

**BREVET DE TECHNICIEN SUPÉRIEUR  
ÉLECTROTECHNIQUE**

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

**Durée : 4 heures**

**coefficient : 3**

**Calculatrice autorisée**

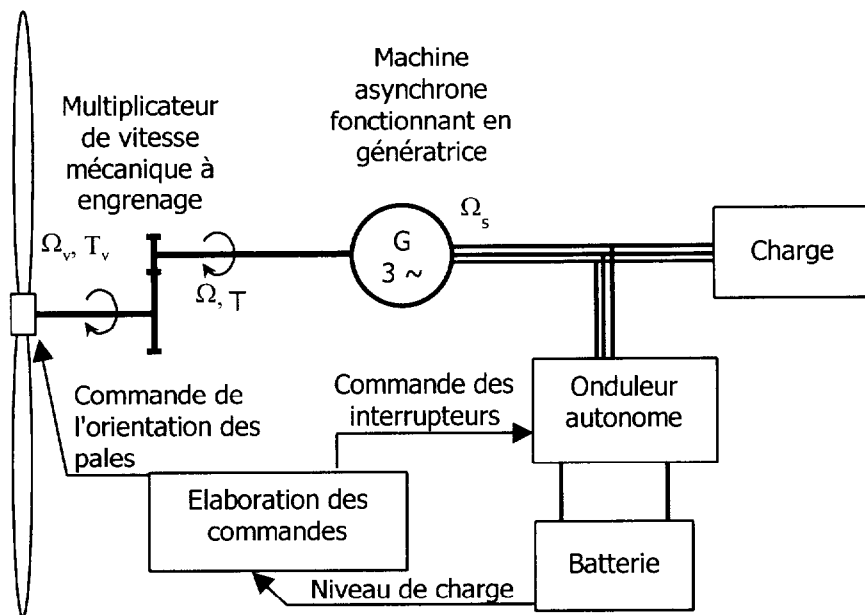
# Production d'électricité avec une éolienne

*Ce problème est constitué de 4 parties indépendantes.*

*Pour les grandeurs électriques, les lettres minuscules représentent les grandeurs instantanées, les lettres majuscules représentent les grandeurs efficaces ou continues.*

## Présentation

Une éolienne de puissance nominale 300 kW alimente un site isolé (une île) en électricité. Son rotor équipé de trois pales longues de 15 m est situé à l'extrémité d'un mât haut de 40 m. Elle peut fournir sa puissance nominale quand la vitesse du vent est comprise entre 50 km/h et 80 km/h ce qui est souvent le cas sur ce site.



**figure 1**

Les pales de l'éolienne mises en mouvement par le vent entraînent le rotor d'une machine asynchrone par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse à engrenage.

Les enroulements du stator de la machine asynchrone sont soumis à un système triphasé de tensions produit par un onduleur autonome alimenté par une batterie. L'onduleur impose donc la fréquence de synchronisme de la machine.

L'énergie électrique absorbée par la charge est fournie par la machine asynchrone qui fonctionne en génératrice quand le couple exercé par le vent sur les pales du rotor suffit.

La vitesse de rotation des pales  $\Omega_v$  est imposée par la machine asynchrone au glissement près.

Le couple  $T_v$  exercé par les pales sur l'axe du rotor dépend de la vitesse du vent. Un système de contrôle l'ajuste en fonction des besoins en puissance en agissant sur l'orientation des pales.

Dans le cas où la vitesse du vent est insuffisante, la batterie prend le relais de la génératrice pour assurer la continuité de service.

L'onduleur doit être réversible en courant pour que la batterie puisse être rechargée.

## - Partie A - Etude de la machine asynchrone fonctionnant en moteur

Il s'agit uniquement dans cette partie d'élaborer le schéma électrique équivalent d'une phase de la machine asynchrone *en fonctionnement en moteur* à partir des informations délivrées par le constructeur.

