

# ÉTUDE D'UN SYSTÈME INDUSTRIEL

## OPTION B : ÉLECTROTECHNIQUE ET ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE ÉLÉMENTS DE CORRECTION

### PARTIE A

#### Analyse des contraintes imposées à l'alternateur

##### Etude des performances

###### Performances attendues en mode alternateur

**QA.1**  $P = U_{\text{batterie}} \cdot I_{\text{charge}} = (U_{\text{vide}} + R \cdot I_{\text{charge}}) \cdot I_{\text{charge}}$

Application numérique :

$$P = (12,7 + 0,006 \cdot 150) \cdot 150 = 2040$$

$$P = 2040 \text{ W}$$

##### Etude simplifiée du démarrage

###### Mise en équation de l'entraînement

**QA.2**  $\Omega = \Omega_v \cdot \frac{d_2}{d_1} \Rightarrow r = \frac{d_2}{d_1}$  Application numérique :  $r = \frac{0,160}{0,060} = 2,67$   $r = 2,67$

**QA.3**  $J_{\text{total}} /_{\text{MS}} = J_{\text{MS}} + J_{\text{poulie-courroie}} + J_{\text{vilebrequin}} /_{\text{MS}}$

$$J_{\text{vilebrequin}} /_{\text{MS}} = J_{\text{Vilebrequin}} \cdot \left( \frac{\Omega_v}{\Omega} \right)^2 = J_{\text{Vilebrequin}} \cdot \left( \frac{1}{r} \right)^2$$

Application numérique :  $J_{\text{vilebrequin}} /_{\text{MS}} = 4 \cdot 10^{-3} + 0 + 150 \cdot 10^{-3} \cdot \left( \frac{1}{2,67} \right)^2$

$$\underline{\underline{J_{\text{vilebrequin}} /_{\text{MS}} = 25 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2}}$$

**QA.4**  $J_{\text{total}} \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C_{\text{MS}} - C_R$   $C_R = (C_{\text{DV}} + C_{\text{RV}}) \cdot \frac{1}{r}$

Applications numériques :

Fonctionnement à chaud :  $25 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C_{\text{MS}} - (40 + 40) \cdot \frac{1}{2,67}$

$$\underline{\underline{25 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C_{\text{MS}} - 30}}$$

Fonctionnement à froid :  $25 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C_{\text{MS}} - (80 + 40) \cdot \frac{1}{2,67}$

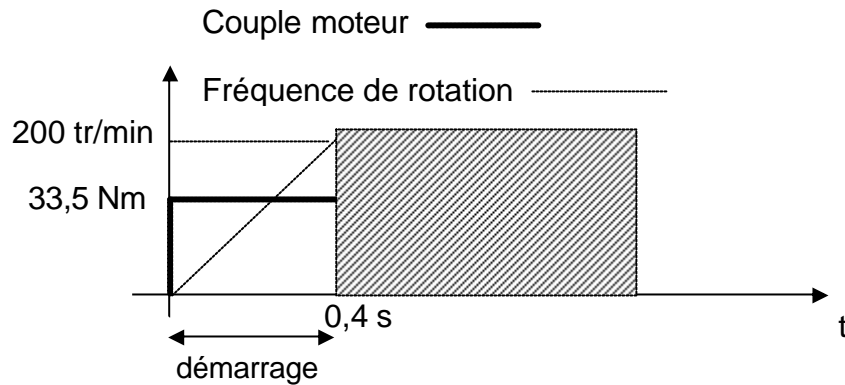
$$\underline{\underline{25 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C_{\text{MS}} - 45}}$$

###### Démarrage à chaud

**QA.5**  $C_{\text{demchaud}} = 25 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 200 \cdot 2,67}{60 \cdot 0,4} + 30 = 33,5$

