

1 Transmission de puissance

A. Description

Motivés par les performances, animés par la recherche d'économie de carburant et inspirés par leur avance dans le domaine environnemental, les ingénieurs de Toyota ont apporté une authentique alternative aux véhicules à moteurs thermiques : il s'agit du système de propulsion hybride (TSH) série-parallèle du véhicule Prius (seconde génération). Pour répondre au problème posé, ce véhicule combine deux types de motorisation : l'une thermique (moteur à essence), l'autre électrique.

La motorisation électrique est constituée de deux machines électriques, qui peuvent soit fonctionner en moteur électrique, soit en générateur. La machine électrique notée G dans les figures ci-dessous fonctionne principalement en génératrice, l'autre (noté M) principalement en moteur.

- En utilisation urbaine, la propulsion électrique (à fort couple) est utilisée pour le démarrage, les basses vitesses et les manœuvres. La pollution atmosphérique est alors nulle.
- Sur route, le moteur thermique (à rendement optimisé) entre en action, assisté du moteur électrique.
- Lors des descentes, des ralentissements et des freinages, le moteur thermique est coupé, l'énergie du véhicule est récupérée et stockée dans une batterie compacte.

Les figures¹ suivantes décrivent les différents modes de fonctionnement :

Phase de démarrage (figure 8a) : au démarrage la machine électrique G alimentée par la batterie fonctionne en moteur et permet le démarrage du moteur thermique ;

Recharge à l'arrêt (figure 8b) : lorsque le véhicule est à l'arrêt, le moteur thermique fonctionne au ralenti entraîne la génératrice et permet la recharge de la batterie ;

Roulage tout électrique (figure 8c) : en mode tout électrique (urbain principalement), la batterie alimente le moteur électrique qui entraîne les roues, le moteur thermique ne fonctionne pas ;

Roulage normal (figure 8d) : en fonctionnement normal, le moteur thermique fonctionne à son régime optimal, la puissance mécanique est à la fois transmise aux roues, à la génératrice (G) qui alimente le moteur électrique (M) ;

Phase d'accélération (figure 8e) : en phase d'accélération, les roues sont entraînées à la fois par le moteur thermique et le moteur électrique (M)

Décélération et freinage (figure 8f) : en phase de décélération et de freinage, les roues entraînent le moteur (M) qui fonctionne alors en génératrice et permet la recharge de la batterie.

La répartition de la puissance entre les différents moteurs, générateurs et les roues est réalisée par un train épicycloïdal. La sortie du train épicycloïdal entraîne grâce à une chaîne silencieuse l'arbre d'entrée du réducteur, cette chaîne d'énergie est visible sur l'écorche du moteur (figure 7). Sur la figure 7b on distingue la transmission par chaîne et le réducteur.

Le schéma cinématique de la figure 1 décrit cette chaîne.

On se propose ici, de déterminer les rapports de réduction entre les moteurs et les roues pour les différents modes de fonctionnement de la motorisation.

1. les images sont extraites du site <http://hybridlife.org/threads/schemas-de-fonctionnement-du-systeme-hybride-de-toyota-lexus-dans-les-differentes-phases.1284/>

