

La motorisation d'un véhicule hybride (première

HERVÉ DISCOURS^[1]

La cherté et la raréfaction du pétrole ainsi que la sensibilisation du public à l'impact de son exploitation sur l'environnement conduisent les constructeurs automobiles à rechercher des solutions innovantes dans le domaine des chaînes de traction. Le véhicule hybride – dont les développements sont présentés au début de cette revue dans l'article « Motorisations hybrides : que faire ? » – est l'un des concurrents de cette course effrénée. Nous vous le présentons ici à travers une application pédagogique destinée à des étudiants en formation post-BTS.

Inspirée du modèle Prius THS de Toyota, cette étude reprend la structure du GMP (Groupe Moto-Propulseur) et les principales données numériques. Du fait de la complexité du système, certaines hypothèses simplificatrices ont dû être prises et se traduisent par de minimes modifications dans les grandeurs. L'étude reste cependant fidèle au principe de fonctionnement original.

La voiture étudiée est un véhicule hybride parallèle-série, aussi appelé hybride parallèle à dérivation de puissance.

Données :

Masse totale de la voiture : 1 300 kg
Force de résistance (en N) à l'avancement de la voiture sur le plat, avec v sa vitesse (en m/s) :

$$F_{RES} = 188 + 0,32 v + 0,456 v^2$$

La vue générale du groupe motopropulseur et de la transmission du véhicule est donnée en 1 (et les abréviations utilisées, en encadré).

Les rendements de la transmission, des machines électriques et de leurs convertisseurs électroniques seront considérés de 100 %.

Le moteur essence

Le moteur étudié est un moteur essence (supercarburant) à 4 cylindres et 16 soupapes. Sa cylindrée est de 1 497 cm³ (≈ 1,5 l).

Données :

PCI du supercarburant : 12,272 Wh/g
Densité du supercarburant : 0,72

La courbe 2 montre les limites de fonctionnement du moteur dans le plan couple/vitesse. Elle précise également la consommation spécifique du moteur (en g/kWh) suivant les zones de fonctionnement.

[1] Professeur agrégé de génie électrique au lycée Jules-Ferry de Versailles (78).

mots-clés

conversion, énergie, puissance

À partir de la courbe précédente, déterminer la puissance maximale du moteur. Donner le résultat en kW et en ch (HP).

La puissance maximale est obtenue lorsque le produit $C \cdot \Omega$ (donc $C \cdot N$) est maximal. La puissance se traduit dans le plan couple/vitesse par une hyperbole.

Estimation :

Point 111 Nm/4 250 tr/min → $P = 49,4$ kW (≈ 67 HP)

Point 100 Nm/4 500 tr/min → $P = 47,1$ kW (≈ 64 HP)

Le constructeur donne 52 kW (≈ 70 HP), ce qui est exceptionnellement petit pour une voiture de ce poids (1 300 kg).

Calculer la valeur du rendement maximal de ce moteur. Pour quelle proportion (environ) de la puissance maximale est-il obtenu ?

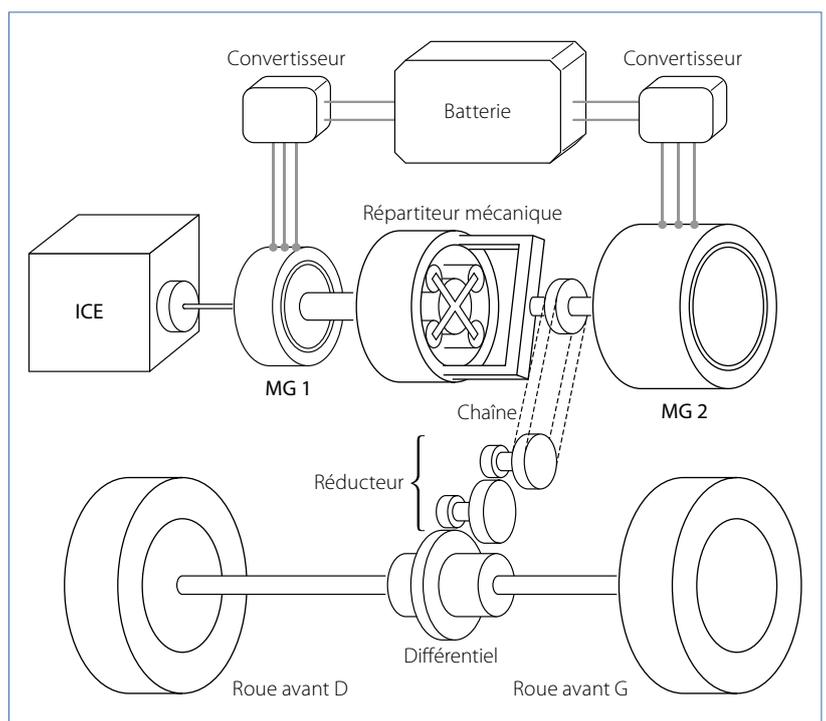
Consommation spécifique d'un moteur (généralement en g/kWh) :

