

**BREVET DE TECHNICIEN SUPÉRIEUR EN  
ÉLECTROTECHNIQUE**

**E4 - Physique Appliquée  
à l'électrotechnique**

*Durée : 4 heures*

*coefficient : 3*

**Calculatrice autorisée**

# Véhicule hybride

## Présentation

Technologiquement, le véhicule hybride peut être considéré comme une amélioration du véhicule électrique, ce dernier ayant les inconvénients majeurs d'une faible autonomie et de performances limitées.

Le principe d'un véhicule hybride est représenté figure 1.

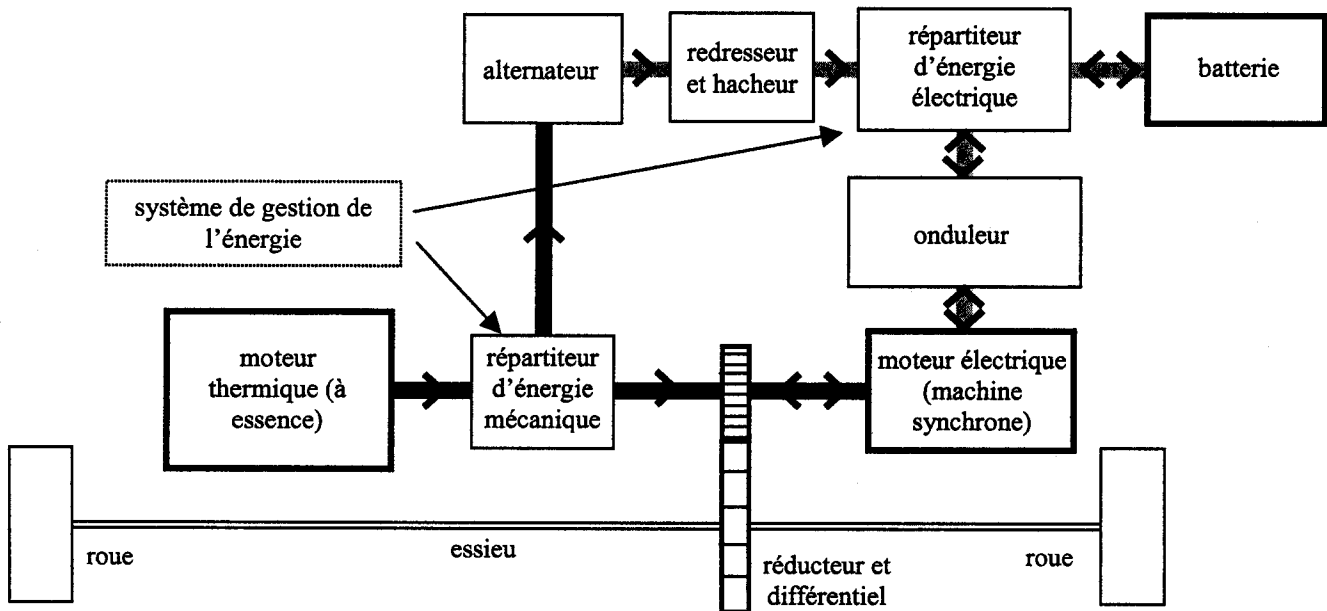


Figure 1

Il est caractérisé par une double propulsion thermique et électrique. Les roues du véhicule peuvent être entraînées soit par le *moteur électrique*, soit par le *moteur thermique*, ou bien par les deux simultanément. Un système de gestion d'énergie choisit ponctuellement la meilleure méthode à utiliser.

Dans les conditions favorables, la charge de la batterie est assurée par le moteur thermique par l'intermédiaire d'un alternateur, ou par le moteur électrique qui peut fonctionner en récupération lors des descentes ou des décélérations. Ceci assure au véhicule une totale autonomie du point de vue électrique.

Le problème est composé de trois parties indépendantes :

- partie A : la machine synchrone
- partie B : l'onduleur
- partie C : la propulsion électrique du véhicule

**Remarque :** Les grandeurs complexes représentatives des grandeurs sinusoïdales  $e(t)$ ,  $i(t)$ ,  $v(t)$  sont notées  $\underline{E}$ ,  $\underline{I}$ ,  $\underline{V}$ .

