Concours Centrale-Supélec, France

Session 2007, filière PSI

Sciences industrielles de l'ingénieur

Ce que traite le sujet

- Partie I : présentation du système et de ses modes de fonctionnement
- Partie II : analyse de la commande du moteur thermique
- Partie III : modélisation des composants de la partie opérative
- Partie IV : performances énergétiques globales

Sujet reproduit sans retouche à partir de la page suivante.

Résumé des parties, chapitres de cours liés et autres années :
prepahelp.com/annales/centrale/psi/2007/si

Prepa Help ne revendique aucun droit sur le sujet, propriété de l'organisateur du concours.

SCIENCES INDUSTRIELLES POUR L'INGÉNIEUR

Étude des performances de la technologie HSD du véhicule hybride Toyota Prius

Partie I - Présentation du système et de ses modes de fonctionnement

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

I.A - Introduction


Photo 1

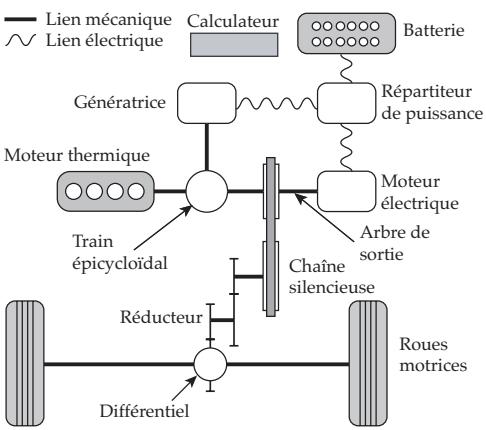
Dans le contexte actuel d'économie des énergies fossiles et de réduction des émissions de gaz nocifs, le système de propulsion hybride constitue une alternative intéressante à la propulsion classique par moteur thermique seul car il permet de réduire la consommation. La spécificité de la solution retenue sur la Prius (voir photo 1) consiste à :

- récupérer l'énergie du véhicule lors du freinage ;
- exploiter le moteur thermique à son rendement optimal.

I.B - Architecture du système hybride HSD Toyota

Comme le montre 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 la figure 1 mettent en évidence les deux machines électriques (le moteur électrique et la génératrice) reliées au moteur thermique par un train épicycloïdal.



Filière PSI

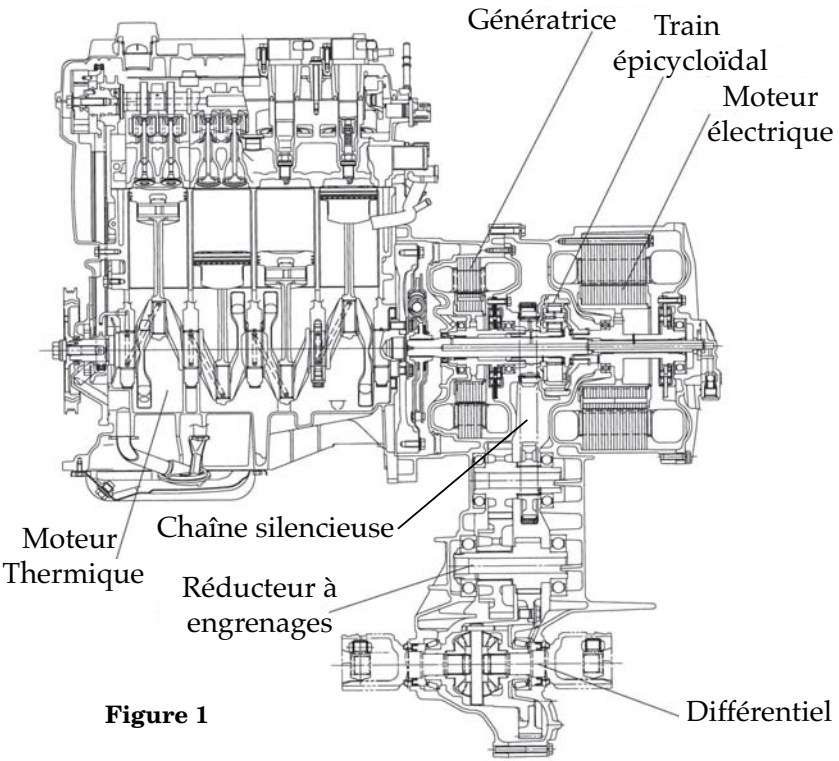


Figure 1

À 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 d'eau du moteur thermique seront développées ultérieurement.

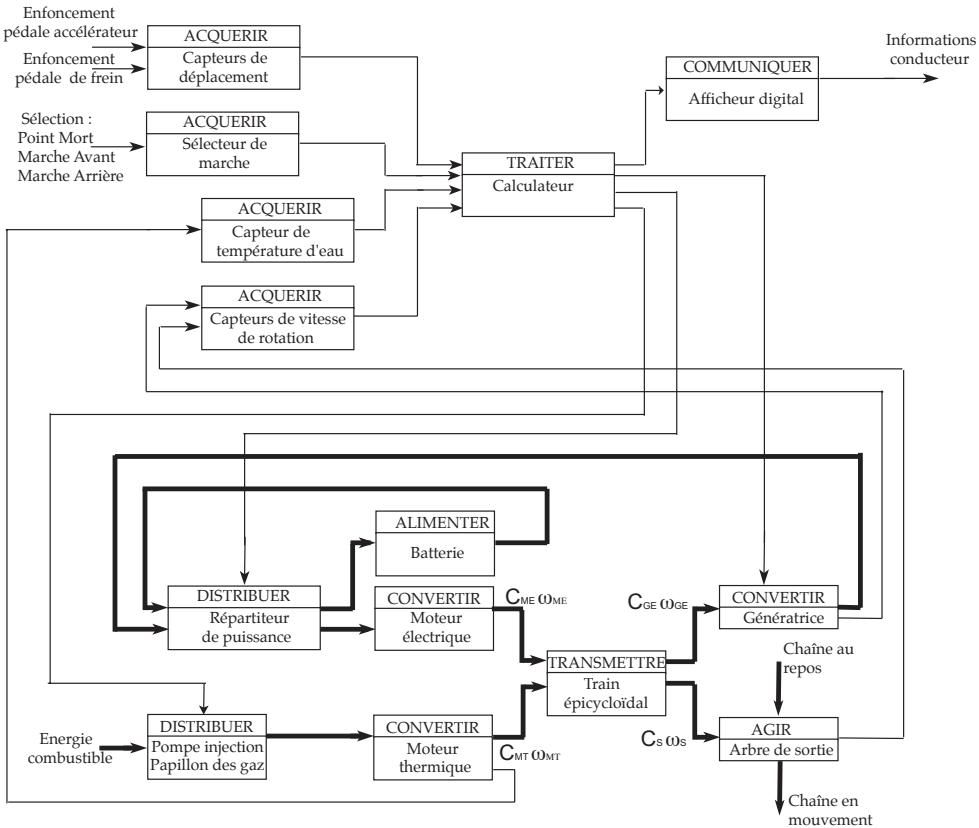


Figure 2
Chaîne d'information (partie supérieure) et Chaîne d'énergie (partie inférieure)

I.B.1) Proposer un diagramme SADT A-0 du système HSD.