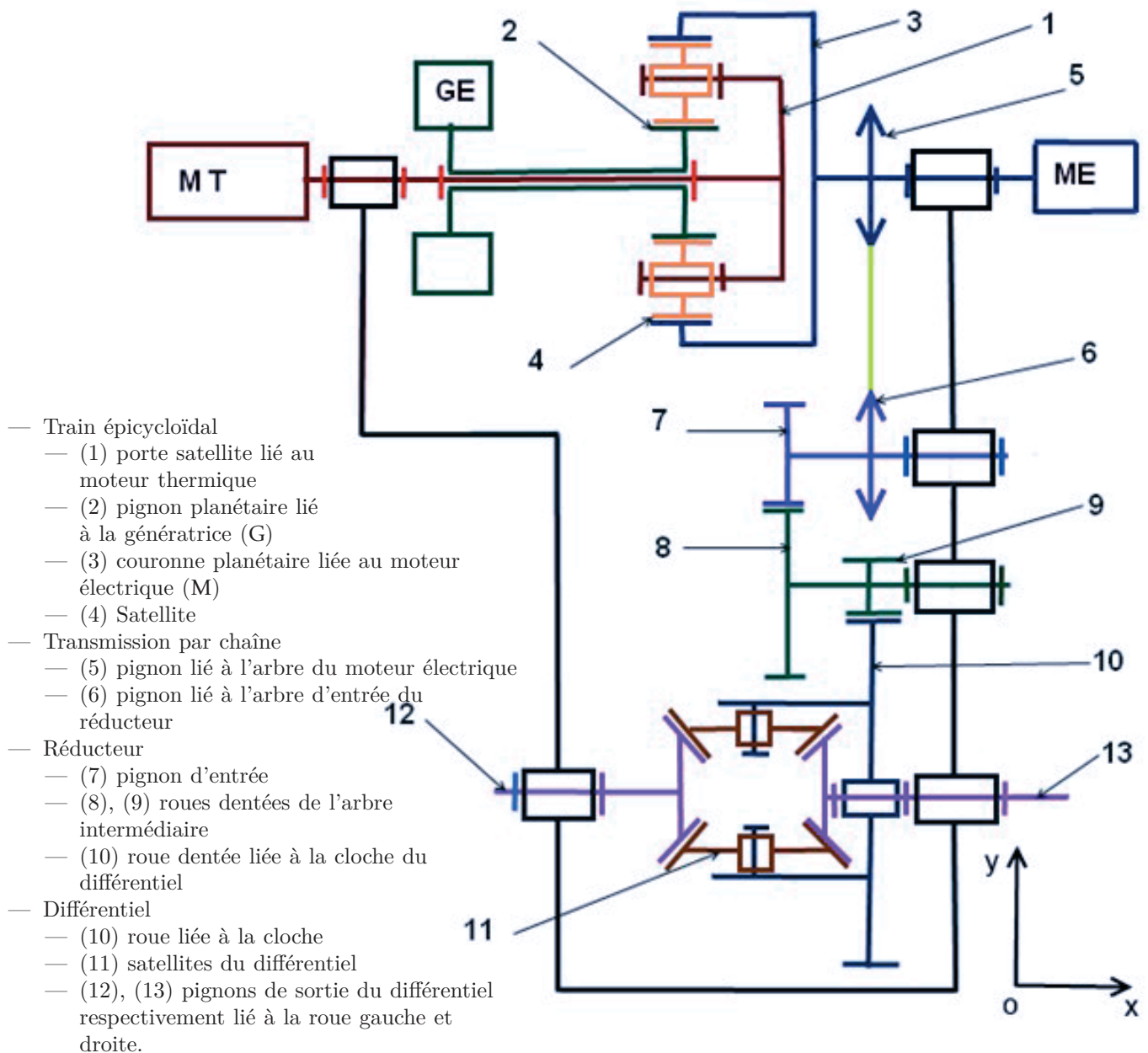


Figure 1 – Schéma cinématique de la chaîne d'énergie

A.1. Données

Transmission

- Pignon (2) $Z_2 = 20$ dents ;
- Satellites (4) $Z_4 = 16$ dents ;
- Couronne (3) $Z_3 = 52$ dents ;
- Pignon moteur (5) pour chaîne $Z_5 = 36$ dents
- Pignon récepteur (6) pour chaîne $Z_6 = 35$;
- Roue dentée (7) $Z_7 = 30$ dents, module : $m_a = 2,5$ mm ;
- Roue dentée (8) $Z_8 = 44$ dents, module : $m_a = 2,5$ mm ;
- Pignon arbré (9) $Z_9 = 26$; module : $m_b = 3$ mm ;
- Couronne différentiel $Z_{10} = 75$, module : $m_b = 3$ mm ;

Véhicule

- Vitesse maxi = 170 km h^{-1} ,
- Démarrage : 0 à 100 km h^{-1} en $10,9$ s,
- Roue diamètre 600 mm
- Masse totale $M = 1\,360$ kg

Motorisation

- moteur thermique (MT) : $\omega_{MT} < 5\,000 \text{ tr/min}$
- moteur électrique (M) : $\omega_M < 6\,200 \text{ tr/min}$
- génératrice (G) : $\omega_G < 10\,000 \text{ tr/min}$

On note :

- (0) le châssis de la Prius.
- (35) l'arbre associé au moteur électrique comportant la couronne planétaire (3) et le pignon (5) ;

- (67) l'arbre d'entrée du réducteur comportant les deux roues dentées (6) et (7) ;
- (89) l'arbre intermédiaire du réducteur comportant les deux roues dentées (8) et (9).