## PARTIE A : LA MACHINE SYNCHRONE

### A1) Les caractéristiques de la machine synchrone

La propulsion électrique est assurée par une machine synchrone triphasée à aimants permanents, alimentée par un système de tensions triphasées de fréquence variable. Elle est considérée non saturée et sans pertes : en particulier, les résistances statoriques sont supposées négligeables.

Pour une fréquence d'alimentation  $f = 50\text{Hz}$  et une tension nominale aux bornes d'une phase  $V_n = 140\text{V}$ , le constructeur indique une fréquence de rotation  $n = 750\text{tr.min}^{-1}$  et une puissance apparente  $S_n = 30\text{kVA}$ .

On représente (figure 2) le schéma équivalent en régime sinusoïdal d'une phase de l'induit (couplé en étoile) de la machine synchrone où  $e(t)$  est la f.é.m,  $X_s = L_s \cdot \omega$  la réactance synchrone,  $i(t)$  l'intensité du courant d'induit et  $v(t)$  la tension aux bornes d'un enroulement.

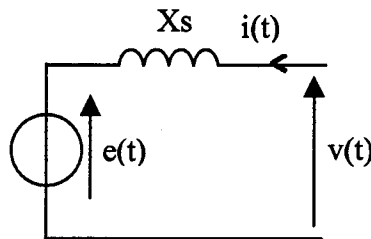


Figure 2

On note  $\psi$  le déphasage entre l'intensité  $i(t)$  et la f.é.m  $e(t)$ .

On rappelle que l'angle  $\psi$  est mesuré négativement lorsque  $i(t)$  est en avance sur  $e(t)$ .

La valeur efficace  $E$  des f.é.m à vide est proportionnelle à la fréquence de rotation  $n$  du rotor :

$$E = k_E \cdot n \text{ avec } k_E = 0,28 \text{ V.min.tr}^{-1}$$

A1.1) Calculer le nombre de pôles de la machine synchrone.

A1.2) Calculer la valeur efficace  $I_n$  du courant nominal d'induit.

A1.3) Sachant que l'inductance cyclique a pour valeur  $L_s = 7,2\text{mH}$ , montrer que la réactance synchrone  $X_s$  de la machine s'exprime en fonction de la fréquence de rotation  $n$  du rotor par la relation :

$$X_s = k_X \cdot n \text{ avec } k_X = 3,0 \cdot 10^{-3} \text{ } \Omega \cdot \text{min.tr}^{-1}$$

A1.4) Exprimer la puissance  $P$  absorbée par la machine synchrone en fonction de  $E$ ,  $I$  et l'angle  $\psi$ . Montrer que l'expression du moment du couple électromagnétique  $T$  est :

$$T = k_T \cdot I \cdot \cos\psi \text{ avec } k_T = 8,0 \text{ N.m.A}^{-1}$$

**A2) Fonctionnement en moteur « à couple constant » (de  $n = 0$  à  $n = 400$  tr.min<sup>-1</sup>)**

Dans ce mode de fonctionnement, l'angle  $\psi$  est maintenu constant :  $\psi = 0$ .

La tension d'alimentation  $V$  peut varier entre 0 et  $V_n = 140V$ .

On considère le point de fonctionnement correspondant au point A de la caractéristique  $T(n)$  (figure 5 du document réponse) pour lequel le couple développé est égal au couple nominal  $T_n = 570N.m$ , la fréquence de rotation du moteur est imposée par la commande et vaut  $n = 400$  tr.min<sup>-1</sup>.

Le schéma électrique équivalent à une phase du moteur synchrone est représenté figure 2. On souhaite déterminer la tension d'alimentation permettant d'obtenir ce point de fonctionnement.

On rappelle pour cela les équations caractéristiques du moteur synchrone :

$$E = k_E \cdot n \text{ avec } k_E = 0,28 \text{ V} \cdot \text{min} \cdot \text{tr}^{-1}$$

$$X_s = k_X \cdot n \text{ avec } k_X = 3,0 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{min} \cdot \text{tr}^{-1}$$

$$T = k_T \cdot I \cdot \cos\psi \text{ avec } k_T = 8,0 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$$

A2.1) Calculer l'intensité efficace  $I$  du courant absorbé par une phase du moteur.