I.C - Caractérisation des fonctions de service en phase d'utilisation

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

Figure 3

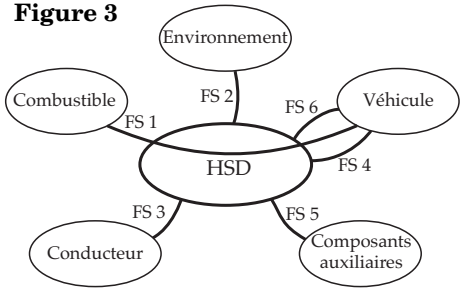


Tableau 1

Fonctions de service	Critères	Niveaux
***FS*1** : 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
***FS*2** : respecter l'environnement	Réduction des émissions nocives de CO_2	40 % en dessous des normes européennes
***FS*3** : être commandé par le conducteur	Positions du sélecteur Enfoncements des pédales	$PM/MA/MAr$ Accélérateur/frein
***FS*4** : s'adapter à la vitesse du véhicule	Vitesse de passage du mode tout électrique au mode hybride (démarrage du moteur thermique)	50 km/h
***FS*5** : alimenter en énergie les composants auxiliaires	Puissance maximale absorbée par les « consommateurs » d'énergie (climatisation, direction assistée, confort, …)	4 kW maxi
***FS*6** : récupérer l'énergie cinétique du véhicule en freinage	Pourcentage de l'énergie cinétique récupérable	70 %

Remarque : la performance de consommation en cycle mixte est à comparer à une consommation de $7{,}7\,\mathrm{l}$ pour $100\,\mathrm{km}$ pour un véhicule à essence classique aux caractéristiques comparables.

I.C.1) Compléter le diagramme FAST partiel du document réponse de la fonction $FS1$, en précisant les solutions constructives ainsi que les fonctions techniques manquantes.

I.C.2) Citer au moins trois solutions technologiques permettant d'acquérir une vitesse de rotation dans le contexte du système étudié.

I.C.3) Citer au moins deux solutions technologiques permettant d'acquérir un déplacement dans le contexte du système étudié.

I.C.4) Proposer deux solutions technologiques alternatives à la chaîne silencieuse dans le contexte du système étudié.

I.D - 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, est proposé dans le document réponse, figure 14. Il permet, après simulation numérique, d'obtenir les courbes temporelles d'évolution (figure 12 du document réponse) :

- de la vitesse du véhicule V en $\mathrm{km/h}$;
- 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.

I.D.1) En analysant la courbe de votre choix, valider les temps d'accélération figurant dans le cahier des charges.

Partie II - Analyse de la commande du moteur thermique

Objectif : *concevoir la loi combinatoire de mise en marche du moteur thermique et 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.

II.A - Présentation des modes de fonctionnement

Dans la suite les notations simplifiées ME, MT et GE désignent respectivement le moteur électrique, le moteur thermique, et la génératrice électrique.

Il existe quatre modes principaux de fonctionnement du véhicule hybride : **Tableau 2**

Mode	Commentaires
Mode 1 : tout électrique	Le moteur électrique entraîne le véhicule en puisant l'énergie électrique dans la batterie. Le moteur thermique est généralement arrêté.
Mode 2 : hybride	Le moteur thermique entraîne le véhicule. La puissance du moteur thermique en fonctionnement se répartit dans le train épicycloïdal entre : • la puissance directement transmise aux roues ; • la puissance transmise à la génératrice qui alimente alors directement le moteur électrique.
Mode 3 : récupération d'énergie	Le moteur électrique, entraîné par le véhicule, récupère une partie de l'énergie cinétique et la convertit en énergie électrique qui recharge la batterie.
Mode 4 : mode mixte	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.

II.B - Détermination d'une loi simplifiée de mise en marche du moteur thermique

Les **paramètres de contrôle** du système HSD sont :

- Les variables binaires d'entrée contrôlées par le conducteur :
  - ***** la consigne, notée EV, permettant au conducteur de privilégier un fonctionnement « Tout Électrique » jusqu'à une vitesse de $50\ \text{km/h}$;
  - ***** le Sélecteur de Marche Avant ($MA = 1$ si enclenché, 0 sinon), Arrière ou Point Mort ;
  - ***** $Ptot$, associée à la position de la pédale d'accélérateur qui traduit la valeur de la puissance motrice, à laquelle il faut rajouter la puissance demandée par les composants auxiliaires pour obtenir la puissance totale. $Ptot = 1$ signifie que la puissance demandée est supérieure à $6\ \text{kW}$.
  - ***** Fr, associée à l'appui sur la pédale de frein ; $Fr = 1$ indique un appui sur cette pédale.

- Les variables binaires de fonctionnement :
  * Ve, associée à la vitesse du véhicule ; $Ve = 1$ signifie que la vitesse est supérieure à $50\ \text{km/h}$;
  * Te, associée à la température de l'eau du moteur ; $Te = 1$ correspond à une température de l'eau supérieure à $50°\ \text{C}$ (Il faut environ 20 minutes à un moteur thermique pour se refroidir).

Les conditions de fonctionnement du moteur thermique sont :

- arrêt impératif à l'arrêt du véhicule et en marche arrière ;
- l'appui sur le bouton EV ($EV = 1$) interdit toute mise en route du moteur thermique si la vitesse du véhicule est inférieure à $50\ \text{km/h}$;
- si la puissance demandée totale dépasse $6\ \text{kW}$, le moteur thermique doit se mettre en marche, sauf si $EV = 1$;
- si la vitesse du véhicule est supérieure à $50\ \text{km/h}$, le moteur thermique est en marche sauf si la pédale de frein est actionnée ;
- si la température de l'eau du moteur est inférieure à $50°\ \text{C}$, le moteur thermique doit se mettre en marche (pour conserver un bon rendement au redémarrage), sauf si $EV = 1$;
- l'appui sur la pédale de frein arrête le moteur thermique, sauf si la température de l'eau du moteur est inférieure à $50°\ \text{C}$;
- la puissance demandée par les composants auxiliaires ne dépasse pas $4\ \text{kW}$ au maximum.