On pose :

- $\omega_{1/0} = \omega_{MT/0}$: la vitesse de rotation du moteur

thermique,

- $\omega_{2/0} = \omega_{G/0}$: la vitesse de rotation de la génératrice,
- $\omega_{3/0} = \omega_{M/0}$: la vitesse de rotation du moteur électrique.

B. Étude

B.1. Réducteur

Q1. Déterminer $k_r = \frac{\omega_{10/0}}{\omega_{67/0}}$

Q2. Déterminer les diamètres des roues dentées (7), (8), (9), (10).

Q3. En déduire la distance entre les axes (67) et (89) et entre (89) et (10).

B.2. Transmission par chaîne

Q4. Déterminer $k_c = \frac{\omega_{67/0}}{\omega_{35/0}}$.

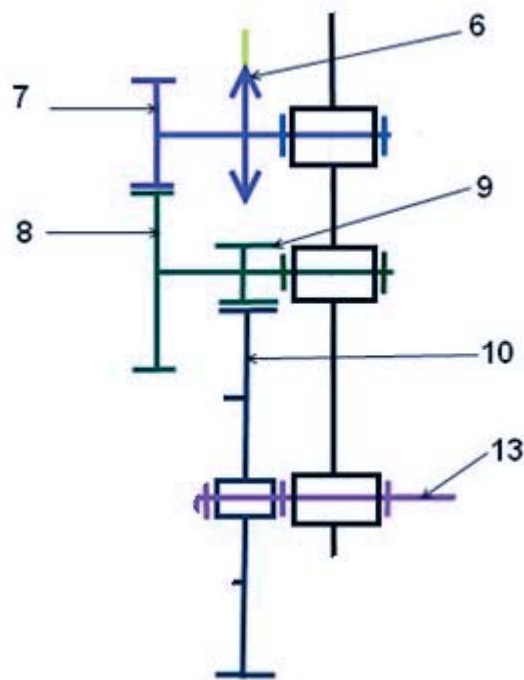


Figure 2 – Réducteur seul

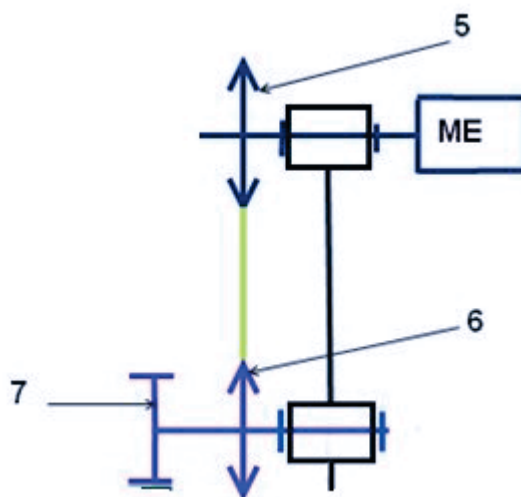


Figure 3 – Réducteur seul

B.3. Vitesse du véhicule

On considère que la Prius roule en ligne droite, les deux axes de roues (12) et (13) tourne à la même vitesse, on a alors $\omega_{13/0} = \omega_{12/0} = \omega_{10/0}$