A2.2) Calculer la f.é.m  $E$  et le produit  $X_s \cdot I$ .

A2.3) Représenter sur la figure 6 du document réponse, le diagramme vectoriel faisant apparaître les vecteurs représentatifs de  $\underline{E}$  et  $jX_s I$  (échelle : 1cm pour 10V). En déduire le vecteur représentatif de  $\underline{V}$  et la valeur efficace  $V$ .

**A3) Fonctionnement en moteur « en mode défluxage » (à partir de  $n = 400$  tr.min<sup>-1</sup>)**

Dans ce mode, la tension  $V$  est constante et égale à  $V_n = 140V$ . Le fonctionnement en survitesse est obtenu par défluxage. La machine étant à aimants permanents, le défluxage est réalisé en faisant varier la valeur de l'angle  $\psi$  réglable entre 0 et  $-90^\circ$ . Le schéma électrique équivalent à une phase du moteur synchrone est représenté figure 2.

On souhaite entraîner le moteur à la fréquence de rotation  $n=1000$  tr.min<sup>-1</sup>, l'intensité du courant étant limitée à  $I = I_n = 71$  A.

A3.1) Calculer la f.é.m.  $E$  et le produit  $X_s \cdot I$  correspondant à ce point de fonctionnement.

A3.2) Représenter sur la figure 7 du document réponse, le diagramme vectoriel faisant apparaître les vecteurs représentatifs de  $\underline{E}$ ,  $jX_s I$  et  $\underline{V}$  (échelle : 1cm pour 20V).

A3.3) Indiquer le sens et la direction du vecteur représentatif du courant  $\underline{I}$  sur le même diagramme. En déduire la valeur de  $\psi$ .

A3.4) Calculer le couple  $T$  disponible à la fréquence de rotation  $n = 1000 \text{ tr.min}^{-1}$  et représenter le point B correspondant sur la caractéristique  $T(n)$  de la figure 5 du document réponse.

## PARTIE B : L'ONDULEUR

Comme le montre la figure 3, la machine synchrone est alimentée par un onduleur de tension à modulation de largeur d'impulsions (MLI) constitué de six interrupteurs à semi-conducteurs  $K1, K'1, K2, K'2, K3, K'3$ .

Il permet de faire varier la fréquence et la valeur efficace  $V_f$  du fondamental des tensions  $v_1(t), v_2(t), v_3(t)$  appliquées aux bornes des enroulements de la machine synchrone.