### Caractéristiques nominales du moteur

- 4 pôles ( $p = 2$ ), rotor à cage
- alimentation 230 V / 400 V – 50 Hz
- puissance utile nominale :  $P_u = 300$  kW
- vitesse nominale  $N = 1485$  tr.min<sup>-1</sup>
- rendement nominal  $\eta = 96$  %
- les pertes mécaniques sont supposées constantes et égales à  $p_m = 1,0$  kW.
- les pertes fer rotoriques et les pertes Joule statoriques sont négligées.

### A.1 - Questions préliminaires

**A.1.1** - Calculer la vitesse de synchronisme quand la machine est alimentée par le réseau 50 Hz. Exprimer cette grandeur en rad.s<sup>-1</sup>, (notée  $\Omega_s$ ), puis en tr. min<sup>-1</sup>, (notée  $N_s$ ).

En déduire la valeur nominale du glissement.

**A.1.2** - Compléter le diagramme des puissances sur le *document réponse n°1* en faisant apparaître les puissances ci-dessous :

- |                                      |                               |
|--------------------------------------|-------------------------------|
| - Puissance utile.....               | $P_u = T_u \cdot \Omega$      |
| - Puissance transmise au rotor ..... | $P_{tr} = T_e \cdot \Omega_s$ |
| - Puissance mécanique.....           | $P_M = T_e \cdot \Omega$      |
| - Puissance absorbée.....            | $P_{abs}$                     |
| - Pertes joule dans le rotor.....    | $p_{jr}$                      |
| - Pertes mécaniques .....            | $p_m$                         |
| - Pertes fer statoriques.....        | $p_f$                         |

### A.2 - Calcul des couples nominaux

**A.2.1** - Calculer le moment du couple utile nominal  $T_u$  .

**A.2.2** - Calculer le moment du couple de pertes mécaniques  $T_m$  .

**A.2.3** - Calculer le moment du couple électromagnétique nominal  $T_e$  .

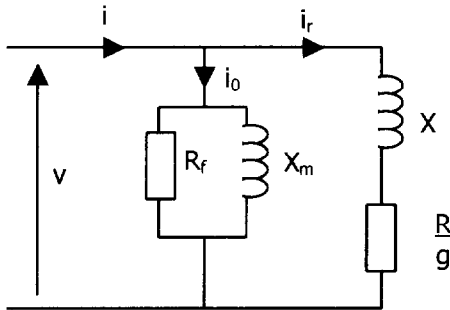
### A.3 - Calcul des puissances nominales

**A.3.1** - Calculer la puissance nominale transmise au rotor  $P_{tr}$ . En déduire les pertes par effet Joule au rotor  $p_{jr}$ .

**A.3.2** - Calculer la puissance active absorbée par le moteur  $P_{abs}$ . En déduire les pertes fer  $p_f$ .

#### A.4 - Modèle électrique équivalent d'une phase de la machine asynchrone

On admet qu'on peut modéliser chaque phase de la machine asynchrone fonctionnant en moteur par le schéma électrique suivant.



$R_f$  modélise les pertes fer  
 $X_m$  est la réactance magnétisante du stator  
 $R$  est la résistance du rotor ramenée au stator  
 $X$  est la réactance totale de fuite vue du stator  
 $g$  est le glissement

**figure 2**

$v$  est une tension simple du réseau de valeur efficace  $V = 230$  V et de fréquence 50 Hz.

$i$  est l'intensité du courant de ligne ;  $i_r$  est l'intensité du courant rotorique ramené au stator.

**Dans la suite du problème, on prendra les valeurs approchées suivantes :**

$$R_f = 19 \, \Omega \quad X_m = 1,3 \, \Omega \quad X = 0,13 \, \Omega \quad R = 5,0 \, m\Omega$$

On se propose de vérifier la cohérence de ces valeurs avec les résultats obtenus précédemment.

**A.4.1** - Exprimer les pertes fer statoriques  $p_f$  en fonction de  $R_f$  et  $V$ . En déduire la valeur de  $R_f$ .

