

BTS AVA 2016

(envoyé par Frédéric SCOTTI - Professeur d'Electrotechnique au Lycée Régional La Floride –Marseille)

Le véhicule à motorisation hybride, un avenir pour l'automobile ?

Ce problème propose de réaliser le bilan énergétique d'un véhicule à motorisation hybride sur un trajet défini puis d'étudier quelques éléments de la chaîne énergétique et de dégager quelques avantages et inconvénients d'un tel véhicule.

Les parties 1, 2 et 3 peuvent être traitées indépendamment les unes des autres. La partie 4 s'appuie sur les connaissances en sciences et en technologie automobile, les documents et les résultats obtenus dans les parties précédentes.

Document 1 : Les catégories de véhicules hybrides

On classe les véhicules hybrides en fonction de l'importance de la partie électrique et de la façon dont elle est combinée avec le moteur thermique. La nomenclature varie selon les sources et les constructeurs ; la plus utilisée est d'origine américaine.

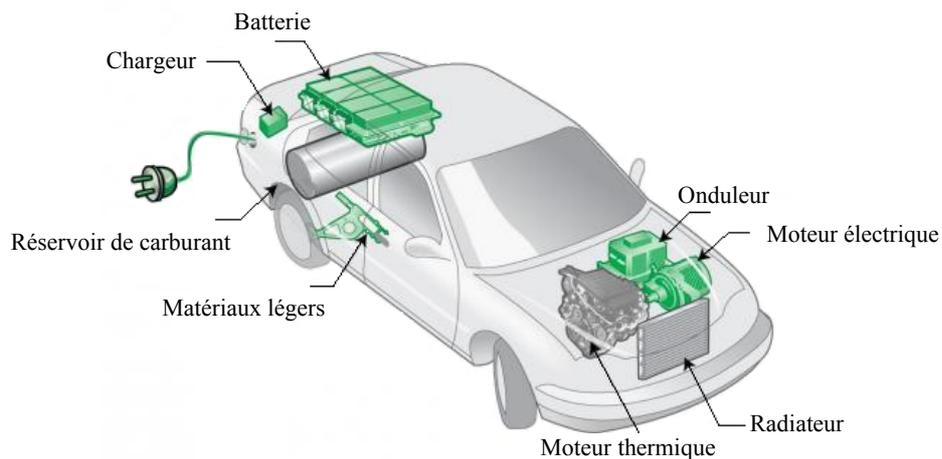
Le *mild hybrid* est le niveau d'hybridation minimal. Sauf à l'arrêt, le moteur thermique tourne en permanence. Le moteur électrique récupère l'énergie cinétique (pendant un freinage ou une descente, le moteur électrique fonctionne alors en générateur et fournit un couple résistant s'ajoutant au frein moteur). L'énergie récupérée est stockée dans des batteries ou des super-condensateurs et fournit un appoint de puissance pour aider les reprises. (...)

Le *full hybrid* est la formule la plus répandue. La voiture peut être entraînée par chaque moteur séparément ou par les deux moteurs ensemble. (...)

L'*hybride rechargeable*, ou *plug-in hybrid*, est un véhicule hybride qui peut se recharger sur le réseau électrique, ce qui permet de l'utiliser en mode tout électrique pour les petits trajets.

Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Automobilehybride_électrique (janvier 2016).

Document 2 : Schéma d'un véhicule à motorisation hybride



D'après <http://www.autocarhire.com/travelblog/featured/types-of-hybrids-explained-part-3/>

Document 3 : Comparatif des technologies des batteries les plus utilisées dans le secteur automobile

	Plomb acide ou Plomb gel	Lithium-ion (Li-ion)	Lithium-métal- polymère
Énergie massique (Wh.kg ⁻¹)	40	200	150
Énergie volumique (Wh.L ⁻¹)	100	300	200
Durée de vie (Nombre de cycles)	500 à 800	500 à 1 200	500 à 1 000
Autodécharge par mois	3 %	5 %	5 %
Puissance en pointe (W.kg ⁻¹)	700	1 500	250
Durée de vie (années)	5 à 8	2 à 6	2 à 3
Maintenance	Annuel pour l'électrolyte	Pas de maintenance	Pas de maintenance

Document 4 : Généralités sur les différentes batteries

✦ Dans la technologie au plomb, les réactions chimiques impliquent l'oxyde de plomb constituant l'électrode positive et le plomb métallique constituant l'électrode négative. La nature de l'électrolyte peut être une solution corrosive d'acide sulfurique ou un électrolyte acide gélifié. Ces batteries contiennent des métaux lourds tels que le plomb et le mercure qu'il faut recycler. Ce sont des batteries robustes, de masses élevées et de coût relativement bas. Les chargeurs utilisés sont simples car ils fonctionnent à tension constante.