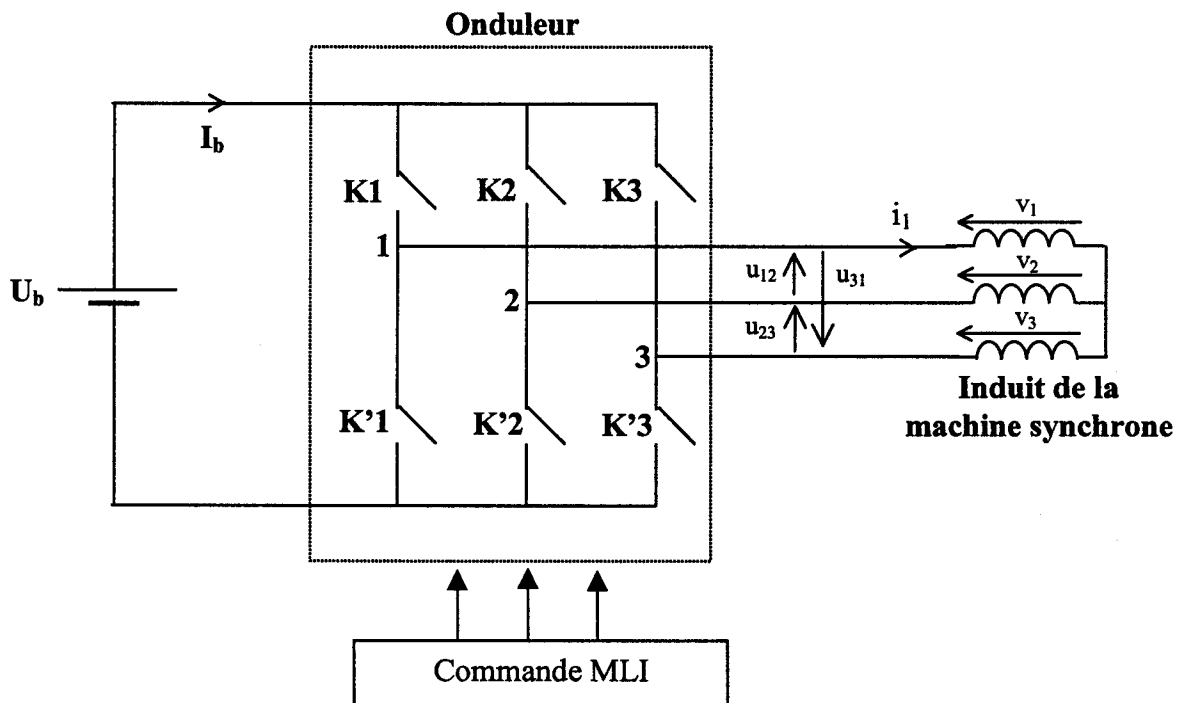


Figure 3

Cette valeur efficace  $V_f$  peut varier entre 0V et la valeur nominale  $V_n = 140V$ . Cette valeur nominale  $V_n$  est obtenue lorsqu'on tend vers la commande « pleine onde » pour laquelle les interrupteurs sont sollicités une fois par période. C'est ce mode de commande que l'on considère dans cette partie B.

## B1) L'évolution des tensions

L'état des interrupteurs a été représenté en commande « pleine onde », pour une période  $T$  de fonctionnement, sur la figure 8 du document réponse. Les commandes des interrupteurs situés sur un même bras de l'onduleur sont complémentaires : autrement dit, si  $K_1$  est fermé, alors  $K'1$  est ouvert.

**B1.1)** Tracer l'évolution des tensions composées  $u_{12}(t)$  et  $u_{31}(t)$  sur la figure 8 du document-réponse.

**B1.2)** Sachant que  $v_1(t) + v_2(t) + v_3(t) = 0$ , montrer que la tension  $v_1(t)$  aux bornes de la phase 1 de la machine peut s'exprimer de la façon suivante :

$$v_1(t) = \frac{1}{3} \cdot [u_{12}(t) - u_{31}(t)]$$

**B1.3)** En déduire le tracé de la tension  $v_1(t)$  sur la figure 8 du document réponse.

**B1.4)** Exprimer la valeur efficace  $V$  de  $v_1(t)$  en fonction de  $U_b$ .

**B1.5)** La valeur efficace  $V_f$  du fondamental de  $v_1(t)$  s'exprime sous la forme :

$$V_f = 0,95 \cdot V$$

Exprimer  $V_f$  en fonction de  $U_b$ . Calculer  $U_b$  afin d'obtenir  $V_f = V_n = 140V$ .

**B1.6)** Tracer sur la figure 8 du document réponse, l'évolution du fondamental de  $v_1(t)$  en fonction du temps.

## B2) L'état des interrupteurs

On suppose que les courants dans les enroulements de la machine sont sinusoïdaux.

On envisage le cas où le courant d'intensité  $i_1(t)$  dans la phase n°1 de la machine est en avance de  $30^\circ$  par rapport à la tension simple  $v_1(t)$ , et où son amplitude vaut 20A.

**B2.1)** Tracer dans ces conditions, sur la figure 8 du document réponse, l'évolution de l'intensité  $i_1(t)$ .

**B2.2)** Les interrupteurs  $K_i$  sont constitués d'un IGBT  $T_i$  et d'une diode  $D_i$  (figure 4). Préciser sur la figure 8 du document réponse les intervalles de conduction des semi-conducteurs  $T_1, D_1, T'_1, D'_1$ .