**A.4.2** - Exprimer la valeur efficace  $I_r$  du courant  $i_r$  en fonction de  $V$ ,  $X$ ,  $R$  et  $g$ . Donner sa valeur numérique pour  $g = 1\%$ .

**A.4.3** - La puissance nominale transmise au rotor  $P_{tr}$  a pour expression  $P_{tr} = 3 \frac{R}{g} I_r^2$ .

Calculer la valeur de  $P_{tr}$  pour  $g = 1\%$ . Comparer avec la valeur calculée en A.3.1. .

## - Partie B - Machine fonctionnant en génératrice hypersynchrone

Le stator de la machine asynchrone est alimenté par un système triphasé de tensions 230 V / 400 V – 50 Hz.

Le rotor est entraîné en rotation par les pales de l'éolienne par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse mécanique dont le **rapport de multiplication m est égal à 35**.

### Conventions de signe

On conserve les conventions de signes représentées sur le schéma (figure 2) du modèle équivalent par phase de la machine (convention récepteur).

Quand l'éolienne fonctionne normalement, **la machine fonctionne en génératrice** : elle fournit de la puissance active qui prend alors une valeur négative.

Les vitesses de rotation restant positives, **les moments des couples deviennent négatifs**.

### **B.1 - Vitesse et glissement en condition nominale**

Dans les conditions de fonctionnement nominal, la vitesse de rotation des pales est  $N_v = 43,3 \text{ tr.min}^{-1}$ .

**B.1.1** - Déterminer la vitesse de rotation  $N$  du rotor de la machine asynchrone.

**B.1.2** - En déduire la valeur du glissement  $g$ . Justifier l'appellation génératrice hypersynchrone.

### **B.2 - Caractéristique couple – vitesse de la machine**

**B.2.1** - On rappelle deux expressions de la puissance transmise au rotor :

$$P_{tr} = T_e \cdot \Omega_s \quad \text{et} \quad P_{tr} = 3 \frac{R}{g} \cdot I_r^2$$

Quand le glissement est très faible ( $g \ll 1$ ), on peut faire l'approximation:  $I_r \cong \frac{gV}{R}$

En déduire une expression approchée du couple électromagnétique  $T_e$  en fonction de  $\Omega$ ,  $\Omega_s$ ,  $V$  et  $R$ .

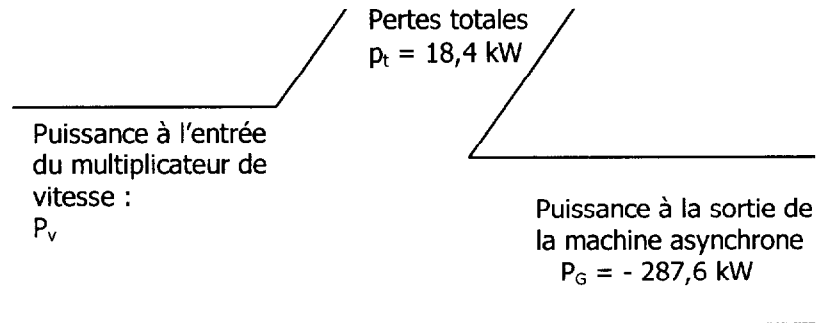
Calculer la valeur numérique de  $T_e$  pour les valeurs suivantes de  $\Omega$  :  $0,99 \Omega_s$  ;  $\Omega_s$  ;  $1,01 \Omega_s$ .

**B.2.2** - La caractéristique couple vitesse est tracée sur le **document réponse n°1**. Tracer sur le même graphique la caractéristique approchée valable quand  $g \ll 1$ .

**B.2.3** - Repérer sur cette courbe par une croix, le point correspondant aux conditions de fonctionnement nominal de l'éolienne.