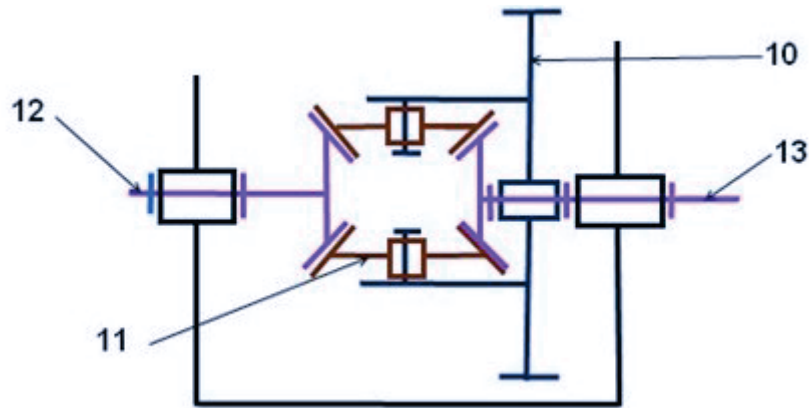


Figure 4 – Différentiel

Q5. Rappeler l'utilité du différentiel

Q6. Compte tenu des dimensions des roues, Déterminer la relation entre $V_{prius/sol}$, la vitesse de la Prius par rapport au sol et $\omega_{10/0}$.

B.4. Train épicycloïdal

Le train épicycloïdal du répartiteur de puissance (figure 5 peut être modélisé par le schéma de la figure 6.