$$\underline{\underline{C_{\text{demchaud}} = 33,5 \text{ Nm}}}$$

## QA.6

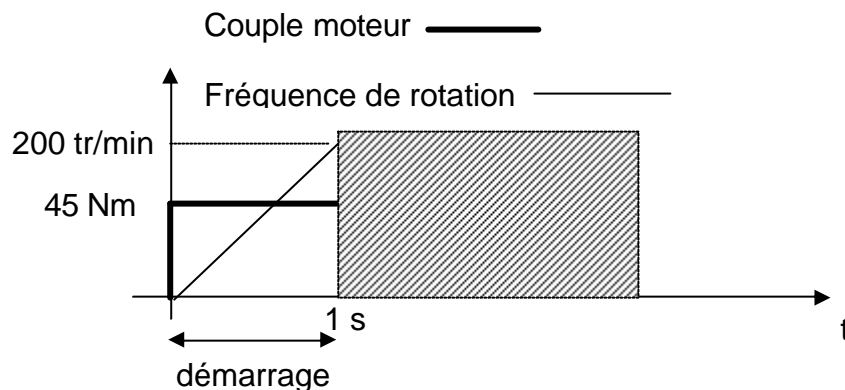


### Démarrage à froid

$$\text{QA.7 } C_{\text{demfroid}} = 25 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 200 \cdot 2,67}{60 \cdot 0,4} + 45 \cong 45$$

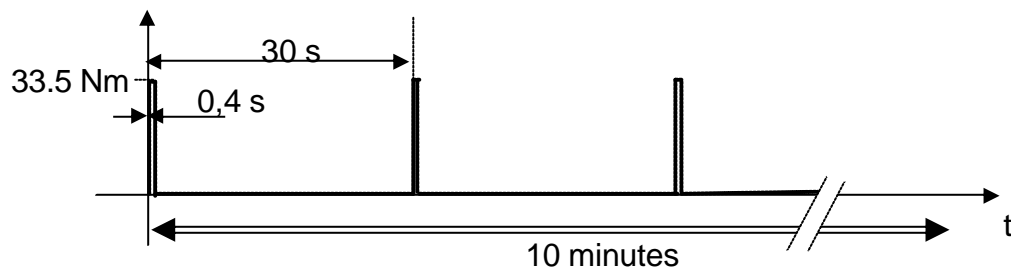
$$\underline{\underline{C_{\text{demfroid}} = 45 \text{ Nm}}}$$

## QA.8



### Démarrages fréquents

**QA.9** En négligeant l'échauffement en mode alternateur, la sollicitation du moteur synchrone est la suivante :



Le Couple Moyen Thermique Équivalent correspondant est le suivant :

$$C_{\text{MTE}}^2 = \frac{1}{600} \cdot [(33,5)^2 \cdot 0,4 \cdot 20]$$

$$\underline{\underline{C_{\text{MTE}} = 3,9 \text{ Nm}}}$$

**QA.10** Limitation de la fréquence des démarrages :

- La température ambiante, qui peut évoluer en fonction du climat et de la situation du véhicule (soleil) ;
- Après une sollicitation intense sur une courte période (1 démarrage toutes les 10 s pendant 1 minute), ce qui fait augmenter la valeur du Couple Moyen Thermique Équivalent ;

Pour limiter la surcharge thermique de l'alternateur-démarrateur, le pilotage du dispositif remet le groupe en fonctionnement classique : le moteur thermique reste en marche pendant les arrêts du véhicule.

**QA.11** Pour le **mode alternateur**, la puissance nominale de la machine (2 500 W) est supérieure 2 040 W, la tension nominale de sortie (14 V) permet d'obtenir une tension exploitable ( $\frac{3V\sqrt{6}}{\pi} = 33 \text{ V}$ ) pour assurer une régulation de la charge de la batterie.

En **mode démarreur**, le couple nominal\* de la machine (4 Nm) permet d'assurer les démarrages en régime sévère (1 démarrage toutes les 30 s pendant 10 minutes) avec une température ambiante égale à 100 °C, la vitesse nécessaire au démarrage ( $200 \times 2,67 = 534 \text{ tr/min}$ ) est bien inférieure à la vitesse nominale de la machine (6 000 tr/min), le couple maximum permis (50 Nm, voir hypothèse de travail), est supérieur à 35 Nm (démarrages à chaud) et à 45 Nm (démarrages à froid).

$$*C_n = \frac{P}{\Omega} = \frac{2500}{\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}} = 4 \text{ Nm}$$