$$be = B/P_{eff}$$

B : masse de carburant consommé en g/h ou kg/h

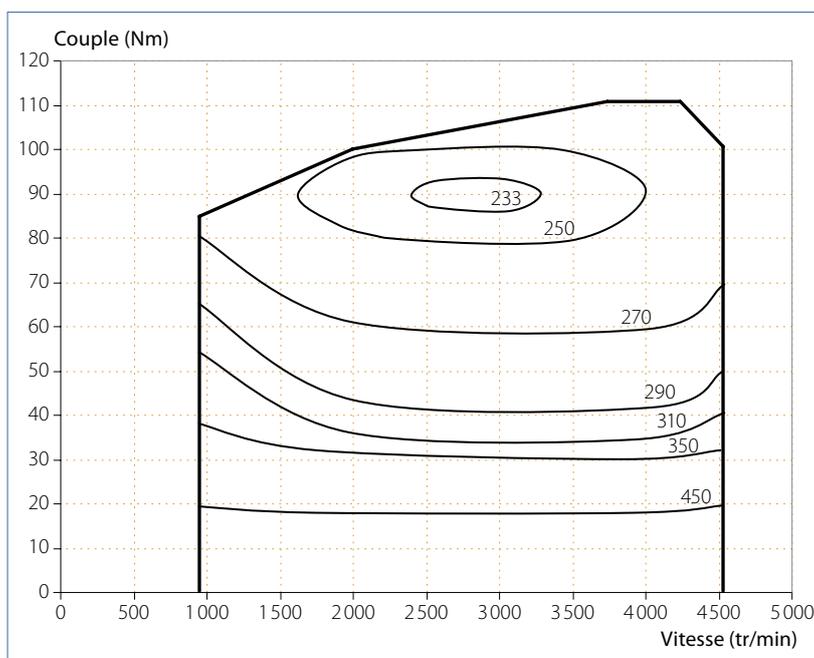
P_{eff} : puissance effective

La puissance effective est la puissance utile fournie par le moteur quand celui-ci est équipé des organes auxiliaires nécessaires à son fonctionnement (dispositif d'allumage, pompe d'injection, pompe à eau...).



1 La vue générale du groupe motopropulseur et de sa transmission

partie)



2 Le fonctionnement du moteur dans le plan couple/vitesse

Le rendement effectif d'un moteur est le rapport entre le travail mécanique effectif (disponible à l'embrayage) et l'équivalent en travail du carburant amené.

$$\eta_e = \frac{W_u}{W_a}$$

$$= \frac{W_{\text{méca}}}{W_{\text{équivalent_du_carburant_consommé}}} = 1/(\text{PCI} \cdot be)$$

$$\eta_e = 1/12,272 \times 1/be = 81,486/be$$

$$\text{Donc } \eta_{e_{\text{max}}} = 81,486/233 \approx 34,97 \%$$

Autre méthode : 233 g de carburant permettent de développer 1 kWh ; or ces 233 g ont une équivalence de $233 \times 12,272 = 2,859$ kWh. Donc :

$$\eta_{e_{\text{max}}} = 1/2,859 \approx 34,97 \%$$

Ce qui est plutôt bon pour un moteur essence (classiquement, 30 % et moins, ou 250 g/kWh – pour un diesel, 220 g/kWh...).

Le rendement maximal est obtenu autour du point 90 Nm/3000 tr/min, soit ≈ 28 kW. C'est légèrement plus de la moitié de P_{max} , ce qui est classique pour un moteur thermique.

Sur un véhicule hybride, la possibilité d'utiliser un moteur essence de puissance réduite est appelée le *downsizing* (engine downsizing). Quel avantage tire-t-on du downsizing ? En cas de besoin, comment l'apport supplémentaire de puissance est-il réalisé ?

Une voiture conventionnelle, avec un moteur dimensionné pour de fortes accélérations et des pentes raides, fait fonctionner la plupart du temps ce moteur avec un mauvais rendement, tandis qu'un petit moteur peut fonctionner plus près du régime de rendement maximal, parce que les demandes de puissance lors de la conduite normale sont très inférieures à la puissance maximale.

La motorisation complémentaire (électrique) vient apporter le complément de puissance en cas de forte demande.

L'optimisation du fonctionnement du moteur

Outre le *downsizing*, une motorisation hybride parallèle-série peut permettre une optimisation du fonctionnement du moteur essence. L'étude suivante va mettre en évidence le procédé utilisé. On considère tout d'abord la voiture propulsée uniquement au moyen du moteur essence (seul élément dont le rendement n'a pas été considéré de 100 %).

1^{er} cas : la voiture se déplace à 100 km/h

Calculer la puissance que doit fournir le moteur. Reporter ce résultat sur la caractéristique du moteur 2.

$$P = \text{force} \times \text{vitesse} = F_{\text{RES}} \times v \quad \text{Avec } v = V_v/3,6$$

$$P = [188/3,6] \times V_v + [0,32/3,6^2] \times V_v^2 + [0,456/3,6^3] \times V_v^3$$

$$\text{Soit } P \approx 52,22 \times V_v + 24,69 \times 10^{-3} \times V_v^2 + 9,77 \times 10^{-3} \times V_v^3$$

$$\text{Donc, à 100 km/h : } P = 15\,243 \text{ W}$$

Voir en 3.

Pour une vitesse de rotation du moteur de 3500 tr/min, calculer la consommation (en litres) du véhicule aux 100 km.

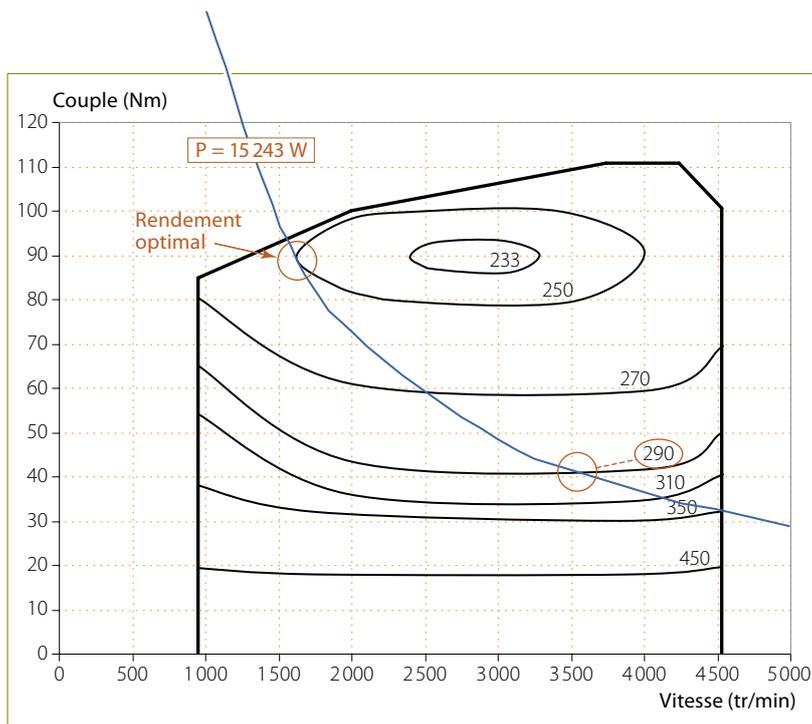
Pour 100 km, il faut 1 heure de fonctionnement. Donc l'énergie à fournir est de 15,243 kWh. Si le régime du moteur est de 3500 tr/min, la consommation $be \approx 290$ g/kWh. Donc la consommation est de