II.B.1) Compléter le tableau de Karnaugh (tableau 4 du document réponse) relatif aux quatre variables d'entrée $Ptot$, Fr, Ve et Te, en mettant en évidence les configurations d'entrée impossibles. En déduire une expression simplifiée de la mise en marche du moteur thermique, notée MT_1, en fonction des quatre variables précédentes.

II.B.2) Analyser les conditions de mise en marche avec les variables MA et EV et en déduire l'expression complète de MT en fonction des six variables d'entrée.

II.B.3) Identifier, sur la figure 12, les différents modes de fonctionnement du système HSD au cours du temps. On adoptera pour simplifier : $MA = 1$, $EV = 0$ et $Te = 1$.

II.C - 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 :

Tableau 3

Critères	Niveaux
Précision	Écart en régime permanent : • nul vis-à-vis d'une commande en échelon du type $\omega_{GE}^{c}(t) = \omega_0 u(t)$, ω_0 constante, et $u(t)$ la fonction échelon unité ; • nul vis-à-vis d'une perturbation constante du type $c_{MT}(t) = C_0 u(t)$, C_0 constante.
Rapidité	Pulsation de coupure à 0dB de la $FTBO$: $\omega_{0dB} = 1,5$ rad/s
Stabilité	Marge de phase $M_\varphi > 45°$

Le modèle est extrait du modèle complet du système HSD du document réponse (figure 14). 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 4 où C_{MT} est assimilé à une perturbation extérieure.

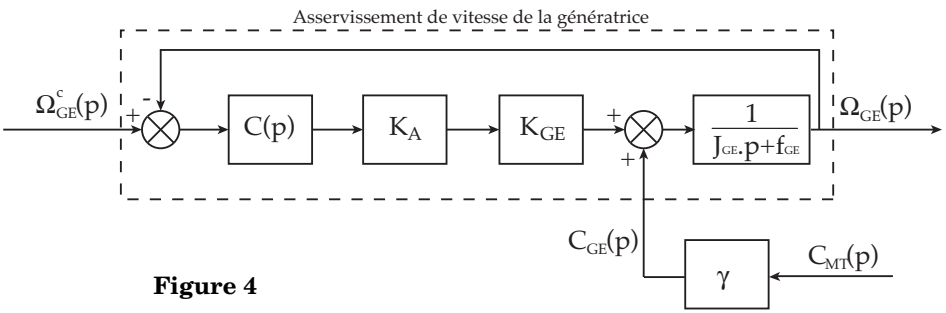


Figure 4

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

II.C.1) Déterminer l'expression de $\Omega_{GE}(p)$ en fonction de $\Omega_{GE}^{C}(p)$ et de $C_{MT}(p)$.

II.C.2) Expliquer pourquoi un asservissement avec correction unitaire $(C(p) = 1)$ ne permet pas de satisfaire le cahier des charges (tableau 3).

II.D - Correction intégrale

Le premier correcteur envisagé est un correcteur intégral, tel que

$$C(p) = C_1(p) = \frac{K_i}{p}$$

Le diagramme de Bode de la fonction

$R(p) = \frac{1}{p}\frac{K_A K_{GE}}{(J_{GE}p + f_{GE})}$ est fourni dans le document réponses figure 13.

II.D.1) Justifier que ce correcteur ne permet pas de satisfaire l'ensemble des critères du cahier des charges (tableau 3).

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

La fonction de transfert du second correcteur envisagé est notée

$$C(p) = \frac{K_i}{p}\,\frac{1+Tp}{1+aTp} = C_1(p)C_2(p) \text{ avec } a < 1 \text{ et}$$

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

Le diagramme de Bode du correcteur $C_2(p)$ est donné figure 5.

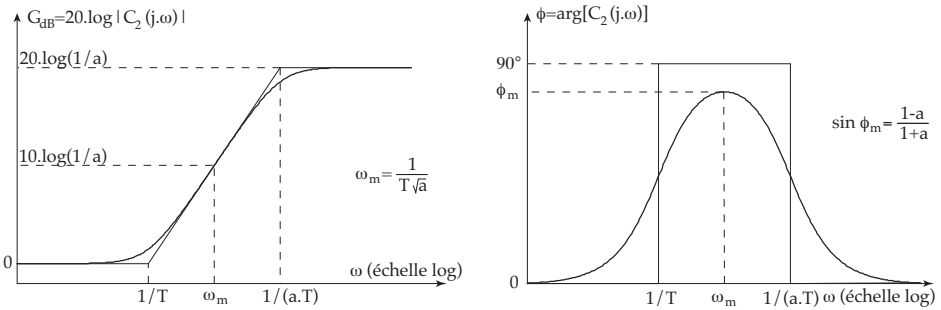


Figure 5

Afin d'apporter le maximum de marges de stabilité, on décide de placer ω_m en $\omega_{0\,\mathrm{dB}}$.

II.E.1) Déterminer ϕ_m pour que la marge de phase soit effectivement de $45°$. En déduire la valeur de a et de T. (On pourra se servir du diagramme de Bode de $R(p)$ fourni figure 13).

II.E.2) Déterminer finalement K_i pour que la pulsation $\omega_{0\,\mathrm{dB}}$ soit effectivement la pulsation de coupure à 0 dB.

II.E.3) Que pensez-vous de la marge de gain du système ?

II.E.4) Conclure sur les capacités du correcteur à satisfaire l'ensemble des critères du cahier des charges (tableau 3).

Partie III - Modélisation des composants de la partie opérative du véhicule

Objectifs :

- *Compléter le modèle global du véhicule hybride à partir de lois de comportement des composants.*
- *Optimiser l'architecture pour faire fonctionner les composants au mieux de leur rendement et de leur plage de fonctionnement.*
- *Élaborer le modèle dynamique du train épicycloïdal et de la voiture en vue de compléter le modèle global de véhicule hybride.*

III.A - Modélisation du comportement du véhicule et de ses composants

***** Les **roues** de la voiture ont un diamètre D de $60\,\text{cm}$, elles roulent sans glisser sur le sol et leur vitesse de rotation par rapport au châssis, notée ω_R, est identique en ligne droite. On note V la vitesse du véhicule par rapport au sol en ligne droite. On supposera $V > 0$.