### B.3 - Application

Le bilan des puissances pour l'ensemble constitué du multiplicateur de vitesse et de la machine asynchrone, obtenu à l'occasion d'un essai, a donné :



**figure 3**

- B.3.1** - Calculer la puissance  $P_v$  à l'entrée du multiplicateur de vitesse.
- B.3.2** - Montrer, en utilisant les relations fournies en B.2.1 que le glissement a pour expression approchée :  $g \cong \frac{T_e \Omega_s R}{3.V^2}$ .
- En déduire une valeur approchée du glissement sachant que  $T_e = -1882 \text{ N.m}$ .
- B.3.3** - Montrer que la valeur efficace  $I_r$  de  $i_r$  est voisine de 428 A.
- B.3.4** - Donner l'expression de la puissance réactive  $Q_G$  consommée par la machine asynchrone en fonction de  $V$ ,  $I_r$ ,  $X_m$  et  $X$ . Donner sa valeur numérique.
- B.3.5** - Calculer la puissance apparente  $S_G$  mise en jeu dans la machine. En déduire le facteur de puissance de l'installation.
- B.3.6** - Quelle solution technologique permettrait d'améliorer ce facteur de puissance ?

## - Partie C - Etude de l'onduleur

L'onduleur comprend 6 cellules constituées d'un IGBT et d'une diode.

Les IGBT sont considérés comme des interrupteurs parfaits unidirectionnels commandés à l'ouverture et à la fermeture.

Les diodes sont supposées parfaites (tension nulle à leurs bornes quand elles sont passantes).

On assimile la batterie à une source idéale de tension de f.é.m.  $E_B$ .

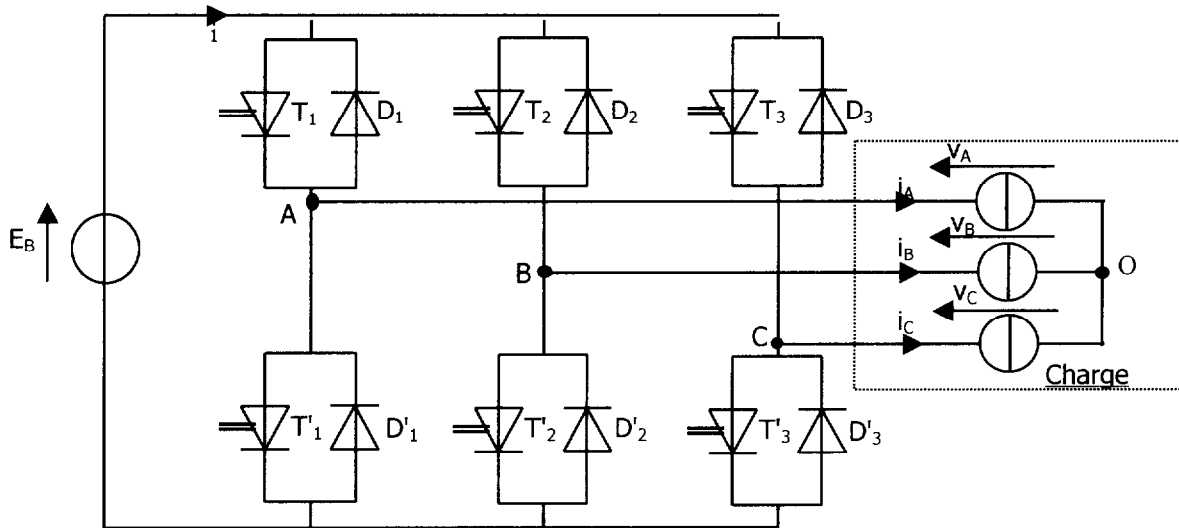


figure 4

### C.1 - Tensions délivrées par l'onduleur

Les séquences de commande des interrupteurs sont données sur le **document réponse n°2**.

**C.1.1** - Les interrupteurs présents sur un même bras de l'onduleur peuvent-ils être commandés simultanément à la fermeture ? Justifier la réponse.