$$0,29 \times 15,243 = 4,42 \text{ kg}$$

$$\text{Soit } 4,42/0,72 \approx 6,14 \text{ l/100 km}$$

► Abréviations utilisées

- ICE (*Internal Combustion Engine*) : moteur essence
- MG (Moteur Générateur) : machines électriques
- CVS : convertisseurs électroniques associés aux machines électriques
- PSD (*Power Split Device*) : répartiteur mécanique de puissance

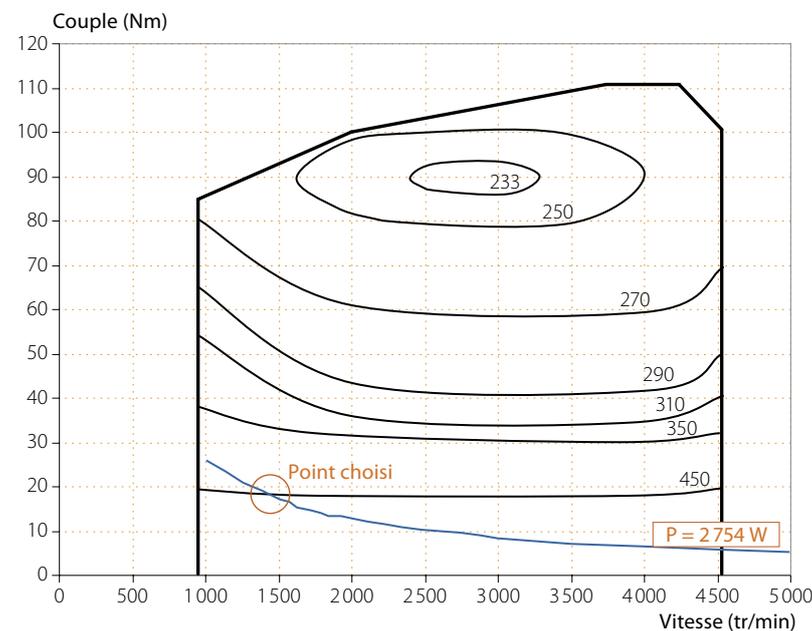


3 La puissance que doit fournir le moteur dans le 1^{er} cas (100 km/h)

Ce qui est déjà bien (même ordre de grandeur, voire inférieur, que pour une voiture conventionnelle du même gabarit).

Sur une voiture conventionnelle, quel est l'organe qui permet de choisir la vitesse de rotation du moteur, pour une vitesse donnée du véhicule ?

Sur une voiture conventionnelle, le rapport de la boîte de vitesses permet de choisir le régime du moteur, pour une vitesse donnée de la voiture (rapports discrets, donc réglage entre valeurs prédéfinies, ajustement précis impossible).



4 La puissance que doit fournir le moteur dans le 2^e cas (40 km/h)

Déterminer la vitesse de rotation du moteur pour obtenir le meilleur rendement du moteur. Calculer dans ce cas la consommation du véhicule.

En choisissant un régime légèrement supérieur à 1 500 tr/min (point 90 Nm/1 617 tr/min), la courbe devient tangente à la courbe d'isoconsommation de 250 g/kWh.

Pour 100 km → 15,243 kWh

$$\rightarrow 0,25 \times 15,243 = 3,81 \text{ kg}$$

$$\rightarrow 3,81 / 0,72 \approx 5,3 \text{ l/100 km}$$

C'est un très bon résultat, dû également aux points suivants :

- Moteur à cycle Atkinson optimisé pour élargir la plage de rendement maximal, vitesse réduite donc réduction des pertes par frottement, vilebrequin décalé, soupapes à faible effort de rappel...
- Bon C_x de la voiture ($< 0,3$) et pneus à faible résistance au roulement
- Hypothèses simplificatrices : rendement de 100 % de la transmission

2^e cas : la voiture se déplace à 40 km/h

Calculer la puissance que doit fournir le moteur. Reporter ce résultat sur la caractéristique du moteur 2.

Rappel :

$$P \approx 52,22 \times V_v + 24,69 \times 10^{-3} \times V_v^2 + 9,77 \times 10^{-3} \times V_v^3$$

$$\text{Donc, à 40 km/h : } P = 2 754 \text{ W}$$

Voir en 4.

Calculer la consommation du véhicule (en litres aux 100 km) si l'on fait tourner le moteur à 1 500 tr/min.

Régime 1 500 tr/min → intersection des courbes : $be = 450 \text{ g/kWh}$

En 1 heure, on parcourt 40 km et l'énergie à fournir est de 2,754 kWh, donc 100 km nécessitent 6,885 kWh.

Il faut $6,885 \times 0,45 = 3,1 \text{ kg}$ d'essence, soit 4,3 l, pour 100 km.

Calculer la consommation de la voiture si l'on pouvait faire fonctionner le moteur avec une consommation spécifique de 250 g/kWh.

Avec $be = 250 \text{ g/kWh}$, soit 45/25 fois moins, la consommation serait de 2,39 l/100 km.

3^e cas : le moteur essence

fonctionne 2,7 min en fournissant 15243 W

Seuls 2 754 W sont utilisés pour la propulsion de la voiture (vitesse de 40 km/h). Le reste (12 489 W) est transformé en électricité et stocké dans la batterie.