✦ Il existe diverses technologies de batterie Li-ion (Li-oxyde de cobalt (LiCoO₂) ; Li-oxyde de manganèse (LiMnO₂) ; Li-fer-phosphate...). Dans toutes ces technologies, on utilise une électrode en oxyde métallique lithié (LiMnO₂, LiCoO₂, ...) et une électrode de graphite dont les cavités contiennent du lithium. Les deux électrodes sont séparées par un électrolyte. Ces batteries ne contiennent pas de polluant majeur, elles ont une masse faible mais leur coût est élevé. La charge de ces batteries est soumise à des règles strictes (contrôle de l'intensité du courant et de la tension) sous peine de risque d'inflammation ou d'explosion.

✦ La technologie lithium-métal-polymère est une batterie ne comportant que des solides, de faible masse et de coût élevé qui présente moins de risques d'explosion que la technologie Li-ion. On utilise une électrode d'oxyde de vanadium (polluant à recycler) et une électrode en lithium métallique. Les deux électrodes sont séparées par un électrolyte gélifié. Pour un fonctionnement optimal, l'électrolyte a besoin d'être maintenu à une température autour de 85°C . Lors de la charge, il est nécessaire de contrôler l'intensité du courant, la valeur de la tension et la température de la batterie.

Partie 1 : Besoin énergétique pour effectuer un trajet défini (5 points)

<p><i>Caractéristiques du véhicule :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Masse : $m = 1,2 \text{ t}$. • Coefficient de traînée : $C_x = 0,40$. • Aire de la surface frontale : $A = 2,1 \text{ m}^2$. • Coefficient de résistance au roulement : $C_R = 0,02$. 	<p>Force de traînée : $F_T = \frac{1}{2} \rho v^2 C_x A$</p> <p>Force de résistance au roulement : $F_R = m g C_R$</p>
<p><i>Données sur le trajet supposé rectiligne</i></p> <p>Longueur : $L = 100 \text{ km}$.</p> <p>Vitesse constante : $v = 90 \text{ km.h}^{-1}$.</p> <p>Consommation du véhicule sur le trajet : $4,5 \text{ L}$.</p>	<p><i>Données :</i></p> <p>Masse molaire de l'hydrogène : $M_H = 1,0 \text{ g.mol}^{-1}$;</p> <p>Masse molaire du carbone : $M_C = 12,0 \text{ g.mol}^{-1}$;</p> <p>Masse molaire de l'oxygène : $M_O = 16,0 \text{ g.mol}^{-1}$.</p> <p>Masse volumique de l'air : $\rho = 1,2 \text{ kg.m}^{-3}$;</p> <p>Accélération de la pesanteur : $g = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$;</p> <p>Masse volumique du gazole : 850 kg.m^{-3} ;</p> <p>Pouvoir calorifique du gazole : $\text{PCI} = 36 \text{ MJ.L}^{-1}$.</p> <p><i>On supposera que le gazole est composé d'un mélange d'hydrocarbures de formule brute générale C_xH_y et contient 86,5 % en masse de carbone.</i></p>

- 1.1. Calculer la somme de la force de traînée F_T et de la force de résistance au roulement F_R s'exerçant sur le véhicule.
- 1.2. Calculer le travail résistant de ces deux forces sur le trajet étudié.
- 1.3. Montrer que l'énergie nécessaire pour effectuer le trajet étudié est environ égale à 55 MJ.
- 1.4. Calculer l'énergie E_D fournie par la combustion complète du carburant diesel (gazole) sur le trajet étudié et en déduire le rendement global du véhicule hybride.
- 1.5. Un véhicule du même type qui réalise le même trajet sans système de récupération de l'énergie présente dans le véhicule hybride consomme 5,2 L de carburant diesel (gazole). Calculer le gain en émission de dioxyde de carbone CO_2 (exprimé en grammes de CO_2 par kilomètre) que procure le véhicule hybride.