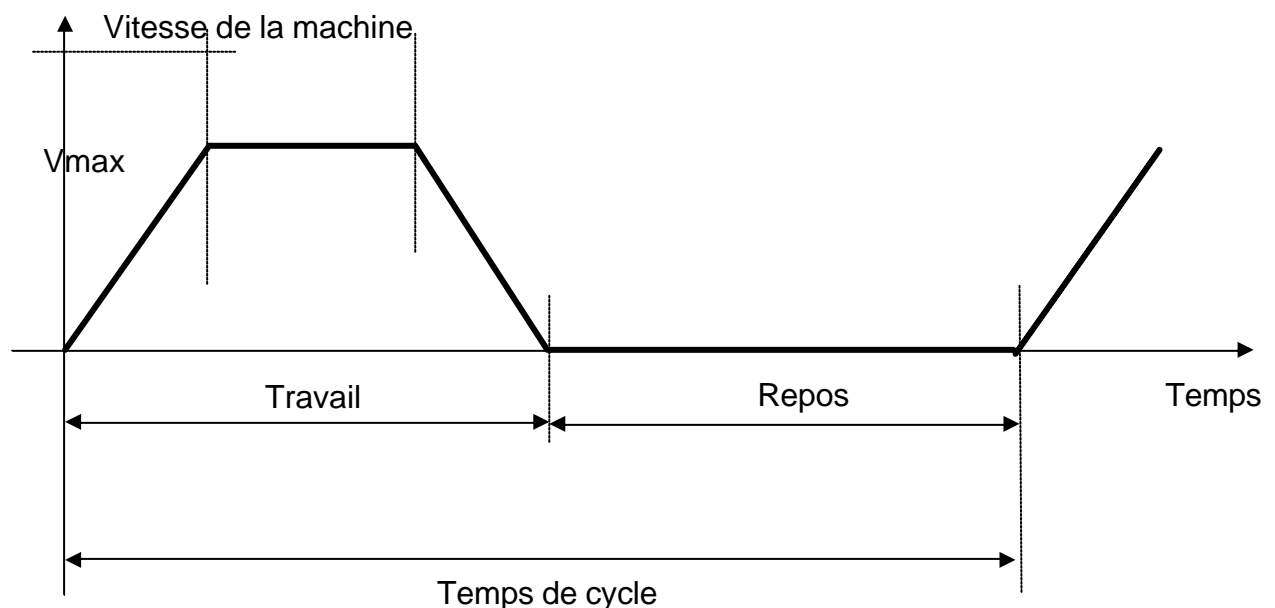
**QA.12** Contraintes sur la machine en fonction des zones de fonctionnement :

- Zone 1 : tous les points de fonctionnement qui évoluent dans cette zone peuvent être maintenu durant un temps infini (inférieur à la durée de vie de la machine !) sans créer un échauffement rédhibitoire pour la machine ;
- Zone 2 : les points de fonctionnement qui évoluent dans cette zone ne peuvent pas être maintenus car il conduiraient à un échauffement de la machine supérieur à l'échauffement nominal prévu par le constructeur ;
- Zone 3 : dans cette zone le couple demandé est trop important, pas de démarrage possible.
- Zone 4 : la vitesse du rotor devient trop importante conduisant à une possibilité de destruction de la machine par éclatement du rotor.

**QA 13** Il faut placer la machine dans un mode de fonctionnement impulsionnel.

Un couple résistant  $C_r$  tel que :  $4 < C_r < 7,8 \text{ Nm}$  permet d'obtenir un fonctionnement avec un couple toujours supérieur au couple nominal de la machine d'entraînement. Il faudra donc prévoir, dans le cycle de fonctionnement, un temps de repos pour la machine.

Un profil tel que celui présenté ci-dessous permet de préparer l'illustration demandée car il sera alors possible d'agir sur le temps de repos pour faire varier  $C_{MTE}$  :



par exemple : On prend,  $C_r = 6 \text{ Nm}$  et  $V_{\max} = 1\,500 \text{ tr/min}$

Quelques calculs de prospection conduisent à proposer :

- temps d'accélération : 0,5 s
- temps de décélération : 0,5 s
- temps régime permanent : 3 s
- temps de cycle : 9 s

Justification : 
$$J_{\text{total}} \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_r$$

soit, pour cette application : 
$$59 \cdot 10^{-5} \frac{d\Omega}{dt} = C_m - 6$$

Phase d'accélération : 
$$C_m = 59 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{1500 \cdot 2 \cdot \pi}{60 \cdot 0,5} + 6 = 6,18 \text{ Nm } (< 7,8 \text{ Nm})$$