1^{re} phase : moteur essence seul

Calculer la quantité d'essence consommée (au régime optimal du moteur).

Énergie fournie par ICE :

$$15 243 \times 2,7 / 60 = 685,935 \text{ Wh}$$

Avec $be = 250 \text{ g/kWh}$ (rendement optimal du moteur à cette puissance), la consommation durant les 2,7 minutes est de

$$0,25 \times 0,686 / 0,72 = 0,238 \text{ l}$$

Calculer la distance parcourue par la voiture lors du fonctionnement du moteur.

$$D_1 = V_v \times T_1 = 40 \times 2,7 / 60 = 1,8 \text{ km}$$

Calculer la quantité d'énergie stockée dans la batterie (on considérera tout d'abord un rendement énergétique de la batterie de 100 %).

$$W_{st} = 12\,489 \times 2,7 / 60 = 562 \text{ Wh}$$

Le moteur essence est maintenant arrêté, et l'énergie stockée dans la batterie est réutilisée pour la propulsion de la puissance, au moyen de la motorisation électrique.

2^e phase : motorisation électrique seule

Calculer la distance que la voiture peut parcourir à une vitesse de 40 km/h.

$$T_2 = \text{énergie stockée} / \text{puissance pour rouler à 40 km/h} \\ = 562 / 2\,754 = 0,204 \text{ h (soit } \approx 12 \text{ minutes)}$$

À 40 km/h, la voiture peut parcourir :

$$D_2 = V_v \times T_2 = 8,163 \text{ km}$$

Bilan

Calculer la distance totale parcourue par la voiture.

$$D = D_1 + D_2 \approx 10 \text{ km}$$

En déduire la consommation aux 100 km en utilisant cette stratégie.

Avec ce procédé (ICE pendant 2,7 min et MG pendant 12 min), on peut faire 10 km en utilisant 0,238 l de carburant.

En répétant 10 fois l'opération, on consomme 2,38 l / 100 km, ce qui est... excellent !

Résumer la stratégie utilisée pour réduire la consommation de la voiture.

La charge supplémentaire d'ICE le fait fonctionner avec un meilleur rendement. Cette charge ne se transforme pas en « rien d'utile », mais en électricité que l'on peut utiliser par la suite. ICE n'est mis en service que s'il peut fonctionner avec une efficacité optimale.

L'idée générale consiste à éviter les piètres rendements dus au fonctionnement en charge partielle... en ne faisant pas fonctionner le moteur en charge partielle !

Remarques :

- Pendant la première phase, on aurait pu encore améliorer le rendement.
- Les rendements d'une motorisation électrique (avec convertisseurs, stockage...) seront toujours supérieurs à ceux d'une motorisation thermique, mais, y compris

avec des rendements aussi mauvais, la stratégie est toujours intéressante... Même en considérant un rendement global de 70 % de la « chaîne électrique », on trouve un résultat intéressant :

$$D2' = V_v \times T2' = V_v \times W_{st} / P40 \times 0,7 = 5,7 \text{ km} \\ \text{donc } D' = 7,5 \text{ km avec } 0,238 \text{ l}$$

Ainsi, à 40 km/h, la consommation serait $\approx 3,17 \text{ l} / 100 \text{ km}$.

- Il est difficile de stocker pendant longtemps (taille de la batterie). La durée de la première phase est donc liée à la quantité d'énergie que peut stocker la batterie.

La batterie

La batterie utilisée par le système hybride se compose de 228 éléments NiMH (Nickel Métal Hydrure) regroupés dans un bloc placé sous les sièges arrière (masse totale : 52 kg) **5**. Chaque élément présente une tension d'environ 1,2 V et une capacité de 6,5 Ah. Le courant maximal est de 80 A à la décharge et de 50 A à la charge.



5 La batterie

Par convention, pour toute la suite de l'exercice on notera le courant positif lors de la charge et négatif lors de la décharge.

Calculer la tension totale de la batterie.

$$U = 228 \times 1,2 = 273,6 \text{ V}$$

Calculer les puissances maximales admissibles à la charge et à la décharge.

$$P_{\max} \text{ à la décharge : } 273,6 \times -80 = -21,888 \text{ kW}$$

$$P_{\max} \text{ à la charge : } 273,6 \times 50 = 13,68 \text{ kW}$$

Calculer l'énergie totale qui serait contenue dans la batterie si son état de charge était de 100 %.

$$W_{\text{totale}} = Q \times U$$

Q : quantité d'électricité,
en Ah ou Coulombs (1 Ah = 3600 C)

$$W_{\text{totale}} = 273,6 \times 6,5 = 1\,778,4 \text{ Wh (ou } 1,2 \times 228 \times 6,5)$$

Pour augmenter la durée de vie de la batterie, son état de charge (noté SOC, pour *State Of Charge*) sera limité à 80 % de la pleine charge. Pour la même raison, l'état

de charge ne pourra pas être inférieur à 40 % de la pleine charge (le constructeur garantit l'utilisation de la batterie pour plus de 200 000 km).

Calculer l'énergie de la batterie réellement utilisable. Donner à cette quantité un équivalent en litres de carburant.

Quelle distance peut-on parcourir à 40 km/h avec cette énergie (motorisation électrique)?

Seuls 40 % (80 - 40) de la charge sont utilisables :

$$W_{\text{utilisable}} = 711,36 \text{ Wh (2,56 MJ)}$$

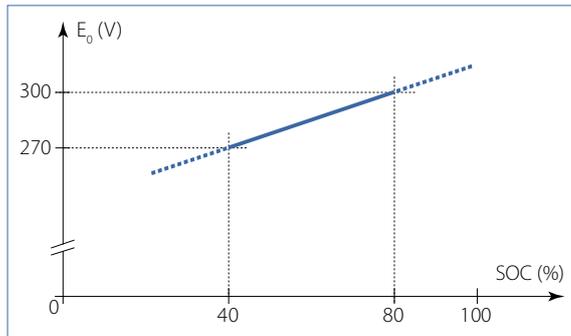
L'énergie dans la batterie varie de 711 à 1 422 Wh, ce qui correspond sur l'affichage aux indications « trompeuses » de 0 à Full...