Partie 2 : Étude énergétique de la motorisation électrique du véhicule hybride (7 points)

Données sur le moteur électrique :

Technologie du moteur	
Moteur synchrone triphasé à électronique de puissance intégrée, chargeur et fonction de générateur pour la récupération d'énergie.	
Grandeurs nominales du moteur synchrone triphasé	
Puissance mécanique utile	$P_u = 56 \text{ kW}$

Tension entre phases	$U = 360 \text{ V}$
Intensité du courant de ligne	$I = 120 \text{ A}$
Facteur de puissance	$\cos \varphi = 0,8$
Moment du couple moteur	$C_m = 135 \text{ N.m}$
Fréquence de rotation	$n = 4000 \text{ tr. min}^{-1}$

On rappelle que la puissance électrique absorbée par un récepteur triphasé se calcule à l'aide de la relation :

$$P_a = U I \sqrt{3} \cos \varphi .$$

2.1. Chaînes de conversion d'énergie

2.1.1. Quel est le type de conversion de l'énergie électrique effectuée par le chargeur ?

On se propose d'étudier le système énergétique que constitue le véhicule fonctionnant uniquement avec l'énergie électrique. On le considère alors comme comportant les sous-systèmes suivants : batterie, roues et trois convertisseurs (le moteur synchrone, le réducteur de vitesse et l'onduleur).

2.1.2. Compléter la chaîne énergétique sur le document réponse à rendre avec la copie, en précisant la place des trois convertisseurs ainsi que les formes d'énergie échangée entre chaque bloc.

2.2. Rendement du moteur synchrone

L'objectif est de déterminer le rendement du moteur en fonctionnement nominal à partir des données du moteur électrique.

2.2.1. Calculer la vitesse angulaire nominale Ω du moteur.

2.2.2. Calculer P_a , la puissance électrique nominale absorbée par le moteur.

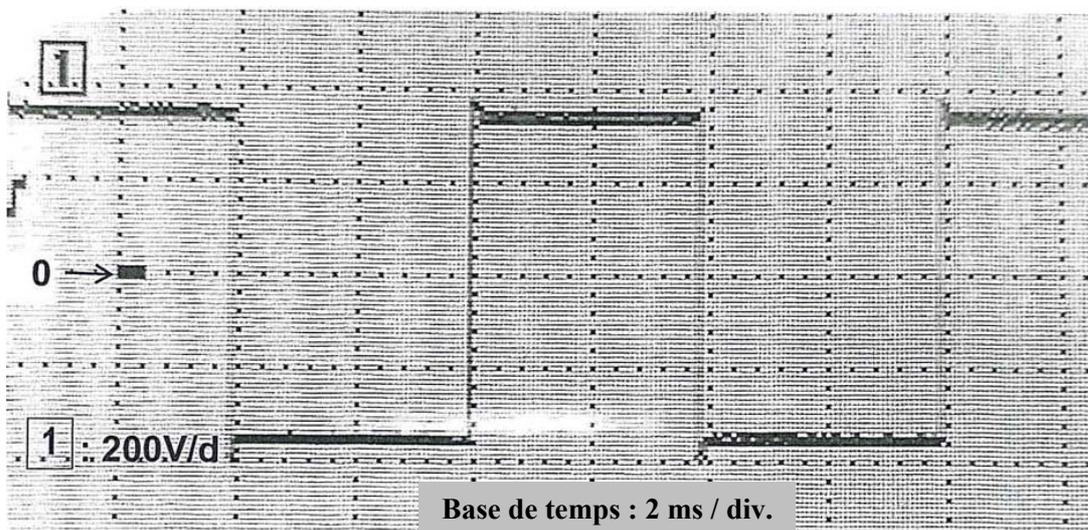
2.2.3. En déduire η , le rendement du moteur en fonctionnement au régime nominal.

2.3. Rendement global

Le réducteur ayant un rendement de 85 % et l'onduleur un rendement de 95 %, calculer le rendement global de la chaîne de conversion d'énergie entre la sortie de la batterie et l'arrivée sur les roues du véhicule.