Phase de décélération : 
$$C_m = 59 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{-1500 \cdot 2 \cdot \pi}{60 \cdot 0,5} + 6 = 5,81 \text{ Nm } (< 7,8 \text{ Nm})$$

Régime permanent : 
$$C_m = 6 \text{ Nm}$$

Le calcul du Couple Moyen Thermique Equivalent donne :

$$C_{\text{MTE}}^2 = \frac{1}{9} [(6,18)^2 \cdot 0,5 + (6)^2 \cdot 3 + (5,81)^2 \cdot 0,5] \quad \text{soit } C_{\text{MTE}} = 4 \text{ Nm}$$

**QA.14** Voir document réponse 1

**QA.15** Voir document réponse 1

**QA.16** On diminue le temps de repos dans le cycle, par exemple on prend un temps de cycle égal à 6 s :

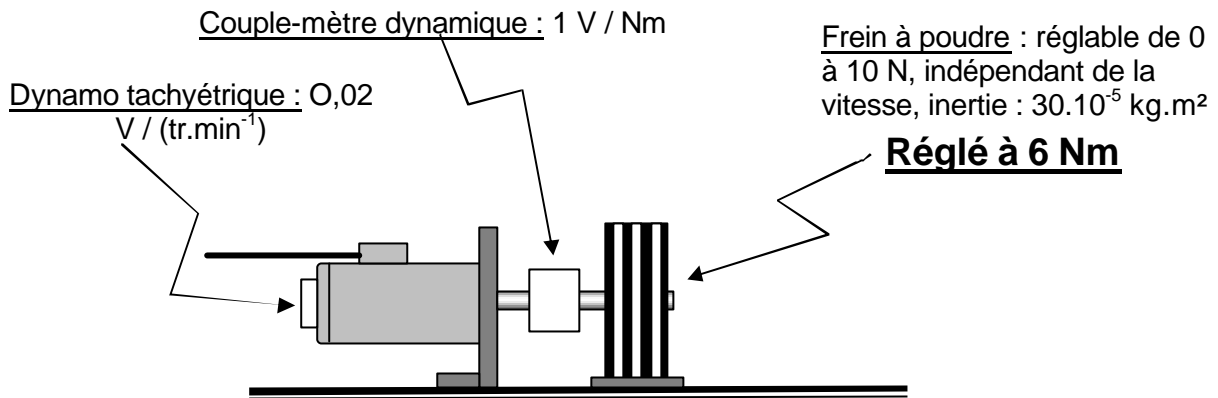
Justification : 
$$C_{\text{MTE}}^2 = \frac{1}{6} [(6,18)^2 \cdot 0,5 + (6)^2 \cdot 3 + (5,81)^2 \cdot 0,5]$$

$$C_{\text{MTE}}^2 = \frac{1}{6} [(6,18)^2 \cdot 0,5 + (6)^2 \cdot 3 + (5,81)^2 \cdot 0,5]$$

soit 
$$C_{\text{MTE}} = 4,9 \text{ Nm}$$

$C_{\text{MTE}} > 4 \text{ Nm}$  donc déclenchement de la protection thermique

**QA.17** Schéma de montage



#### QA.18 Scénario de l'illustration

- 1- Bien avant la démonstration, on règle le dispositif pour obtenir le profil de vitesse prédéterminé à la question QA.13 et on met le banc en fonctionnement.
- 2- En présence du banc, on explique aux élèves le fonctionnement du dispositif en présentant la phase d'accélération, de régime permanent, de décélération et de repos ainsi que la valeur du couple moteur qui n'est jamais inférieure à 4 Nm. Pour les explications, on place l'oscilloscope alternativement, en mode temporel et en mode XY.
- 3- On diminue le temps de cycle (durée 6 s), on constate un déclenchement thermique de la commande après une durée de fonctionnement (qui n'était pas demandée ici).

**QA.19** Les caractéristiques mécaniques données par les constructeurs précisent les limites de fonctionnement des actionneurs (en permanent thermique, en valeurs maximums). Dans le cas d'un fonctionnement en mode impulsif, il convient de calculer le couple moyen thermique équivalent relatif à la sollicitation de la machine pour vérifier que ce dernier ne dépasse pas le couple nominal. Si c'est le cas, soit il faut choisir un autre moteur, soit il faut ménager un temps de repos dans le cycle (quand l'application le permet).