Le supercarburant fournit 12,272 Wh pour 1 g, donc 57,966 g sont équivalents à l'énergie utilisable dans la batterie, soit ≈ 0,08 l ou 80 ml.

Pour rouler à 40 km/h, il faut 2 754 W. Donc 711,36 Wh permettront de faire avancer la voiture pendant 0,258 h (≈ 15 min). La distance parcourue à cette vitesse est donc de 40 × 0,258 ≈ 10,33 km.

Avec 100 % de rendement (motorisation électrique), la consommation de carburant équivalente serait de ≈ 0,8 l/100 km.

La résistance interne de la batterie étudiée a pour valeur $R = 0,46 \Omega$. La tension à vide (pour un courant nul) est notée E_0 . Sa valeur dépend de l'état de charge de batterie selon la caractéristique donnée en 6.



6 La tension à vide en fonction de l'état de charge de la batterie

Donner l'expression de E_0 en fonction de SOC.

C'est une droite passant par les points 300 V/80 % et 270 V/40 %. On en déduit :

$$E_0 = 240 + 0,75 \times \text{SOC}$$

Donner l'expression de U , la tension aux bornes de la batterie, en fonction de E_0 , R et I .

Avec convention récepteur (I compté positif à la charge) :

$$U = E_0 + R \cdot I$$

En déduire la relation entre U , SOC et I .

$$U = E_0 + R \cdot I = E_0 + 0,46 \times I \\ = 240 + 0,75 \times \text{SOC} + 0,46 \times I$$

Calculer la tension U pour les situations suivantes :

- État de charge de 60 %
 - Charge des éléments de 4,9 Ah
- $$\left. \begin{array}{l} I = 0 \text{ A}; \quad I = + 10 \text{ A}; \\ I = - 10 \text{ A}; \quad I = + 30 \text{ A}; \\ I = - 60 \text{ A} \end{array} \right\}$$

- Pour SOC = 60 %

- $U = 285 \text{ V}$ pour $I = 0 \text{ A}$
- $U = 289,6 \text{ V}$ pour $I = + 10 \text{ A}$
- $U = 280,4 \text{ V}$ pour $I = - 10 \text{ A}$
- $U = 298,8 \text{ V}$ pour $I = + 30 \text{ A}$
- $U = 257,4 \text{ V}$ pour $I = - 60 \text{ A}$

- Pour SOC = 75,38 % (déduit de $4,9/6,5 \times 100$)

- $U = 296,5 \text{ V}$ pour $I = 0 \text{ A}$
- $U = 301,1 \text{ V}$ pour $I = + 10 \text{ A}$
- $U = 291,9 \text{ V}$ pour $I = - 10 \text{ A}$
- $U = 310,3 \text{ V}$ pour $I = + 30 \text{ A}$
- $U = 268,9 \text{ V}$ pour $I = - 60 \text{ A}$

Étude de la batterie

lors de cycles de charge/décharge

Pour étudier le comportement de la batterie lors du fonctionnement de la voiture, on propose l'étude de deux cycles (théoriques) :

- 1 Charge de 10 A pendant 6 min et décharge de 10 A pendant 6 min
- 2 Charge de 30 A pendant 2 min et décharge de 60 A pendant une min

Tracer sur le document en annexe (p. 71) l'évolution de la charge des éléments de la batterie. La charge initiale étant de 60 %, déterminer la charge à la fin des cycles.

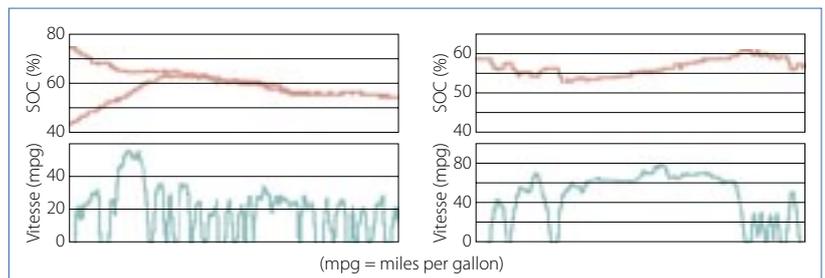
Sur les cycles donnés, les charges et décharges s'effectuent à courant constant ; l'état de charge évolue donc linéairement, selon la relation : $q(t) = \int i(t) \cdot dt$.

Une charge de 10 A pendant 6 min apporte :

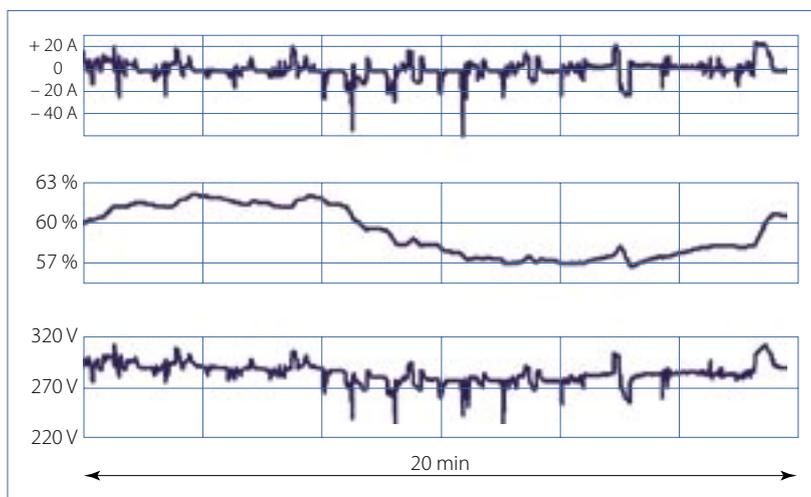
$$10 \times 6/60 = 1 \text{ Ah}$$

À la fin des cycles, la charge est de 60 %, comme au début ; on trouve donc la même quantité d'électricité à la fin. Cela n'implique pas un rendement de 100 %, car le rapport entre l'énergie apportée et l'énergie récupérée n'est pas de 1...