2.4. Étude de l'onduleur

On visualise la tension fournie par l'onduleur sur l'écran d'un analyseur de réseau industriel et on observe le signal reproduit ci-dessous.

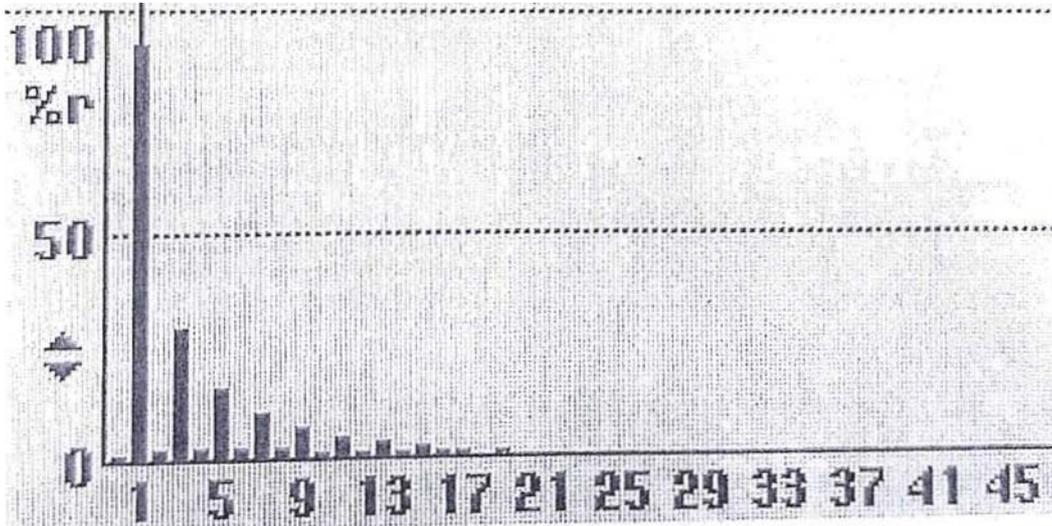


- 2.4.1. Déterminer \hat{U} , la valeur maximale de la tension fournie par l'onduleur.
- 2.4.2. Quelle est la valeur moyenne de cette tension ? Justifier votre réponse.
- 2.4.3. Déterminer la fréquence f de cette tension.

On visualise ensuite le spectre fréquentiel de la tension fournie par l'onduleur. La photographie de l'écran de l'appareil utilisé est reproduite ci-dessous.

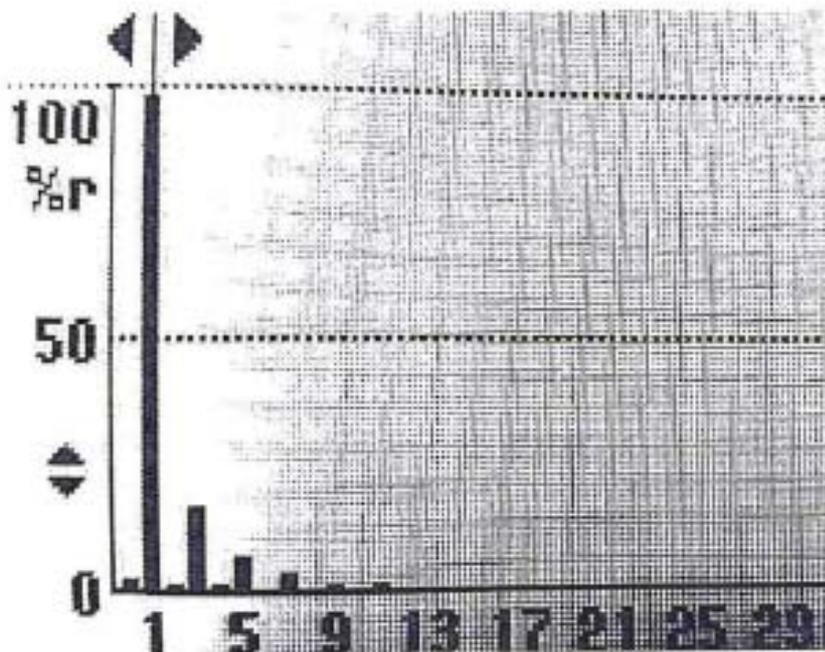
En ordonnée, on visualise l'amplitude relative de chaque harmonique.