## PARTIE B

### Étude du fonctionnement de l'alternateur

#### Modélisation des constituants

##### Modélisation de la machine synchrone

#### QB.1

##### Hypothèses :

- On suppose que l'entrefer est constant ;  
*L'induction dans l'entrefer ne dépend pas de la position du rotor.*
- La perméabilité du fer est supposée infinie ;  
*Le champ H dans le fer est nul. La force magnéto-motrice est concentrée dans l'entrefer.*
- On néglige les effets d'encoches ;  
*L'induction dans l'entrefer n'est pas affectée par les encoches.*
- L'induction est radiale dans l'entrefer de la machine ;  
*Cela simplifie les calculs du flux.*

- Toutes les lignes d'induction traversent l'entrefer.

*Il n'y a pas de fuites magnétiques.*

**QB.2** Voir document réponse 2

**QB.3** Voir document réponse 2

**QB.4** Voir document réponse 2

**QB.5** Voir document réponse 2

**QB.6** Le théorème d'Ampère donne  $\frac{B_{MAX}}{\mu_0} \cdot 2e = I_1$  d'où l'on obtient  $B_{MAX} = \frac{\mu_0}{e} \cdot \frac{I_1}{2}$

**QB.7**  $b_{h1} = \frac{2}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} B_{MAX} \cdot \cos(\alpha) d\alpha$  en développant on obtient  $b_{h1} = \frac{4}{\pi} B_{MAX} \cdot \cos(\alpha)$  avec

$$\underline{k_{h1} = \frac{4}{\pi}}$$

**QB. 8** Voir document réponse 2

**QB.9**  $\Psi_1 = k_{h1} B_{MAX} \frac{D_R}{2} L_M \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos(\alpha) d\alpha = k_{h1} B_{MAX} D_R L_M$  en remplaçant  $B_{MAX}$  par son expression on obtient  $\Psi_1 = k_{h1} \frac{\mu_0}{e} \cdot \frac{I_1}{2} D_R L_M$

**QB.10**  $L = \frac{\Psi_1}{I_1}$  ce qui donne  $L = \frac{k_{h1}}{2} \cdot \frac{\mu_0}{e} D_R L_M$

Application numérique :

La longueur de la machine hors tout est de 160 mm. On peut enlever 10 mm pour tenir compte de l'épaisseur de la carcasse.

$$D_R = 105 \text{ mm}$$

On prend  $L_M = 150 \text{ mm}$  Le calcul donne  $L = 36 \mu H$

$$e = 0,35 \text{ mm}$$

**QB.11**  $\Psi_{12} = k_{h1} B_{MAX} \frac{D_R}{2} L_M \int_{\pi/6}^{-5\pi/6} \cos(\alpha) d\alpha = -k_{h1} B_{MAX} \frac{D_R}{2} L_M$  En remplaçant  $B_{MAX}$  par son expression on obtient  $\Psi_{12} = -k_{h1} \frac{\mu_0}{e} \cdot \frac{I_1}{2} \cdot \frac{D_R}{2} L_M$

**QB.12**  $M = \frac{\Psi_{12}}{I_1}$  ce qui donne  $M = -\frac{k_{h1}}{4} \cdot \frac{\mu_0}{e} D_R L_M$

Application numérique :  $M = -18 \mu\text{H}$

**QB.13** Voir document réponse 3

**QB.14**  $L_{\text{CU}} = 4 \left[ 12L_M + 11 \frac{D_R}{2} \cdot \frac{\pi}{6} \right]$  L'application numérique donne  $L_{\text{CU}} = 8,409 \text{ mètres}$

**QB.15**  $R = \frac{1}{16} \rho_{20} \frac{(1 + \theta a)}{(1 + 20a)} \cdot \frac{L_{\text{CU}}}{S_{\text{CU}}}$

**QB.16** Diamètre du fil  $D = 1,18 \text{ mm}$  Section du cuivre  $S_{\text{CU}} = \pi \frac{D^2}{4} = 1,093 \text{ mm}^2$

Valeur de  $R$  pour  $100^\circ\text{C}$  :  $R = 10,53 \text{ m}\Omega$

**QB.17**  $\Phi_{\text{EX}} = B_{\text{EX}} \frac{D_R}{2} L_M \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos(\lambda - \alpha) d\lambda = B_{\text{EX}} \frac{D_R}{2} L_M [\sin(\pi/2 - \alpha) + \sin(\pi/2 + \alpha)]$