Le système de contrôle (calculateurs) du système hybride doit gérer le fonctionnement des machines



7 L'état de charge de la batterie au regard de la vitesse du véhicule dans différentes situations



8 La tension au regard de l'état de charge et du courant

(ICE, MG1, MG2) en fonction de l'état de charge de la batterie. La stratégie adoptée vise à stabiliser ce dernier autour de 60 %, quelles que soient les situations de fonctionnement de la voiture **7**.

Tracer l'évolution de la tension aux bornes de la batterie.

La tension évolue en fonction de l'état de charge et du courant. Le tracé **8** montre un exemple d'évolution des grandeurs plus fidèle au fonctionnement réel lors de l'utilisation de la voiture.

Tracer l'évolution de la puissance reçue par la batterie, notée P_{BATT} .

Le tracé de $P_{BATT} = U \cdot I$; la puissance est donc positive lors de la charge.

Calculer l'énergie reçue par la batterie lors de la charge du 1^{er} cycle; calculer l'énergie transformée en chaleur lors de cette phase; en déduire l'énergie réellement stockée dans la batterie à la fin de la charge du 1^{er} cycle.

Énergie reçue pendant la 1^{re} charge :

$$W_{R1} = P_{moy} \times 6/60 = 295,37 \text{ Wh}$$

Énergie perdue pendant la 1^{re} charge :

$$W_{JC1} = R \times I^2 \times 6/60 = 46 \times 6/60 = 4,6 \text{ Wh}$$

Énergie stockée en fin de 1^{re} charge :

$$W_{ST1} = W_{R1} - W_{JC1} = 290,77 \text{ Wh}$$

$$\text{et aussi } W_{ST1} = E_{0,moy} \times 6/60$$

Calculer l'énergie fournie par la batterie lors de la décharge du 1^{er} cycle. En déduire le rendement énergétique de ce cycle de charge/décharge.

$$W_{F1} = P_{moy} \times 6/60 = 286,17 \text{ Wh}$$

$$\eta_1 = W_{F1}/W_{R1} = 286,17/295,37 \approx 96,88 \%$$

Calculer le rendement énergétique du 2^e cycle de charge/décharge. Conclure.

$$\eta_2 = W_{F2}/W_{R2} = 263,15/304,55 \approx 86,4 \%$$

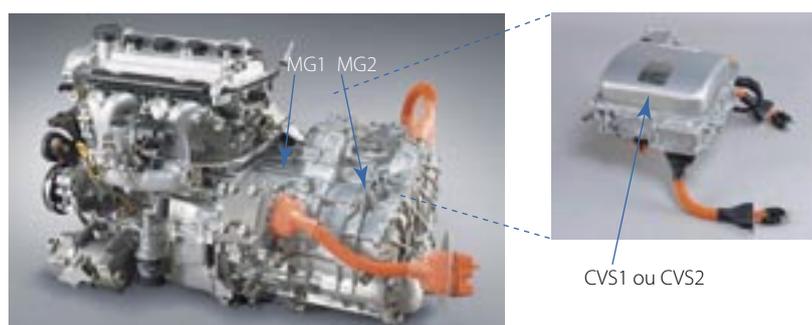
Le calcul effectué montre que pour retrouver le même état de charge (quantité d'électricité) après un cycle de fonctionnement, il faut amener plus d'énergie lors de la charge que l'on en récupère lors de la décharge.

Les pertes considérées ici sont uniquement des pertes Joule dues à la résistance interne. Elles dépendent du carré du courant, et interviennent deux fois (à la charge et à la décharge). Le rendement est donc lié au courant (au carré).

Pour la suite, on admettra la tension de la batterie constante et égale à 285 V.

Les machines électriques et les convertisseurs

La voiture comporte deux machines électriques réversibles (MG1 et MG2), pouvant fonctionner en moteur ou en générateur. Toutes les deux sont des machines synchrones triphasées à aimants permanents. Chacune est associée à un convertisseur électronique, à transistors IGBT **9**.



9 Les deux machines électriques et leur convertisseur électronique

Comment qualifie-t-on le fonctionnement d'un convertisseur lorsque la machine associée fonctionne en moteur? Quelle grandeur électrique permet le contrôle de la vitesse de rotation de la machine?

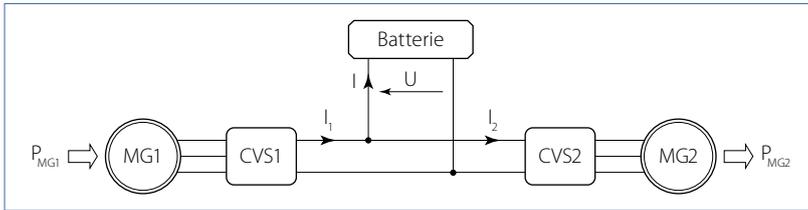
Il s'agit d'un fonctionnement onduleur (triphasé). C'est le contrôle de la fréquence (tensions et courants) qui permet le contrôle de la vitesse. On parle de variateur de fréquence (*inverter*).

Comment qualifie-t-on le fonctionnement d'un convertisseur lorsque la machine associée fonctionne en générateur? Dans quel sens circule l'énergie entre la machine et la batterie?

Il s'agit d'un fonctionnement redresseur (triphasé). L'énergie mécanique est transformée en énergie électrique (grandeurs alternatives), puis transformée en énergie électrique (continu). L'énergie revient vers la batterie.

Associées à des convertisseurs distincts, les machines peuvent fonctionner indépendamment en moteur ou en générateur. Par convention, on notera :

- positive la puissance lorsque MG1 fonctionne en générateur. Dans ce cas, P_{MG1} correspond à la puis-



10 Le schéma électrique

sance mécanique reçue ou à la puissance électrique fournie ($\eta = 100\%$);

- positive la puissance lorsque MG2 fonctionne en moteur. Dans ce cas, P_{MG2} correspond à la puissance mécanique fournie ou à la puissance électrique reçue ($\eta = 100\%$).