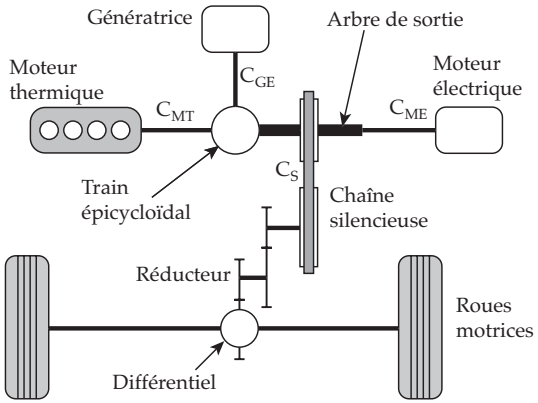


Figure 6

***** Le **réducteur** présente un rapport de transmission :

$$K = \frac{\omega_R}{\omega_S} = 0,25\,,$$

où ω_S est la vitesse de rotation de l'arbre de sortie du train épicycloïdal par rapport au châssis. ω_S est supposée positive $(\omega_S > 0)$ et le rendement est supposé égal à 1. La transmission par chaîne silencieuse fait partie du réducteur.

***** Le **véhicule** a pour masse $M = 1360\,\text{kg}$. Il se déplace sur une route horizontale et est soumis à un effort aérodynamique résistant modélisé par la loi :

$$\vec{R}(\text{air} \rightarrow \text{véhicule}) = -f_V \cdot \vec{V}(\text{véhicule}/\text{sol})\,,$$

avec f_V le coefficient de frottement visqueux, ici $f_V = 20\,\text{N}\,\text{m}^{-1}\,\text{s}$. Les pertes par frottement ainsi que l'inertie des autres composants de la motorisation sont supposés négligeables devant la force aérodynamique et

l'inertie du véhicule. On note C_S, le couple fourni par l'arbre de sortie du train épicycloïdal à la chaîne silencieuse.

* **Le moteur thermique** est modélisé par une inertie J_{MT} et un couple C_{comb} issu de la combustion de l'essence. Il exerce en sortie, sur le train épicycloïdal, un couple moteur C_{MT}. Le Principe Fondamental de la Dynamique, sous certaines hypothèses, permet d'écrire :

$$J_{MT}\frac{d\omega_{MT}}{dt} = C_{\text{comb}} - C_{MT}$$

Le couple C_{comb} est lié à l'ouverture du papillon de gaz par la fonction de transfert

$$H_{MT}(p) = \frac{C_{\text{comb}}(p)}{\theta_{Pap}(p)}$$

* Le comportement du **moteur électrique** est simplement modélisé par la fonction de transfert :

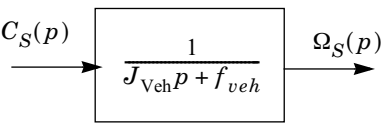
$$H_{ME}(p) = \frac{C_{ME}(p)}{C^c_{ME}(p)}$$

où $C_{ME}(p)$ est le couple exercé par le moteur électrique sur l'arbre de sortie (voir figure 6) et $C^c_{ME}(p)$ la consigne imposée par le calculateur. En première approximation, $H_{ME}(p)$ sera prise égale à un gain unitaire : $H_{ME}(p) = 1$.

III.A.1) Déterminer la valeur du paramètre ρ tel que $V = \rho\omega_S$.

III.A.2) En expliquant votre démarche, déterminer l'équation différentielle liant la vitesse $V(t)$ du véhicule à $C_S(t)$.

III.A.3) À partir de la question précédente, déduire les expressions littérales de l'inertie équivalente J_{Veh} et du coefficient de frottement visqueux f_{Veh} pour faire apparaître le bloc ci-contre dans le domaine de Laplace (on effectuera ensuite les applications numériques). On supposera les conditions initiales nulles.



III.A.4) Compléter, à l'aide de la modélisation proposée ci-dessus, le schéma bloc du document réponse figure 14, par les fonctions de transfert appropriées (en littéral), à l'exception des blocs associés au train épicycloïdal.

III.B - Optimisation cinématique du train épicycloïdal

Le tableau 5 ci-dessous présente les caractéristiques cinématiques des composants du moteur hybride.

L'objectif de cette partie est de choisir l'architecture du train épicycloïdal puis de déterminer les nombres de dents des roues dentées, permettant de satisfaire aux plages de fonctionnement des différents composants.

Tableau 5

Composants	Caractéristiques cinématiques
Réducteur + différentiel	Rapport de transmission : $K = \dfrac{\omega_R}{\omega_S} = 0,25$ où ω_S est la vitesse de rotation de l'arbre de sortie du train épicycloïdal par rapport au châssis. On considère $\omega_S > 0$.
Train épicycloïdal de répartition de puissance	Train de type 1 représenté figure 7, liant les trois vitesses de rotation : $\omega_{1/0}$, $\omega_{3/0}$, $\omega_{4/0}$.
Moteur électrique (ME)	Vitesse de rotation notée ω_{ME}, telle que • $0 \text{ tr/min} < \omega_{ME} < 6200 \text{ tr/min}$; • puissance maxi de 50 kW pour $\omega_{ME} > 1200 \text{ tr/min}$; • couple maxi de 400 Nm constant de 0 à 1200 tr/min .
Moteur Thermique essence (MT)	Vitesse de rotation notée ω_{MT}, telle que : • $0 \text{ tr/min} < \omega_{MT} < 5000 \text{ tr/min}$; • puissance maxi de 57 kW à 5000 tr/min ; • couple maxi de 115 Nm à 4200 tr/min .
Génératrice Électrique (GE)	Vitesse de rotation notée ω_{GE}, telle que : • $0 \text{ tr/min} < \omega_{GE} < 10000 \text{ tr/min}$.

III.B.1) Déterminer la relation entre $\omega_{1/0}$, $\omega_{3/0}$, $\omega_{4/0}$. La mettre sous la forme $\omega_{1/0} + \lambda\omega_{3/0} - \mu\omega_{4/0} = 0$ en identifiant λ et μ en fonction des nombres de dents Z_1 et Z_3 des planétaires.

III.B.2) Compte tenu du cahier des charges du tableau 1, déterminer l'amplitude de variation de ω_S, en tr/min .

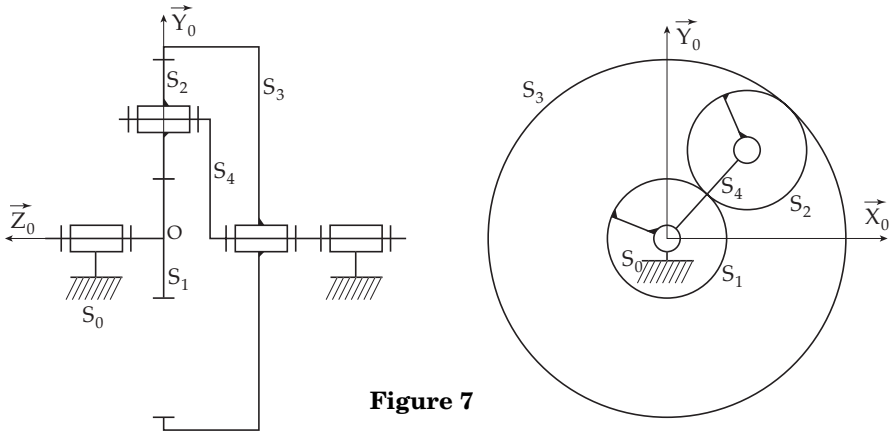


Figure 7

III.B.3) Cette question a pour objectif de déterminer à quel composant (ME, MT ou GE) sont reliés les trois arbres $(1, 3, 4)$ du train épicycloïdal. Par souci de simplification d'écriture, on note : $\omega_{ME} = \omega_{ME/0}$, $\omega_{MT} = \omega_{MT/0}$ et $\omega_{GE} = \omega_{GE/0}$.