$\Phi_{\text{EX}} = D_R L_M B_{\text{EX}} \cos(\alpha)$

**QB.18** On suppose qu'à la date  $t = 0$  les axes magnétiques du rotor et de l'enroulement 1 coïncident. On a alors  $\alpha = \omega t$

$e_1 = -\frac{d}{dt} [D_R L_M B_{\text{EX}} \cos(\omega t)]$  ce qui donne  $e_1 = \omega D_R L_M B_{\text{EX}} \sin(\omega t)$

Valeur efficace de  $e_1$  :  $E = \frac{\omega}{\sqrt{2}} D_R L_M B_{\text{EX}}$

**QB.19**  $\omega = p\Omega$

**QB.20**  $E = \frac{p}{\sqrt{2}} D_R L_M B_{\text{EX}} \frac{\pi}{30} N$  Pour  $N = 1000 \text{ tr / mn}$  on obtient  $E = 7 \text{ volts}$

**QB.21**  $v_1 = Ri_1 + (L - M)i_1 + e_1$  d'où on déduit que  $L = L - M$

L'application numérique donne  $L = 54 \mu\text{H}$

### Modélisation de la transmission poulie-courroie

**QB.22**

Hypothèse :

- on néglige l'inertie de l'ensemble constitué des poulies et de la courroie

Les masses des poulies et de la courroie sont négligeables devant les masses en mouvement du moteur thermique. Cela simplifie le calcul de l'inertie ramenée sur l'arbre du moteur

**QB.23**  $r = \frac{d_2}{d_1}$  L'application numérique donne  $r = 2,67$

## Exploitation du simulateur

### Prédétermination des grandeurs attendues en mode démarreur

**QB.24** Moteur chaud :  $C_r = 40 + 40 = 80 \text{ Nm}$

Moteur froid :  $C_r = 40 + 80 = 120 \text{ Nm}$

**QB.25**

**Hypothèses :**

- La machine fonctionne en régime sinusoïdal ;

*Permet d'utiliser les vecteurs de Fresnel et la notation complexe*

- On ne tient pas compte de la saturation ;

*On utilise le modèle de Ben-Eschenbourg*

**QB.26**  $P_A = 3VI \cos(\varphi)$   
 $Q_A = 3VI \sin(\varphi)$

**QB.27**  $P_{EM} = 3EI \cos(\Psi)$   $P_{JS} = 3RI^2$

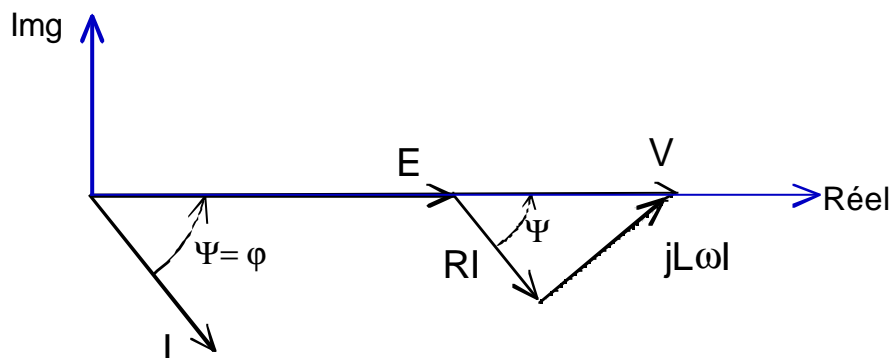
**QB.28**  $P_A = 3EI \cos(\Psi) + 3RI^2$

**QB.29**  $P_{EM} = C_{EM} \Omega = 3EI \cos(\Psi)$  avec  $E = k_{EX} I_{EX} \Omega$

*En remplaçant E dans l'expression de la puissance électromagnétique on obtient*

$C_{EM} = 3k_{EX} I_{EX} \cos(\Psi)$

**QB.30**



**QB.31** *En plaçant le plan complexe comme indiqué sur la figure précédente on obtient*

$I = \frac{V - E}{R + jL\omega}$  avec  $E = k_{EX} I_{EX} \Omega$  et  $\omega = p\Omega$