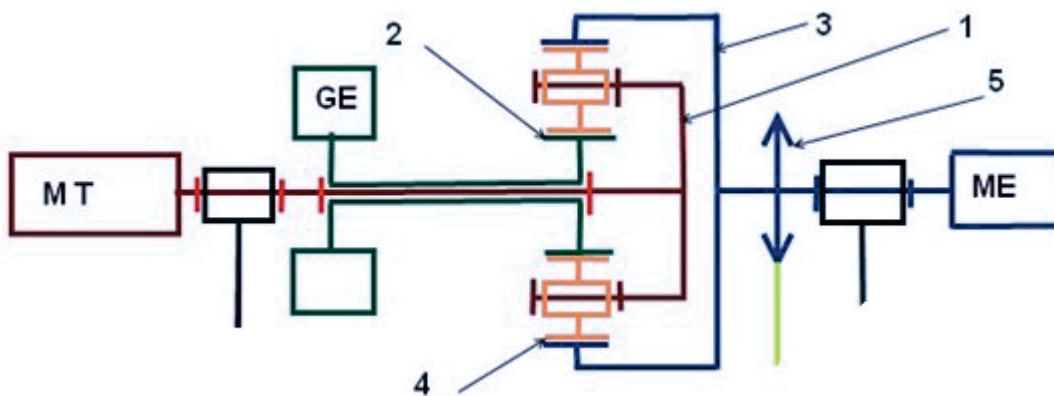


Figure 5 – Réducteur seul

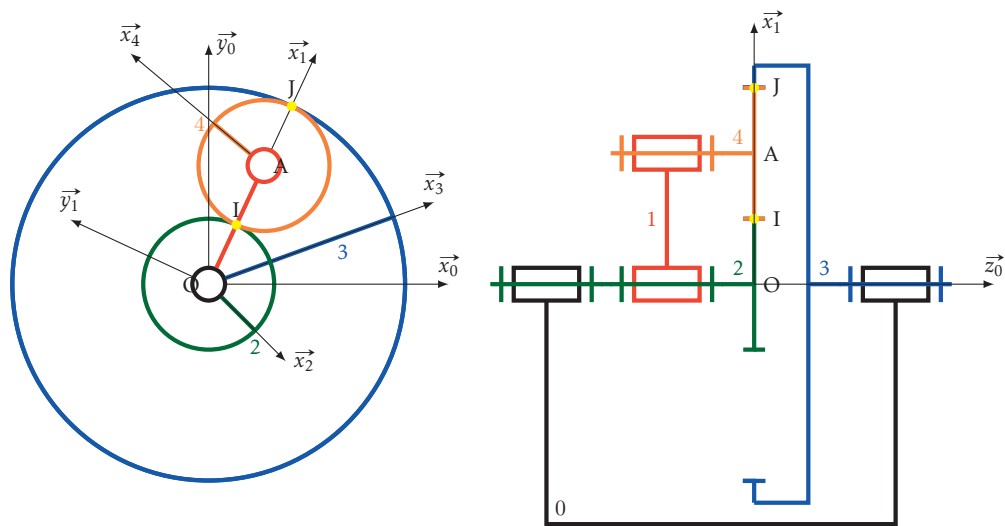
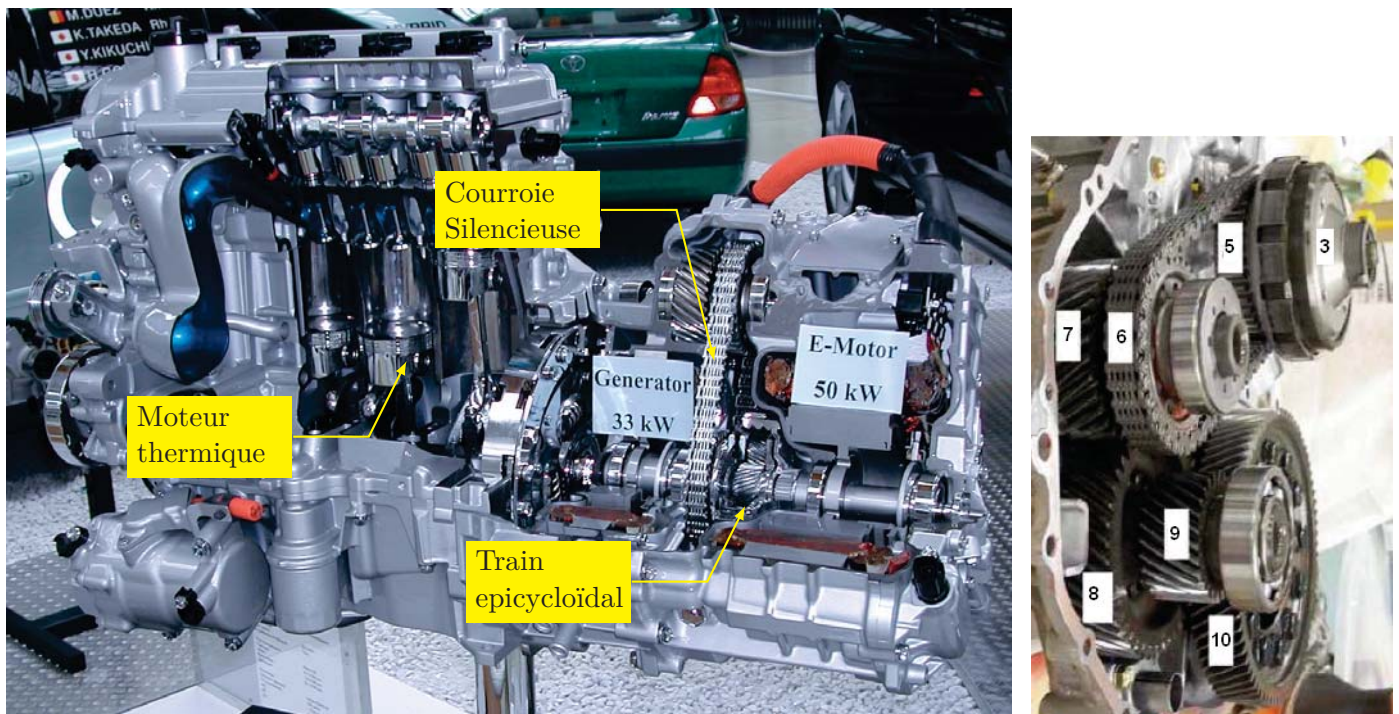


Figure 6 – Modélisation du train épicycloïdal



(a) Écorché du moteur de la Toyota

(b) chaîne silencieuse et réducteur

Figure 7 – Chaîne d'énergie de la Toyota

Q7. Déterminer $\vec{V}_{I \in 4/2}$, en déduire une relation entre $\omega_{4/0}$, $\omega_{1/0}$ et $\omega_{2/0}$.

Q8. Déterminer $\overrightarrow{V_{J \in 4/3}}$, en déduire une relation entre $\omega_{4/0}$, $\omega_{1/0}$ et $\omega_{3/0}$.

Q9. En déduire que la relation entre $\omega_{2/0}$, $\omega_{1/0}$ et $\omega_{3/0}$ peut s'écrire :

$$\frac{\omega_{3/0} - \omega_{1/0}}{\omega_{2/0} - \omega_{1/0}} \approx -0,3846$$

C. Étude des modes de fonctionnement

Nous allons étudier quelques phases du fonctionnement de la Toyota Prius.