Compte tenu de la réponse à la question précédente, c'est le moteur électrique qui est le plus adapté (plage de vitesse en fonctionnement comparable), pour être relié directement à ω_S. On prendra donc dans la suite : $\omega_S = \omega_{ME}$.

Le constructeur fournit les deux courbes de fonctionnement figure 8.

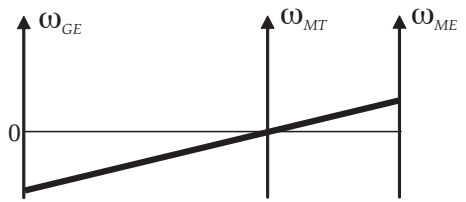
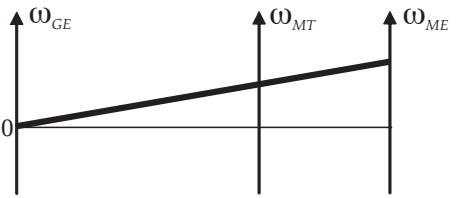
Fonctionnement tout électrique Démarrage	Fonctionnement hybride sans génération d'électricité
	

Figure 8

En analysant ces deux courbes, déterminer à quel composant (ME, MT ou GE) est associé chaque arbre $(1, 3, 4)$ du train épicycloïdal.

À la suite de l'analyse précédente, le constructeur propose la relation linéaire valable pour toute la suite du sujet :

$$\omega_{GE} + (k_b - 1)\omega_{MT} - k_b\omega_S = 0 \text{ avec } \omega_{ME} = \omega_S \text{ et } k_b = -2,6$$

III.B.4) Compte tenu de critères de fabrication, le pignon satellite a 16 dents. En supposant que le module de fonctionnement de chaque engrenage est identique, déterminer le nombre de dents de chaque roue dentée du train épicycloïdal.

III.B.5) Compléter le schéma bloc figure 14 du document réponse en indiquant les fonctions de transfert associées au comportement *cinématique* du train épicycloïdal (blocs de gauche). Ces fonctions de transfert seront exprimées en fonction de k_b.

III.C - Modèle d'étude dynamique du train épicycloïdal

On recherche un modèle dynamique liant les couples transmis par le train épicycloïdal, à partir de la loi cinématique obtenue à la partie précédente :

$$\omega_{GE} + (k_b - 1)\omega_{MT} - k_b\omega_S = 0 \text{ avec } \omega_{ME} = \omega_S \text{ et } k_b = -2,6 .$$

On note (voir schéma de la chaîne d'énergie figure 2 et schéma figure 6) :

C_{MT} : le couple exercé par le moteur thermique sur le train épicycloïdal ;

C_{ME} : le couple exercé par le moteur électrique sur l'arbre de sortie ;

C_{GE} : le couple fourni par le train épicycloïdal sur la génératrice électrique ;

C_S : le couple fourni par l'arbre de sortie à la chaîne silencieuse.

Hypothèse : les effets de la masse et de l'inertie de toutes les pièces en rotation sont supposées négligeables par rapport aux efforts mis en jeu.

III.C.1) En appliquant un théorème fondamental de la mécanique (en précisant le système isolé et le théorème utilisé, au point …, en projection selon …), déterminer une relation liant les quatre couples C_{MT}, C_{ME}, C_{GE} et C_S (Voir le paramétrage de la figure 6).

III.C.2) En explicitant la méthode choisie, déterminer une relation liant les quatre couples et les trois vitesses de rotation (on rappelle que $\omega_{ME} = \omega_S$).

III.C.3) À l'aide de la réponse à la question III.C.1 et de la relation cinématique rappelée au début de cette partie, éliminer C_{ME} et ω_{GE} dans la relation obtenue à la question III.C.2, et montrer qu'il existe une constante γ, fonction de k_b, telle que : $C_{GE} = \gamma C_{MT}$.

III.C.4) Déterminer enfin les deux constantes α et β en fonction de k_b, telles que : $C_S = \alpha C_{ME} + \beta C_{MT}$, puis compléter le schéma bloc figure 14 du document réponse en indiquant les fonctions de transfert associées au comportement *dynamique* du train épicycloïdal (blocs de droite).

III.D - Interprétation des résultats du modèle

III.D.1) Justifier la pertinence du modèle construit à partir des courbes figure 12 obtenues après simulation, en comparant les résultats aux performances annoncées par le constructeur.

Partie IV - Performances énergétiques globales

Objectif : valider le gain énergétique global du système hybride par rapport à un véhicule traditionnel sur un trajet représentatif.

IV.A - Intérêt de la solution hybride

La réussite commerciale d'un véhicule hybride n'est plausible qu'à la condition que le gain écologique soit suffisant pour un surcoût à l'achat raisonnable. Ainsi, on estime que la complexité accrue ne peut être rentable que si la consommation (donc la pollution) est réduite d'au moins 20%. D'autre part, le surcoût initial du véhicule (environ 4500 €) doit pouvoir être amorti durant la vie du véhicule (environ 150 000 km) grâce à l'économie de carburant.

Cette partie s'intéresse à la justification de la pertinence de la solution Prius dans ce contexte. Un modèle basé sur un point de vue énergétique exposé ci-dessous sera utilisé pour calculer les dépenses énergétiques du véhicule Prius sur un itinéraire routier type.

IV.B - Modèle énergétique mis en place

Le modèle proposé vise à caractériser les flux d'énergie au sein de la motorisation et les pertes induites par chaque composant. Ces pertes sont d'une manière générale décrites sous la forme d'un rendement. Les figures 9 et 10 donnent une représentation graphique des modèles associés à un véhicule classique et à un véhicule hybride de type Prius. Le sens des flèches indique les flux possibles d'énergie.