**Figure 4**

## **PARTIE C : LA PROPULSION ELECTRIQUE DU VEHICULE**

On rappelle l'expression du couple électromagnétique  $T$  développé par la machine synchrone

$$T = k_T \cdot I \cdot \cos\psi \text{ avec } k_T = 8,0 \text{ N.m.A}^{-1}$$

### **C1) Étude mécanique du véhicule**

Le rapport de la transmission qui relie le moteur électrique et les roues a été choisi de telle sorte que le véhicule se déplace à la vitesse  $v = 40 \text{ km.h}^{-1}$  lorsque le moteur électrique tourne à la fréquence de rotation  $n = 400 \text{ tr.min}^{-1}$ .

**C1.1)** Exprimer la vitesse  $v = 40 \text{ km.h}^{-1}$  en  $\text{m.s}^{-1}$ . En déduire le rapport de transmission  $R_t$  défini de la façon suivante:

$$R_t = \frac{v}{n}$$

$v$  est exprimée en  $\text{m.s}^{-1}$  et  $n$  en  $\text{tr.min}^{-1}$

**C1.2)** La puissance mécanique  $P = T \cdot \Omega$  produite par le moteur est intégralement transformée en puissance motrice  $P = F \cdot v$  ( $F$  est la force de traction exprimée en Newton et  $v$  la vitesse de déplacement du véhicule exprimée en  $\text{m.s}^{-1}$ ). Montrer que la force de traction  $F$  a pour expression :

$$F = 3,77 \cdot T$$

$F$  exprimée en N,  $T$  en N.m

## C2) Fonctionnement à vitesse stabilisée

On s'intéresse à un fonctionnement à vitesse stabilisée  $v = 40\text{km.h}^{-1}$ . Pour ce fonctionnement à faible vitesse seul le moteur électrique est sollicité. Il fonctionne alors « à couple constant » ( $\psi=0$ ). Les forces s'opposant au mouvement valent  $F_r = 320\text{N}$ .

**C2.1)** Calculer le couple électromagnétique  $T$  développé par la machine synchrone et la valeur efficace  $I$  du courant d'induit.

**C2.2)** Calculer la puissance mécanique développée par la machine synchrone.

**C2.3)** Calculer la valeur moyenne  $I_b$  du courant délivré par la batterie si celle-ci délivre une tension  $U_b=312\text{V}$ . Les interrupteurs de l'onduleur sont supposés parfaits et les pertes du moteur électrique négligées.

**C2.4)** La tension d'alimentation  $U_b=312\text{V}$  est délivrée par une batterie d'éléments NiMH (Nickel-Métal-Hydrure) en série de  $1,2\text{V}$  chacun. Calculer le nombre d'éléments mis en série.

**C2.5)** La batterie ayant une capacité totale de  $6,5\text{Ah}$ , calculer l'autonomie horaire théorique du véhicule en supposant qu'il se déplace à vitesse stabilisée  $v = 40\text{km.h}^{-1}$ . Quelles remarques vous inspire le résultat obtenu ?



### **C3) Bilan énergétique**

Les schémas de la figure 9 et de la figure 10 du document réponse illustrent le fonctionnement simplifié, du point de vue énergétique, du système de propulsion hybride ainsi que celui d'un système classique, et ce pour un même parcours moyen de 100 km.

Le système hybride présente les avantages suivants :

- grâce au répartiteur de puissance, le moteur thermique fonctionne uniquement sur sa plage de rendement la plus favorable (ainsi, lorsque la voiture effectue un *départ arrêté* ou lorsqu'elle roule à *faible vitesse*, le groupe thermique est coupé et le moteur électrique entraîne seul les roues).
- en décélération ou en freinage, le moteur électrique devient générateur et recharge la batterie. Le système fonctionne alors en récupération d'énergie.