*La valeur efficace du courant s'écrit :*

$I = \frac{V - k_{EX} I_{EX} \Omega}{\sqrt{R^2 + (Lp\Omega)^2}}$



**QB.32** sur la figure précédente on peut voir que  $\text{tg}(\Psi) = \frac{Lp\Omega}{R}$  donc  $\cos(\Psi) = \frac{R}{\sqrt{R^2 - (Lp\Omega)^2}}$

Dans l'expression du couple électromagnétique  $C_{EM} = 3k_{EX}I_{EX}l\cos(\Psi)$  on remplace  $\cos(\Psi)$  et  $l$  par leur expression respective et on obtient

$$C_{EM} = \frac{3k_{EX}I_{EX}RV - 3(k_{EX}I_{EX})^2 R\Omega}{R^2 + (Lp\Omega)^2}$$

Il faut mettre l'expression du couple sous la forme  $C_{EM} = \frac{K_1 + K_2\Omega}{K_3 + K_4\Omega^2}$

Par identification on obtient  $K_1 = 3k_{EX}I_{EX}RV$  ;  $K_2 = -3(k_{EX}I_{EX})^2 R$  ;  $K_3 = R^2$  et  $K_4 = (Lp)^2$

D'après les hypothèses on peut que  $k_{EX}I_{EX} = \frac{E}{\Omega} = 0,0955$  pour le courant d'excitation nominal

Les valeurs numériques de coefficient  $K_1$  à  $K_4$  sont  $K_1 = 0,03438$  ;  $K_2 = -5,472 \cdot 10^{-4}$  ;  $K_3 = 4 \cdot 10^{-4}$  et  $K_4 = 9 \cdot 10^{-8}$

**QB.33**  $C_{AM} = C_{EM}(0) - \frac{(C_{RV} + C_{DV})}{r}$

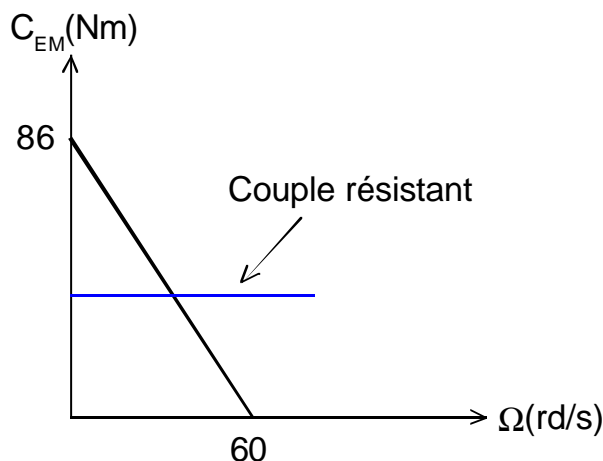
Démarrage à froid :  $C_{AMfr} = 86 - \frac{120}{2,67} = 41,06 \text{ Nm}$

Démarrage à chaud :  $C_{AMch} = 86 - \frac{80}{2,67} = 56,04 \text{ Nm}$

Le décollage est possible dans les deux cas.

### QB.34

La caractéristique de couple, dans le quadrant moteur, peut s'assimiler à un droite.



Equation de la droite :

$$C_{EM}(\Omega) = 86 - 1,43 \Omega$$

$$C_{EM}(\Omega) - \frac{(C_{RV} + C_{DV})}{r} = J_T \frac{d\Omega}{dt}$$

avec  $\underline{J_T = J_{RM} + \frac{J_W}{r^2}}$

L'application numérique donne :

Démarrage à froid :  $\underline{41,06 = 1,43\Omega + 25 \cdot 10^{-3} \frac{d\Omega}{dt}}$

Démarrage à chaud :  $\underline{56,04 = 1,43\Omega + 25 \cdot 10^{-3} \frac{d\Omega}{dt}}$

**QB.35** La résolution des équations précédentes donne :

Démarrage à froid :  $\underline{\Omega(t) = 28,71(1 - e^{-t/\tau})}$

Démarrage à chaud :  $\underline{\Omega(t) = 39,19(1 - e^{-t/\tau})}$  avec  $\underline{\tau = 17,48 \cdot 10^{-3} \text{ s}}$

On estime le temps de démarrage à cinq fois la constante de temps :  $\underline{t_D = 5\tau = 87,4 \cdot 10^{-3} \text{ s}}$