Modèle associé à un véhicule classique

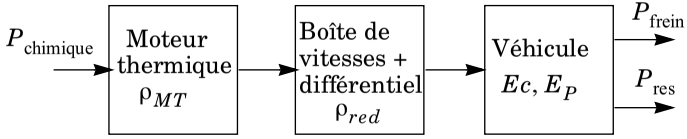


Figure 9

Modèle associé au véhicule hybride Prius

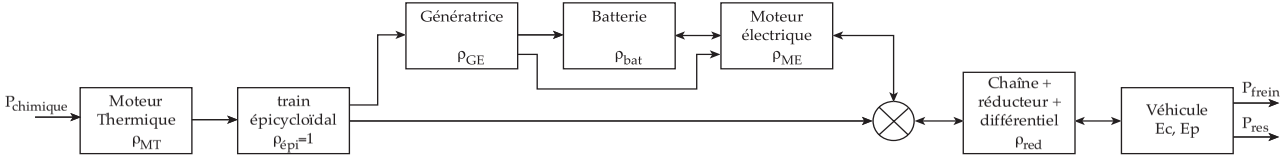


Figure 10

On adopte, pour chaque composant, les hypothèses suivantes :

- **Moteur Thermique** : le moteur thermique convertit l'énergie chimique de l'essence en énergie mécanique. Le rendement ρ_{MT} au régime optimal est de 35% (incluant le rendement thermodynamique). On adopte cette valeur pour la Prius, qui exploite le moteur thermique à son régime optimal. L'énergie chimique de l'essence est de $32\ \text{MJ/litre}$.
- **Train Epicycloïdal** : à définir.
- **Génératrice et moteur électrique** : ces composants assurent la conversion d'énergie électrique en énergie mécanique ou inversement.
- **Batterie** : la batterie stocke de l'énergie électrique notée E_{bat}. L'énergie maximale contenue est de $6,7\ \text{MJ}$. À la charge comme à la décharge, la batterie présente une résistance interne impliquant un rendement de $\rho_{\text{bat}} = 0,95$. La batterie est initialement aux $2/3$ de sa charge maximale.
- **Réducteur, différentiel** : à définir.
- **Véhicule** : le véhicule stocke de l'énergie sous forme d'énergie cinétique E_C et d'énergie potentielle de pesanteur E_p. Sa masse est $M = 1360\ \text{kg}$. Les efforts résistants absorbent une puissance P_{res} . Cet effort résistant est faible en ville et s'élève à environ $F_R = 500\ \text{N}$ sur route à $90\ \text{km/h}$.

IV.C - Trajet type étudié pour le calcul des performances énergétiques

Le conducteur est supposé se rendre de Barcelonnette à Colmars (Alpes de Haute Provence), distantes de $40\ \text{km}$ et dont les altitudes sont précisées sur la figure 11.

Chaque ville comporte 25 feux, soit un total de 50 feux tricolores sur les deux villes.

Entre les deux villes, le véhicule est supposé rouler à la vitesse constante de $90\ \text{km/h}$ et franchit le col d'Allos, d'altitude $2200\ \text{m}$ en montant une cote de longueur $L = 20\ \text{km}$, puis en parcourant la descente de même longueur $L = 20\ \text{km}$.

IV.D - Calcul de la consommation en situation urbaine

Dans un premier temps, seule la partie urbaine de Barcelonnette comportant 25 feux tricolores est étudiée. À chaque feu, le véhicule accélère jusqu'à $50\ \text{km/h}$ puis décélère jusqu'à l'arrêt au feu suivant. La technologie HSD permet de récupérer, au freinage, une part de l'énergie cinétique ou potentielle. Ainsi, on estime que sur un freinage de $50\ \text{km/h}$ à l'arrêt au feu rouge, $70\ \%$ de l'énergie cinétique peut être transformée puis stockée dans la batterie (les $30\ \%$ restants étant dissipés dans les freins).

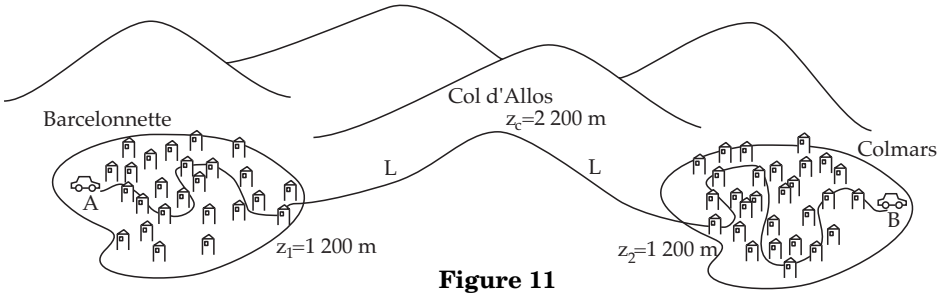


Figure 11

IV.D.1) Dessiner sur la copie le graphique de la figure 10 simplifié dans le cas étudié (les flux de puissance des phases d'accélération et de freinage seront distingués par des couleurs différentes).

IV.D.2) Proposer un bilan des différentes énergies échangées (énergies électrique, chimique et cinétique), en explicitant votre démarche. Préciser, en argumentant, les valeurs numériques manquantes qui vous semblent utiles.

IV.D.3) La batterie de la Prius ne peut pas être rechargée sur le réseau électrique. On considère qu'après la zone urbaine de 25 feux, le moteur thermique recharge la batterie jusqu'à son niveau d'origine. Déterminer la consommation de carburant nécessaire à cette recharge puis comparer ce résultat à la consommation de $0,36$ litre d'un véhicule classique .

IV.E - Bilan énergétique sur route

Dans un second temps, la zone hors agglomération est étudiée. En descente, le véhicule Prius récupère de l'énergie. Cependant, l'effort de freinage développé par le moteur électrique sur le véhicule est au **maximum** de $F_f = 440$ N , équivalent à celui du frein moteur sur un véhicule classique.

En vous inspirant de l'étude en zone urbaine, proposer, justifier et mettre en œuvre une démarche conduisant à un bilan énergétique du trajet sur route.

IV.F - Validation des performances énergétiques du véhicule Prius

IV.F.1) En considérant l'ensemble du trajet et en exposant votre démarche avec clarté, déterminer la consommation du véhicule Prius sur ce trajet afin de la comparer à celle d'un véhicule classique évaluée à $3,31$ litres.