**C.1.2** - Tracer sur le **document réponse n°2**, les chronogrammes des tensions composées  $u_{AB}$ ,  $u_{BC}$  et  $u_{CA}$ .

**C.1.3** - On rappelle que les tensions simples aux bornes de la charge ont pour expressions respectives :

$$v_A = \frac{u_{AB} - u_{CA}}{3} \quad v_B = \frac{u_{BC} - u_{AB}}{3} \quad v_C = \frac{u_{CA} - u_{BC}}{3}$$

Construire les chronogrammes des tensions simples  $v_A$ ,  $v_B$  et  $v_C$  sur le **document réponse n°2**.

**C.1.4** - Tracer l'allure des termes fondamentaux  $v_{A1}$ ,  $v_{B1}$  et  $v_{C1}$  de  $v_A$ ,  $v_B$  et  $v_C$  sur le **document réponse n°2**.

**C.1.5** - La valeur efficace du fondamental des tensions simples a pour expression :

$$V_{A1} = V_{B1} = V_{C1} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} E_B$$

En déduire la valeur de la f.é.m.  $E_B$  que doit délivrer la batterie pour que le fondamental des tensions simples ait pour valeur efficace 230 V.

**C.2 - L'onduleur alimente la charge seule (quand l'éolienne ne fonctionne pas)**

**On néglige dans cette partie les harmoniques du courant absorbé par chaque phase de la charge devant le fondamental.**

Chaque élément de la charge peut être modélisé par une source de courant sinusoïdal de valeur efficace  $I_1$  en retard de  $\varphi_1$  par rapport à la tension à ses bornes.

Les chronogrammes de  $i_A$ ,  $i_B$  et  $i_C$  sont tracés sur le **document réponse n°3** pour  $\varphi_1 = \frac{\pi}{4}$ .

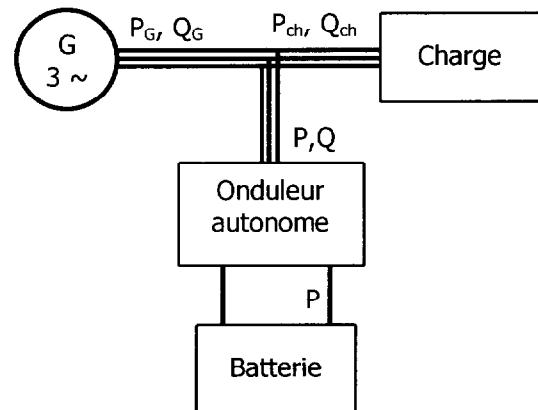
- C.2.1** - Indiquer les séquences de conduction des 6 éléments  $D_{1r}, T_{1r}, D_{2r}, T_{2r}, D_{3r}, T_{3r}$  sur le **document réponse n°3**.
- C.2.2** - Tracer l'allure du courant  $i$  débité par la batterie sur le **document réponse n°3**. (On remarquera que  $i_A + i_B + i_C = 0$ ).
- C.2.3** - Calculer la valeur moyenne  $\langle i \rangle$  du courant délivré par la batterie dans le cas où la puissance active  $P_{ch}$  absorbée par la charge vaut 200 kW et  $E_B$  vaut 510 V.

**C.3 - L'onduleur est connecté à la charge et à l'éolienne**

On adopte la convention récepteur pour chacun des éléments apparaissant sur le schéma ci-contre.

Quand un élément (machine asynchrone, onduleur ou charge) absorbe de la puissance active ou réactive, celle-ci est comptée positivement.

En revanche, s'il fournit de la puissance, elle est comptée négativement.



**figure 5**

**Dans cette partie, on néglige toujours les harmoniques de courant devant le fondamental.**

On suppose que la charge absorbe constamment la puissance active  $P_{ch} = 200$  kW et la puissance réactive  $Q_{ch} = 150$  kVAR.