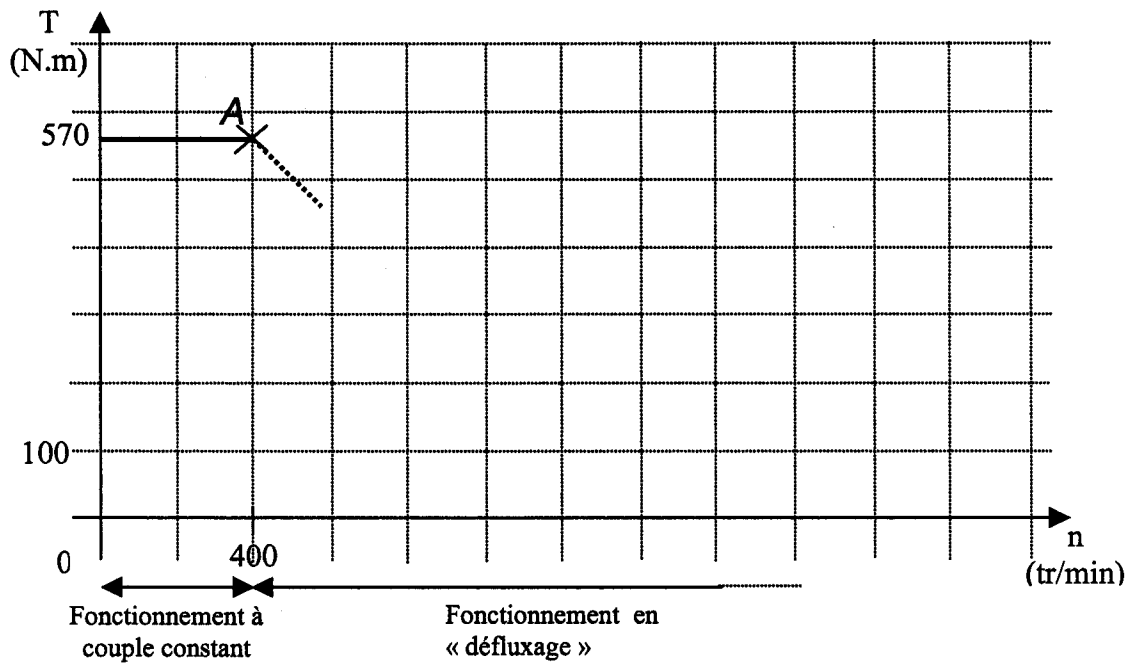
**C3.1)** Compléter le schéma de la figure 9 du document réponse en calculant les valeurs des énergies inconnues.

**C3.2)** Compléter le schéma de la figure 10 du document réponse en calculant les valeurs des énergies inconnues.

**C3.3)** Sachant qu'un litre d'essence peut fournir une énergie de 10 kWh, calculer la consommation d'essence des deux types de véhicules, sur un parcours moyen de 100km.

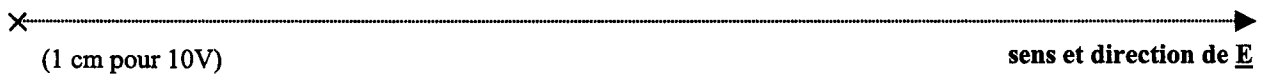
**C3.4)** Le constructeur indique que la voiture hybride permet une économie d'essence de 30% par rapport à une voiture classique de puissance similaire. Pouvez-vous confirmer cette affirmation ?

