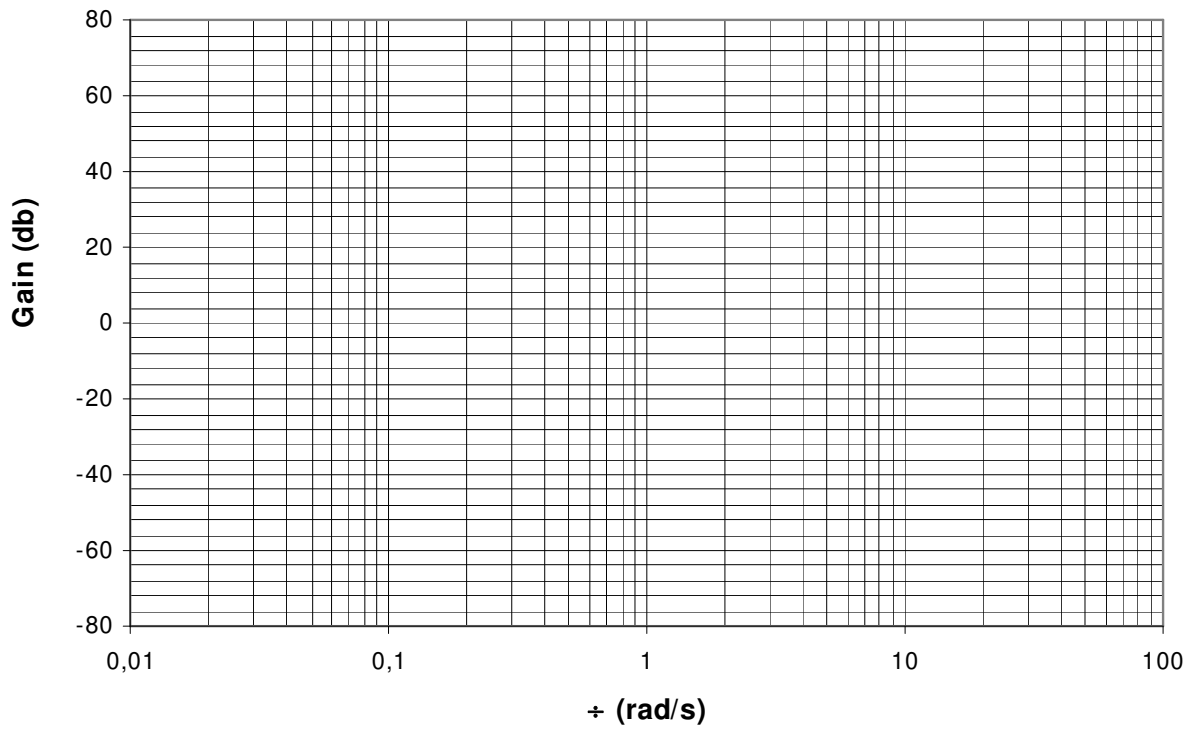
**Évolutions temporelles de :**

- la vitesse du véhicule  $V$  en km/h ,
- la puissance électrique consommée ou générée par le moteur électrique  $P_{ME}$  en kW ,
- la puissance mécanique fournie par le moteur thermique  $P_{MT}$  en kW .

## DOCUMENT REPONSE 2



**courbe de gain**



**courbe de phase**