Donner la relation entre P_{MG1} , P_{MG2} et P_{BATT} . Le schéma électrique est donné en 10.

$$P_{MG1} = P_{MG2} + P_{BATT} \quad (\text{rendements de } 100\%)$$

Conventions : générateur pour CVT1 et récepteur pour BATT et CVT2.

Calculer la valeur des courants si $P_{MG1} = 5237\text{ W}$ et si $P_{MG2} = 237\text{ W}$. Conclure.

$$P_{MG1} = 5237\text{ W} \rightarrow I_1 = 5237/285 = 18,37\text{ A}$$

$$P_{MG2} = 237\text{ W} \rightarrow I_2 = 237/285 = 0,83\text{ A}$$

$$P_{BATT} = P_{MG1} - P_{MG2} = 5000\text{ W} \rightarrow I = 5000/285 = 17,54\text{ A}$$

Vérification :

$$I_1 = I + I_2 \rightarrow 18,37 = 17,54 + 0,83$$

MG1 est générateur, la batterie se charge, et MG2 est moteur.

Calculer la valeur des courants si $P_{MG1} = -8839\text{ W}$ et si $P_{MG2} = -13839\text{ W}$. Conclure.

$$P_{MG1} = -8839\text{ W} \rightarrow I_1 = -8839/285 = -31,01\text{ A}$$

$$P_{MG2} = -13830\text{ W} \rightarrow I_2 = -13839/285 = -48,55\text{ A}$$

$$P_{BATT} = P_{MG1} - P_{MG2} = 5000\text{ W} \rightarrow I = 5000/285 = 17,54\text{ A}$$

Vérification :

$$I_1 = I + I_2 \rightarrow -31,01 = 17,54 - 48,55$$

MG1 est moteur, la batterie se charge et MG2 est générateur.

Les deux machines sont de constructions très semblables, mais de tailles différentes :

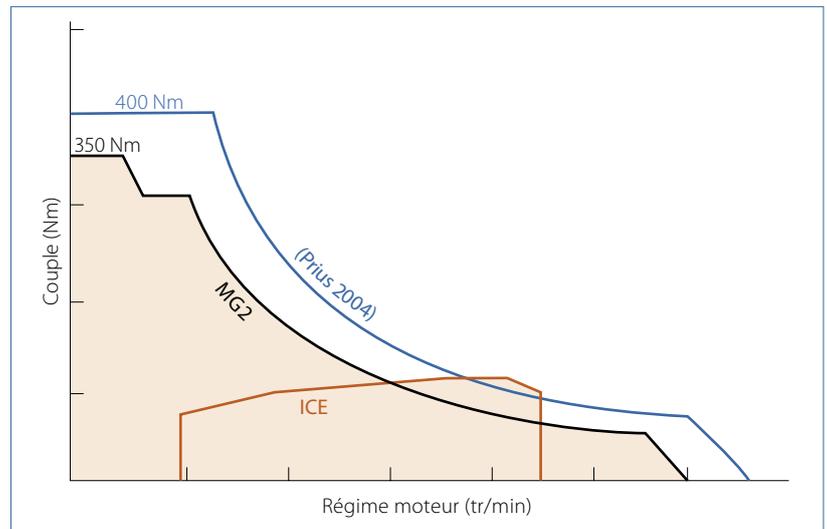
- MG1 est la plus petite des deux, sa puissance maximale est de 18 kW. Son rôle principal est d'assurer le démarrage d'ICE, puis de contrôler sa vitesse de rotation en le chargeant mécaniquement.
- MG2 est la plus grosse des deux machines, sa puissance maximale est de 33 kW. Son rôle principal est d'assister le moteur essence en cas de fortes demandes de puissance et d'assurer le freinage récupératif.

L'appellation « rôle principal » préfigure des modes de fonctionnement plus complexes, qui seront étudiés dans un deuxième temps.

Le couple maximal développé par MG2 est limité à 350 Nm (ce qui correspond à 351 A au niveau des enroulements) lorsque la vitesse de rotation est inférieure à 400 tr/min. De 400 à 1 000 tr/min, le couple maximal est de 300 Nm. De 1 000 tr/min à 6 500 tr/min (vitesse maximale de rotation), la machine peut fournir sa puissance maximale.

Tracer dans le plan couple/vitesse les limites de fonctionnement de MG2.

Voir en 11.



11 Le fonctionnement de MG2 dans le plan couple/vitesse

Comparer le tracé avec les caractéristiques du moteur essence.

Le moteur électrique développe sa puissance maximale sur une large gamme de vitesse (de 1 000 à presque 6 000 tr/min). Bien qu'inférieure à celle d'ICE de 3 000 à 4 500 tr/min, pour les autres régimes elle est nettement supérieure.

Le (très) fort couple disponible à basse vitesse permet une utilisation là où ICE est moins puissant. De 0 à 1 000 tr/min, ICE ne peut pas fonctionner, et c'est là où MG2 peut développer ses couples maximaux.

Les données Toyota sont fournies en 12.

On démontrera par la suite que la vitesse de MG2 est directement liée à la vitesse de déplacement de la voiture. En déduire la plage de fonctionnement privilégiée de MG2.