**Document réponse**  
**(à remettre avec la copie)**

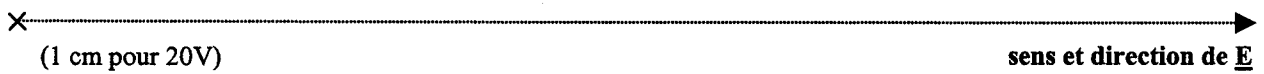


**Figure 5:**  
**Caractéristique  $T(n)$  du couple de la machine synchrone**

**Document réponse**  
**(à remettre avec la copie)**

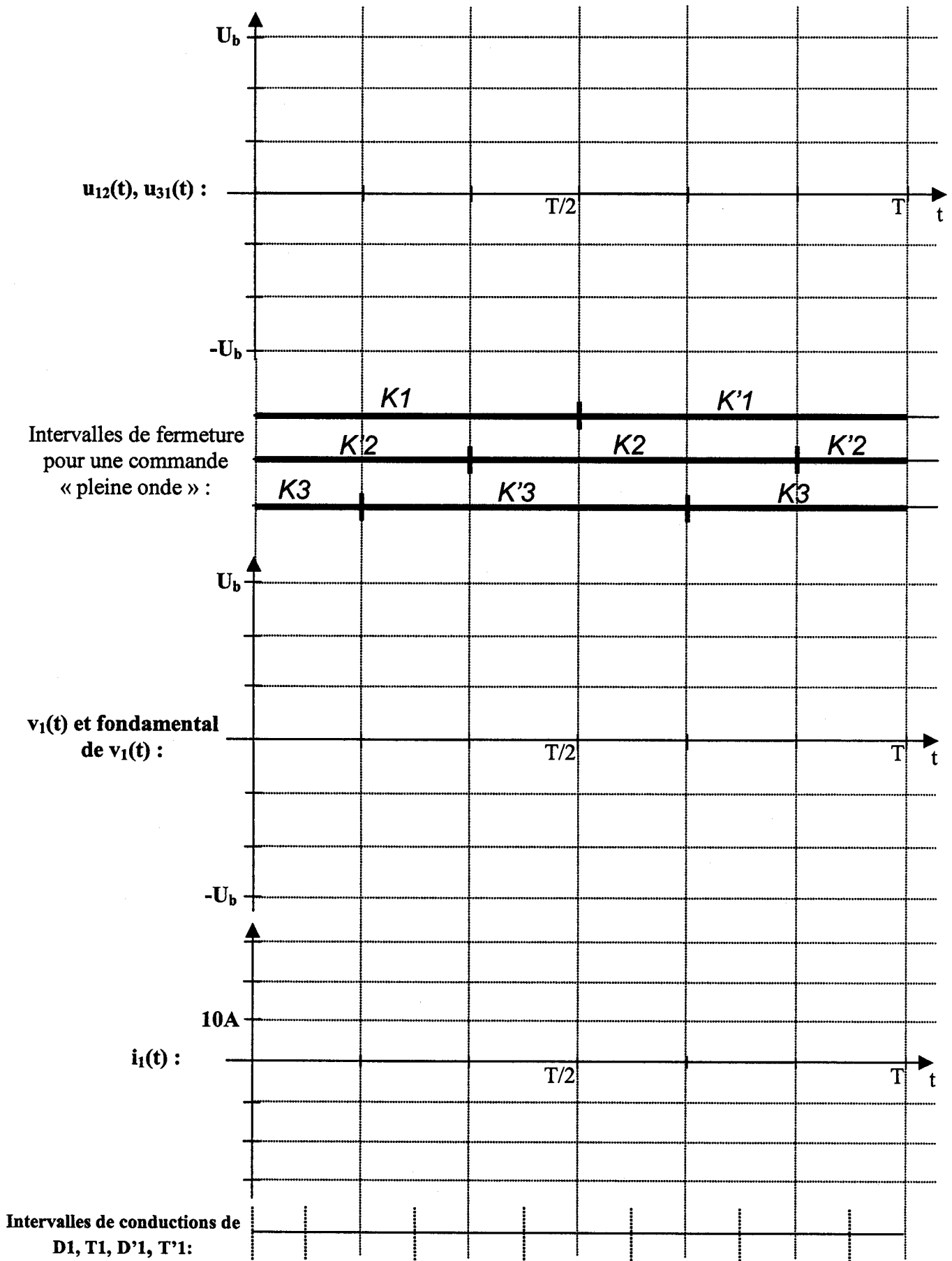


**Figure 6**



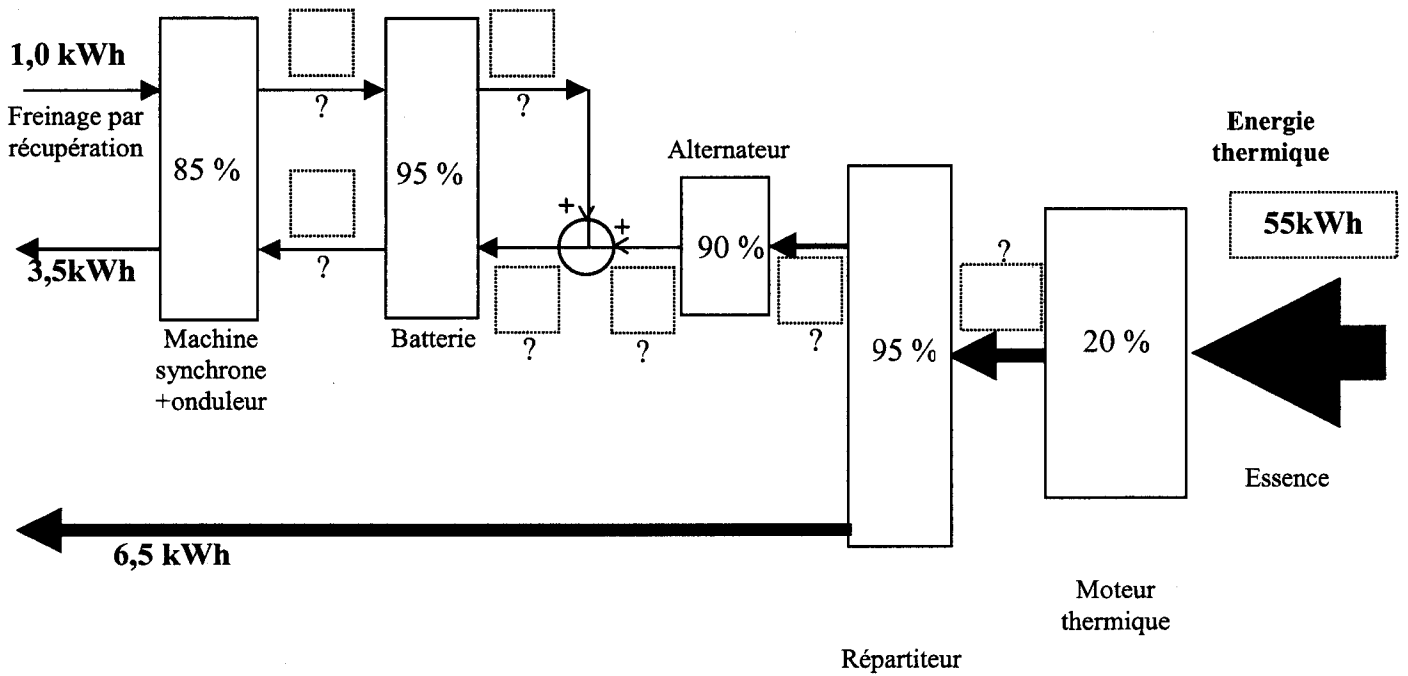
**Figure 7**

**Document réponse**  
**(à remettre avec la copie)**

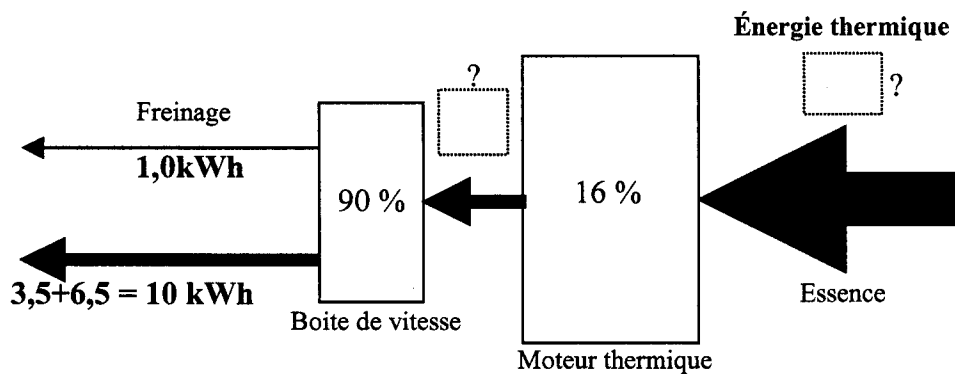


**figure 8**

**Document réponse**  
**(à remettre avec la copie)**



**Figure 9 :**  
**flux énergétique correspondant à un parcours moyen de 100 km pour le système de propulsion électrique hybride**  
**(les pourcentages indiqués correspondent aux différents rendements)**



**Figure 10 :**  
**flux énergétique correspondant à un parcours moyen de 100 km pour un système à propulsion thermique classique**  
**(les pourcentages indiqués correspondent aux différents rendements)**