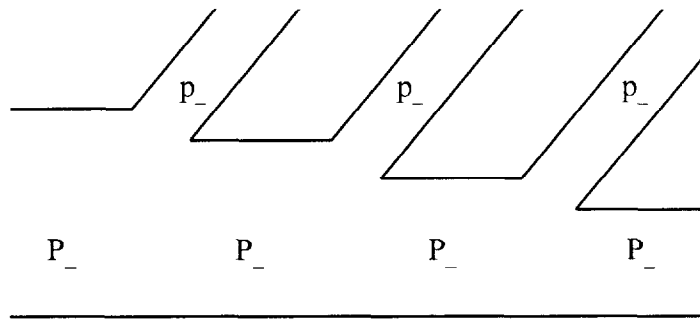
On s'intéresse à deux cas de fonctionnement :

- Cas n°1 - l'éolienne fonctionne à pleine puissance :  $P_{G1} = -300$  kW et  $Q_{G1} = 200$  kVAR
- Cas n°2 - le vent est faible : .....  $P_{G2} = -23$  kW et  $Q_{G2} = 123$  kVAR

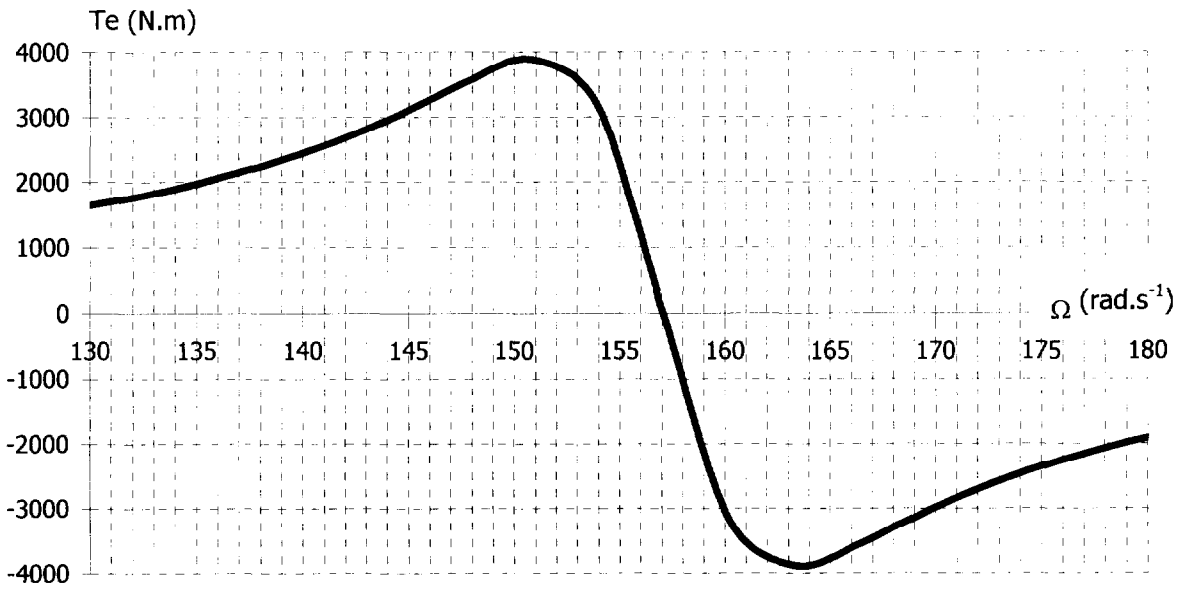
- C.3.1** - Calculer pour chacun des cas les puissances actives et réactives ( $P_1, P_2, Q_1, Q_2$ ) mises en jeu au niveau de l'onduleur.
- C.3.2** - Dire pour chacun des cas si la batterie se charge ou se décharge.