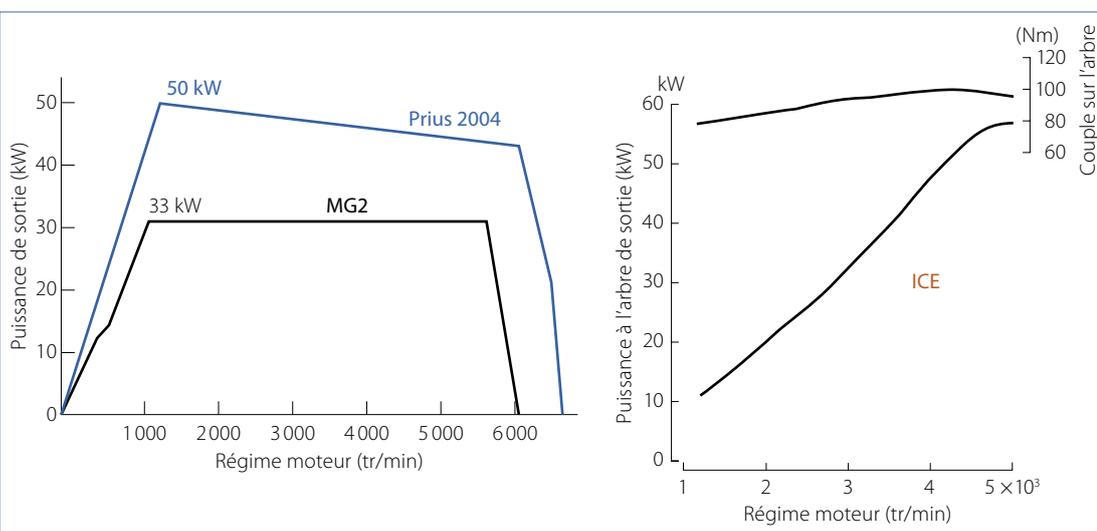
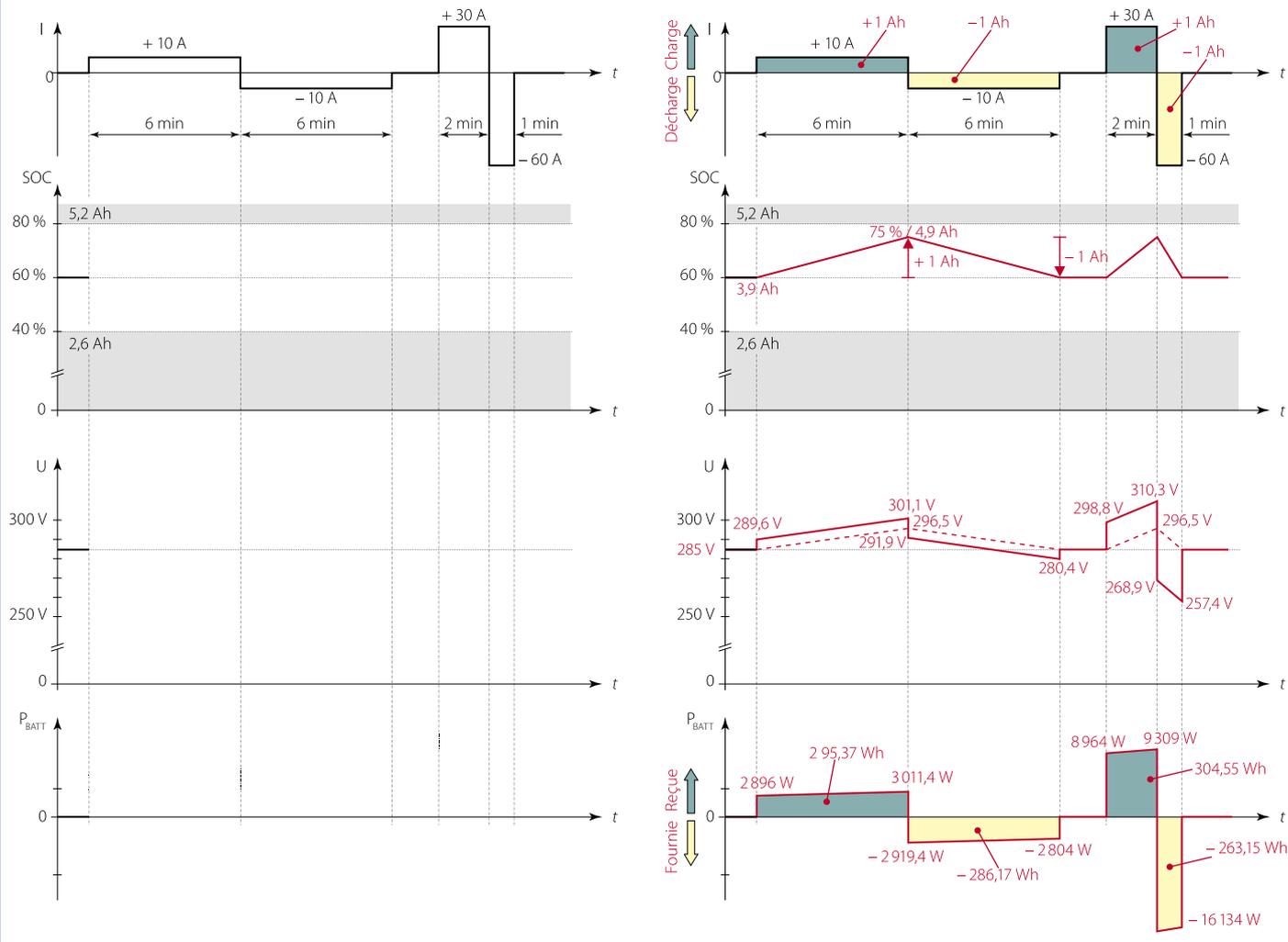
Justifier le fait que la voiture ne possède pas de boîte de vitesses.

Pour les basses vitesses, MG2 peut fonctionner (contrairement à ICE) et développer de forts couples. C'est particulièrement intéressant pour doter la voiture de fortes accélérations.

La boîte de vitesses permet d'augmenter le couple aux roues, par le jeu des démultiplications. Elle est indispensable sur une voiture conventionnelle, car le

ANNEXE

L'évolution de la charge de la batterie



12 Les données Toyota

couple à basse vitesse de rotation d'un moteur thermique est médiocre. Ici, le couple à basse vitesse étant très satisfaisant, elle est inutile (ce qui élimine l'embrayage et les constituants associés, donc des pièces d'usure...). ■