C.1. Phase de démarrage

Au démarrage (figure 8a), la génératrice entraîne le moteur $\omega_{G/0} \neq 0$ le moteur électrique ne fonctionne pas.

Lorsqu'on "allume" la voiture, le générateur électrique (G) fait office de démarreur, en faisant tourner le moteur thermique (essence) jusqu'à 1 500 tr/min, pour qu'il débute sa phase initiale de chauffe avec une condition optimale.

G, en jouant un rôle de démarreur très puissant, permet au moteur essence de sauter l'étape de montée en régime (de 0 à 1500), phase qui consomme beaucoup d'essence et peu efficace.

Q10. Déterminer $\frac{\omega_{MT/0}}{\omega_{G/0}}$. Quelle est la vitesse de rotation de la machine électrique G à la fin de la mise en route.

C.2. Fonctionnement tout électrique

Quand la voiture n'est pas très sollicitée (maintien de vitesse à faible allure par exemple, ou en marche arrière pour une manœuvre), et si la capacité de la batterie le permet, la voiture hybride peut rouler en tout électrique (figure 8c). Le moteur thermique est alors à l'arrêt et ne consomme plus d'essence.

C'est le moteur électrique principal (M) qui fait avancer la voiture, alimenté par la batterie hybride, le moteur thermique ne fonctionne pas.

Q11. En déduire la relation entre $V_{prius/sol}$, la vitesse de la Prius par rapport au sol et $\omega_{M/0}$.

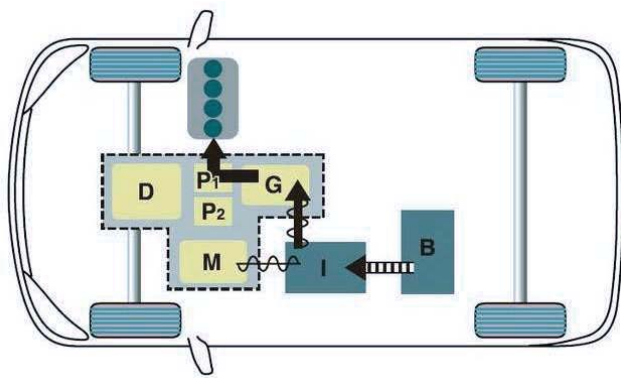
Q12. Déterminer la vitesse de rotation de génératrice $\omega_{G/0}$ en fonction de $\omega_{M/0}$.

C.3. Phase vitesse maximale

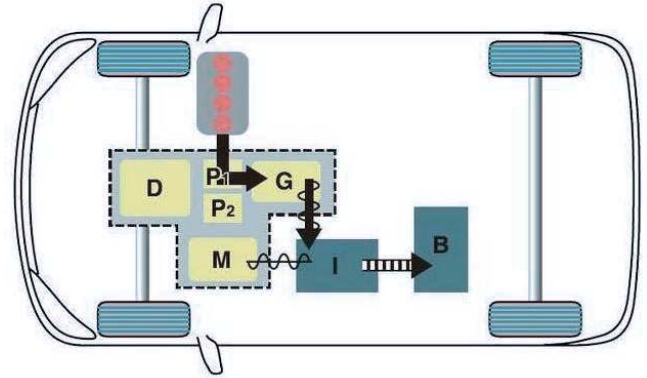
À vitesse maximale (180 km h^{-1}) est atteinte lorsque, le moteur thermique tourne à 5000 tr/min et délivre sa puissance maximale. Le moteur électrique utilise l'énergie de la batterie et l'énergie fournie par la génératrice.