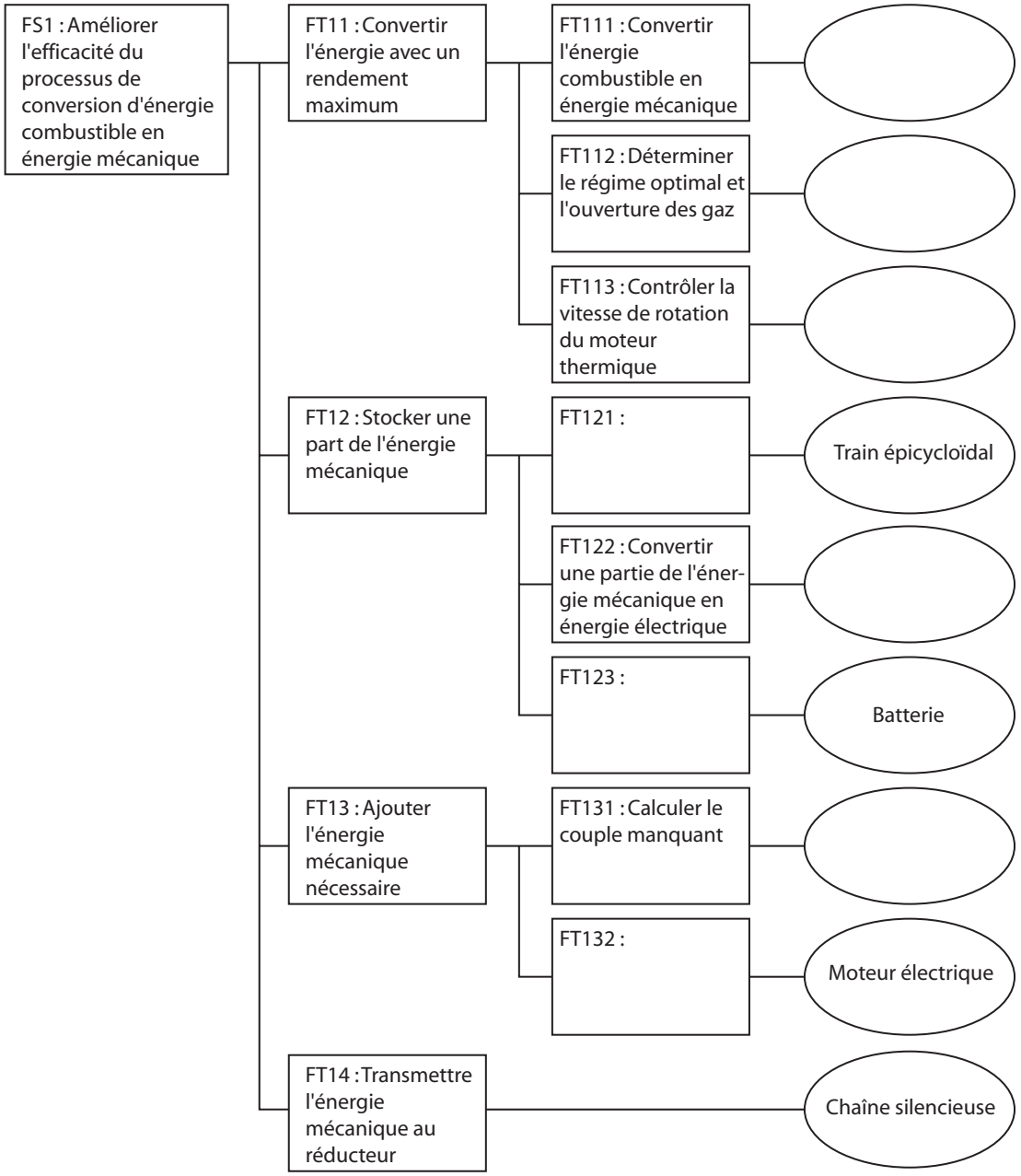
IV.F.2) Conclure quant à la pertinence commerciale du système hybride HSD.

••• FIN •••

Annexe du sujet de Sciences Industrielles pour l'Ingénieur

Cette annexe doit être rendue avec les autres copies. Il ne pourra pas être délivré d'autres exemplaires de ce document.

Réponse à la question I.C.1



Filière PSI

Réponses aux questions I.D.1, II.B.3 et III.D.1

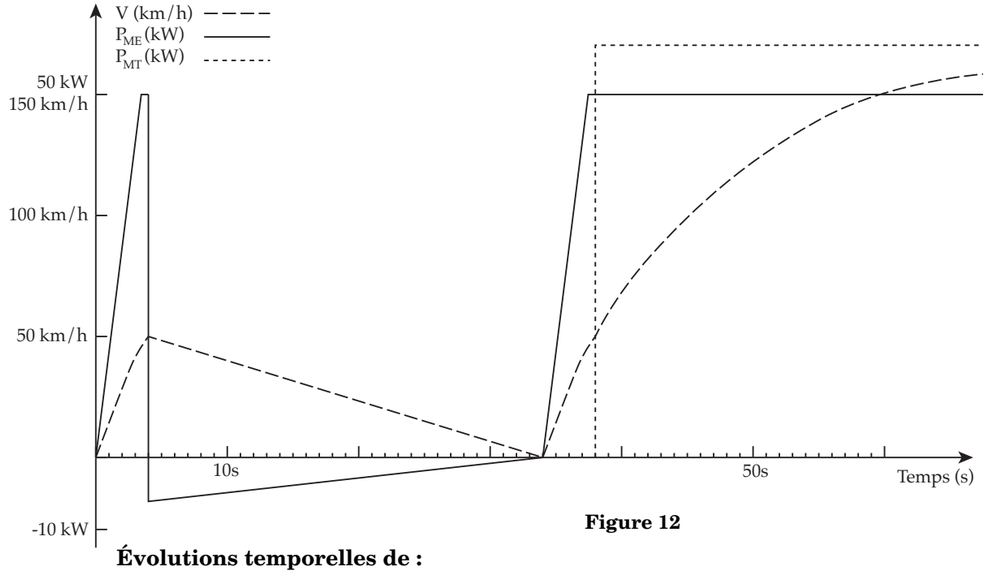


Figure 12

Évolutions temporelles de :