En abscisse, est indiqué le rang de l'harmonique considéré.



- 2.4.4. Quelle est la valeur de la fréquence de la raie de rang 1 ? Comment appelle-t-on cette raie ?
- 2.4.5. L'allure du spectre permet-elle de confirmer la réponse à la question 2.4.2 ; ?

On place entre l'onduleur et le moteur synchrone un filtre passif, on visualise ensuite le spectre en fréquence de la tension délivrée aux bornes du moteur synchrone. la photographie de l'écran de l'appareil est reproduite ci-dessous.



2.4.6. Indiquer quel est l'effet du filtre sur la tension délivrée par l'onduleur. En déduire la nature de ce filtre (passe-bas, passe-haut, passe-bande ou coupe-bande).

Partie 3 : Étude des batteries (6 points)

3.1. Étude électrochimique de la batterie Li-ion

Le principe de fonctionnement en générateur de la batterie lithium-ion réside dans la circulation spontanée d'électrons dans le circuit électrique extérieur à la pile et connecté aux deux électrodes, générant ainsi un courant électrique, comme pour toute autre batterie. Ces électrons sont produits à une électrode et consommés à l'autre par des réactions électrochimiques.

Dans la batterie lithium-ion, la réaction sur l'électrode en graphite est modélisée de façon simplifiée par l'équation de réaction suivante : $\text{Li} \rightarrow \text{Li}^+ + \text{e}^-$.

Données concernant la batterie :

- Batterie composée de 96 éléments en série ;
- Capacité utile : 12 kWh ;
- Tension électrique nominale : $U_0 = 360 \text{ V}$.

3.1.1. Déterminer la polarité de l'électrode en graphite. S'agit-il de l'anode ou de la cathode de la batterie fonctionnant en générateur ? Justifier votre réponse.

3.1.2. En supposant que la charge s'effectue à l'aide d'un convertisseur avec un rendement de 85 %, quelle serait la durée nécessaire pour recharger entièrement la batterie avec une prise domestique délivrant un courant d'intensité 16 A sous une tension de 230 V ?

Quelles contraintes représente cette opération par rapport à une voiture à moteur thermique ?

3.1.3. A partir du document et des réponses aux questions précédentes, montrer, dans une synthèse de quelques lignes, que la batterie Li-ion est, à l'heure actuelle, un bon compromis dans les voitures électriques.

3.2. Encombrement des batteries

Un constructeur d'automobiles souhaite offrir le même modèle en deux options :

- un véhicule dit « hybride » qui ne peut parcourir que deux ou trois kilomètres en fonctionnant uniquement avec le moteur électrique ;
- un véhicule dit « hybride rechargeable » (Plug-in Hybrid), alimenté par une batterie de plus grande capacité que celle installée sur les hybrides « conventionnels » et qui peut parcourir en tout électrique des distances de l'ordre de 40 à 80 kilomètres.

Caractéristiques du véhicule dit « hybride » :

Volume du coffre : 420 litres

« Poids » à vide : 1285 kg

Charge utile : 620 kg.

Ce véhicule hybride conventionnel est équipé d'une batterie lithium-ion de capacité utile de 1,2 kWh. Le constructeur souhaite faire évoluer ce modèle en véhicule « hybride rechargeable » équipé d'une batterie de type Li-ion de capacité utile de 12 kWh.

3.2.1. Déterminer l'augmentation de la masse m_B et le volume V_B du pack batterie nécessaire.

3.2.2. Le pack batterie sera installé dans le coffre. Déterminer le pourcentage volumique de la réduction du coffre.

Partie 4 : Synthèse : avantages et inconvénients des véhicules hybrides rechargeables (2 points)

En utilisant les différents documents, les résultats obtenus dans les différentes parties ainsi que vos connaissances, rédiger un texte d'une dizaine de lignes, destiné à un client potentiel, présentant les avantages et les inconvénients d'une voiture hybride rechargeable comparée à une voiture tout diesel.

Document réponse
Chaîne énergétique