Q13. Déterminer la vitesse de rotation du moteur électrique M

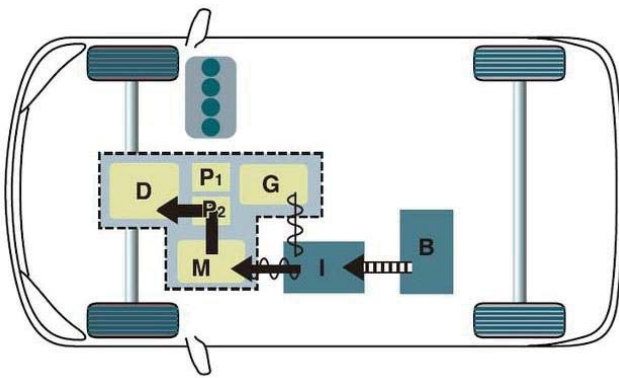
Q14. Déterminer la vitesse de rotation de la génératrice.



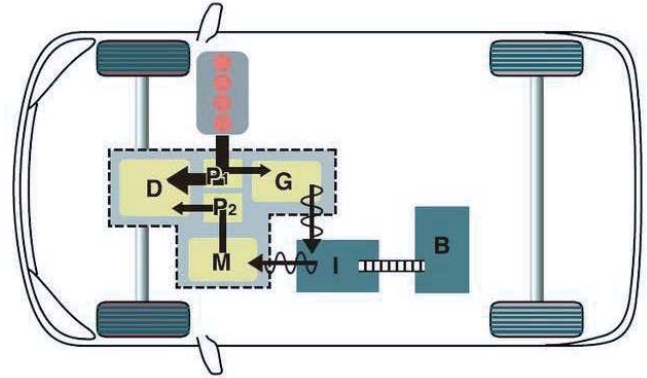
(a) Phase de démarrage



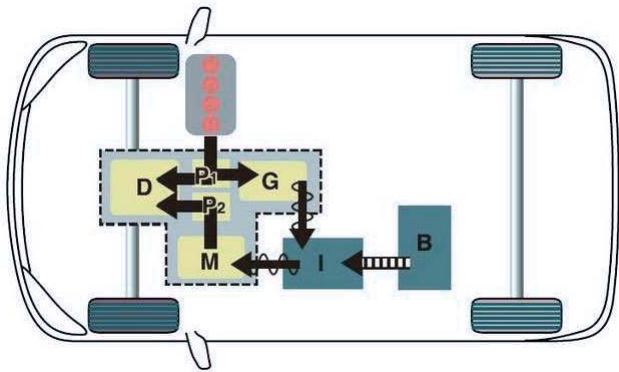
(b) Recharge à l'arrêt



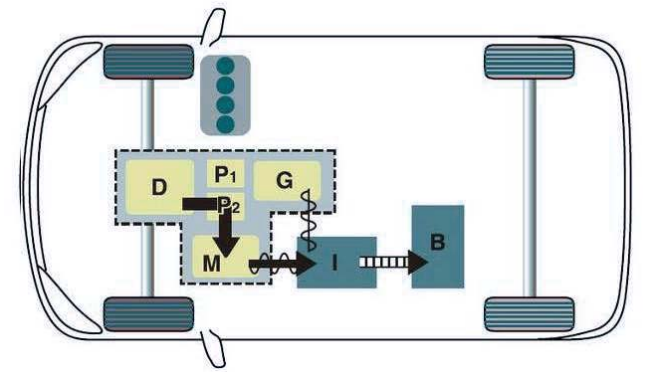
(c) Roulage tout électrique



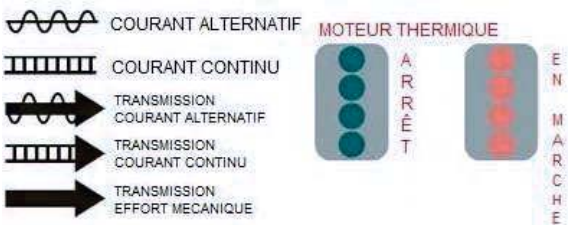
(d) Roulage normal



(e) Phase d'accélération



(f) Décélération - freinage



— M : machine électrique fonctionnant principalement en moteur,

- G : machine électrique fonctionnant principalement en génératrice,
- B : batterie,
- I : onduleur assure la conversion courant / courant alternatif,
- P₁ : train épicycloïdal assurant la répartition de la puissance,
- P₂ : réducteur mécanique,
- D : différentiel.

(g) Légende

Figure 8 – Les différentes phases de fonctionnement de la Toyota Prius