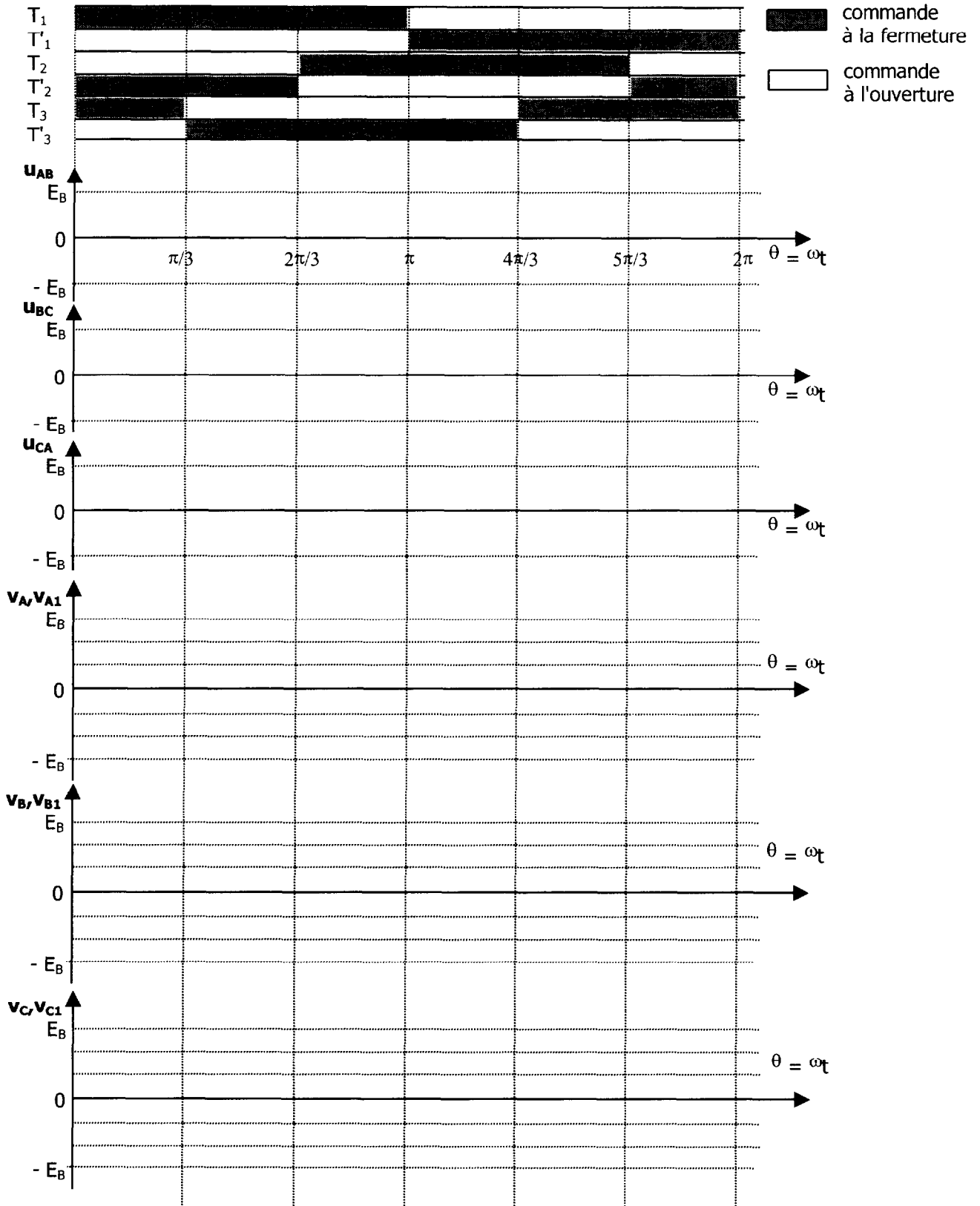
A.1.2 – Diagramme des puissances de la machine fonctionnant en moteur