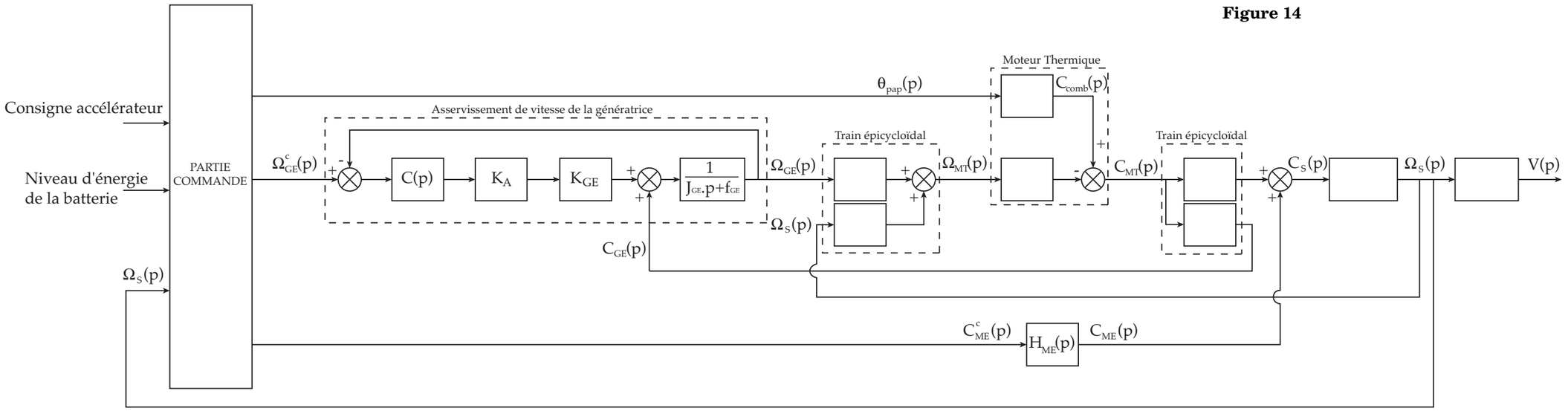
- la vitesse du véhicule V en km/h ,
- la puissance électrique consommée ou générée par le moteur électrique P_{ME} en kW ,
- la puissance mécanique fournie par le moteur thermique P_{MT} en kW .

Réponse à la question II.B.1

MT_1	0 0	0 1	1 1	1 0	V_e / T_e
0 0					
0 1					
1 1					
1 0					
P_{tot} F_r					

Tableau 4

Figure 14



Réponses aux questions II.D.1 et II.E.1

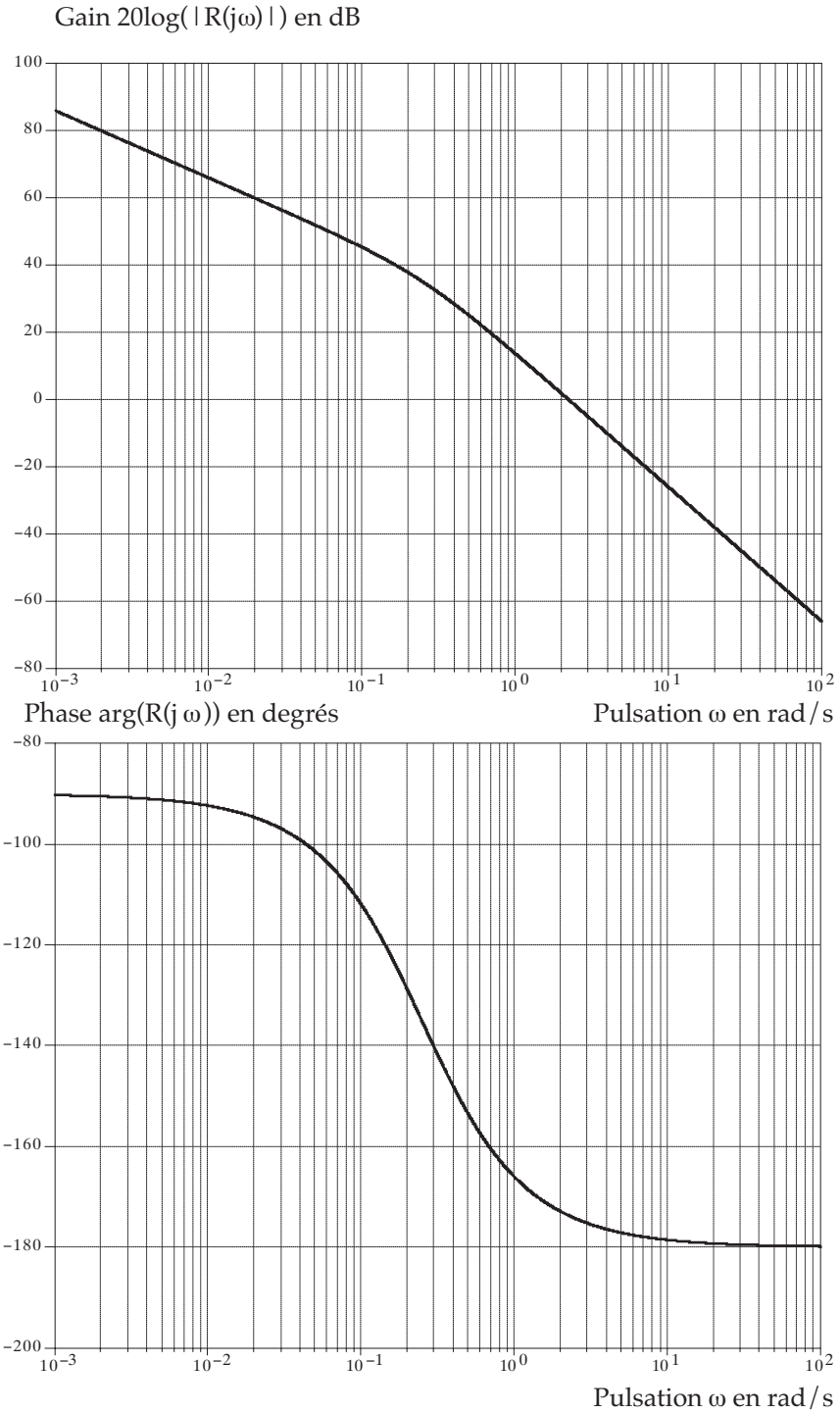


Figure 13

Travailler les chapitres de ce sujet

Prepa Help suit le programme de PSI chapitre par chapitre : cours détaillé, méthodes, pièges, exercices et problèmes corrigés pas à pas, tirés des concours. L'essai gratuit donne accès aux chapitres offerts de ta filière, sans carte bancaire.

Chapitres liés à ce sujet

- Ingénierie système : besoin, exigences et diagrammes SysML
- Architecture fonctionnelle et structurelle : chaînes d'information et de puissance
- Correction des systèmes asservis : correcteurs P, PI et à avance de phase
- Réponse fréquentielle et diagrammes de Bode
- Performances des systèmes asservis : stabilité, précision, rapidité
- Transmetteurs de puissance et trains d'engrenages
- Énergétique : puissances, théorème de l'énergie cinétique, rendement
- Dynamique des systèmes de solides : principe fondamental, stratégie d'isolement, équilibrage

Ouvrir l'essai gratuit

Scanne le code ou clique sur le bouton.

prepahelp.com/#essai

Une question sur le concours ou sur ta filière :
écrire sur WhatsApp

Les autres années et épreuves : prepahelp.com/annales/centrale/psi