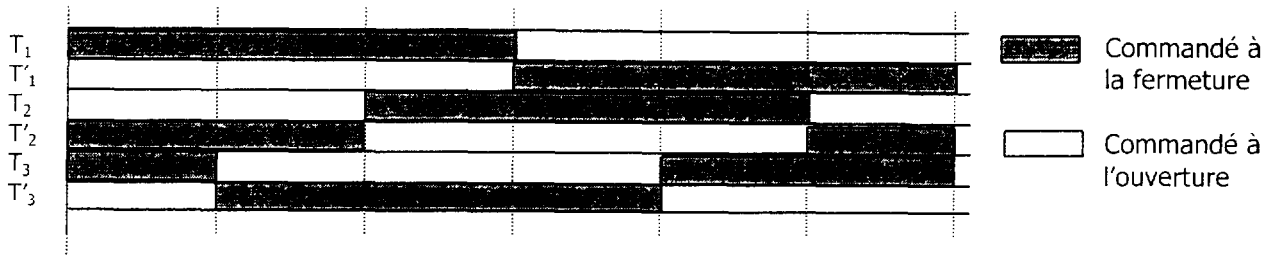
B.2 – Caractéristique couple – vitesse de la machine



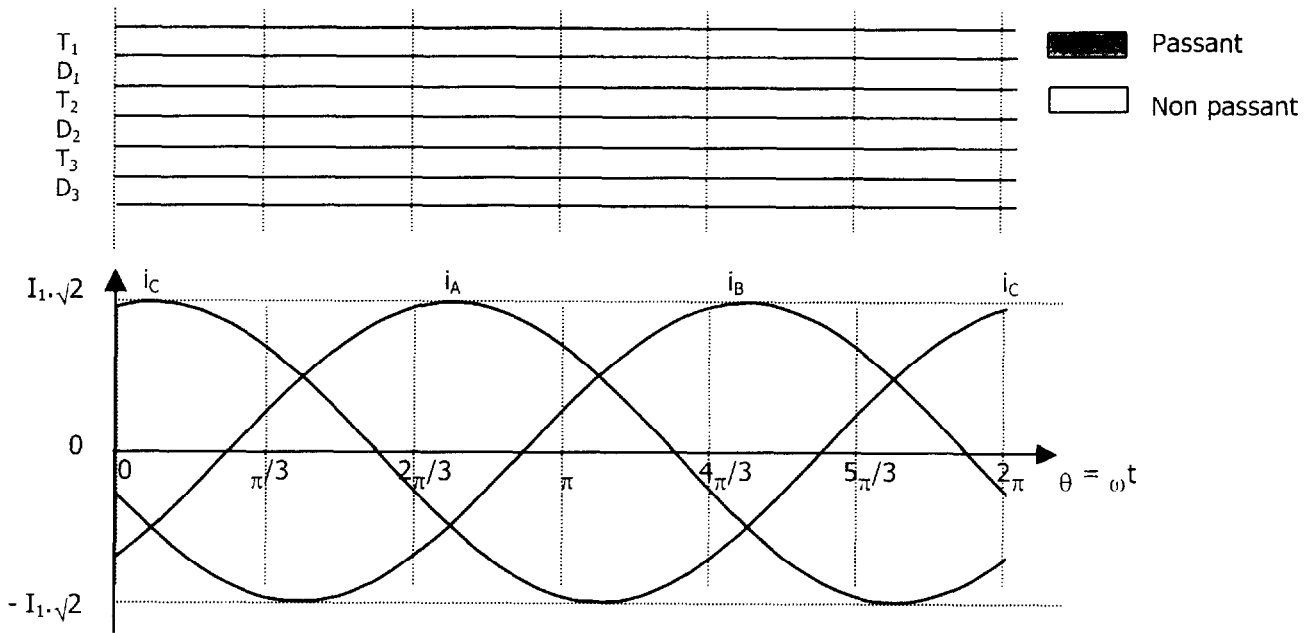
C.1 – Tensions délivrées par l'onduleur



Document réponse n°3



C.2.1 – Séquence de conduction des éléments



C.2.2 – Chronogramme du courant  $i$  délivré par la batterie