**QB.36** Démarrage à froid :  $\underline{\Omega = 28,71 \text{ rad/s}}$   $\underline{\Omega_V = \frac{\Omega}{r} = 10,75 \text{ rad/s}}$

Démarrage à chaud :  $\underline{\Omega = 39,19 \text{ rad/s}}$   $\underline{\Omega_V = \frac{\Omega}{r} = 14,68 \text{ rad/s}}$

**QB.37** Au décollage :  $I = 300 \text{ A}$

Démarrage à froid :  $\underline{I = 149,62 \text{ A}}$

Démarrage à chaud :  $\underline{I = 97,3 \text{ A}}$

**QB.38**  $\varphi = \text{tg}^{-1}\left(\frac{Lp\Omega}{R}\right)$

Démarrage à froid :  $\underline{\varphi = 23,3^\circ}$

Démarrage à chaud :  $\underline{\varphi = 30,45^\circ}$

**QB.39**  $P_A = 3VI \cos(\varphi)$

Démarrage à froid :  $\underline{P_A = 2473,52 \text{ W}}$

Démarrage à chaud :  $\underline{P_A = 1509,83 \text{ W}}$

**QB.40** Démarrage à froid :  $P_U = C_{EM}\Omega = (86 - 1,43 \times 28,71)28,71 = 1290,36 \text{ W}$

$\underline{P_U = 1290,36 \text{ W}}$

Démarrage à chaud :  $P_U = (86 - 1,43 \times 39,19)39,19 = 1174,06 \text{ W}$

$\underline{P_U = 1174,06 \text{ W}}$

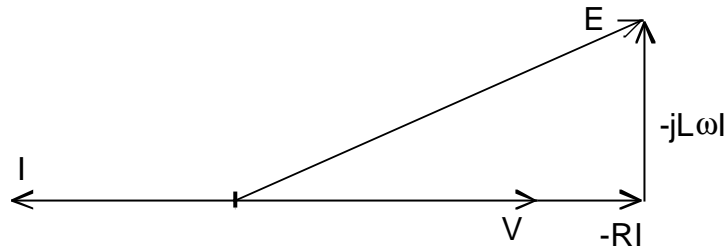
**QB.41** Démarrage à froid :  $\eta = \frac{P_U}{P_A} = \frac{1290,36}{2473,52} = 0,5217$   $\eta = 52,17\%$

Démarrage à chaud :  $\eta = \frac{1174,06}{1509,83} = 0,78$   $\eta = 78\%$

**Prédétermination des grandeurs attendues en mode chargeur de batterie**

**QB.42**  $n = 6000 / 2,67 = 2250 \text{ tr /min}$

**QB.43**



On conserve la convention récepteur

**QB.44.**  $E = k_{EX} I_{EX} \Omega = \sqrt{(V + RI)^2 + (Lp\Omega I)^2}$

d'où on tire l'expression du courant d'excitation  $I_{EX} = \frac{\sqrt{(V + RI)^2 + (Lp\Omega I)^2}}{k_{EX} \Omega}$

**QB.45**  $k_{EX} I_{EX} = 9,55 \cdot 10^{-2}$  pour  $I_{EX} = 20 \text{ A}$  ce qui fait que  $k_{EX} = 4,775 \cdot 10^{-3}$

$\Omega = \frac{\pi}{30} N = \frac{\pi}{30} \cdot 6000 = 628,32 \text{ rad/s}$

Le calcul du courant d'excitation donne :  $I_{EX} = 8 \text{ A}$

**QB.46** Puissance mécanique sur l'arbre de la machine :  $P_M = 3VI + 3RI^2$

Le calcul numérique donne  $P_M = 3 \times 6 \times 120 + 3 \times 20 \cdot 10^{-3} \times 120^2 = 3024 \text{ W}$

$P_M = 3024 \text{ W}$

Le rendement en fonctionnement alternateur s'écrit  $\eta = \frac{3VI}{P_M}$

Le calcul numérique donne  $\eta = 71,43\%$

## PARTIE C

### Étude du convertisseur statique et de sa commande

#### Etude du convertisseur statique

##### Fonctionnement onduleur pleine onde du mode démarreur

**QC.1**

$$u_{12} = v_{K1} - v_{K2}$$

$$u_{23} = v_{K2} - v_{K3}$$

$$\underline{\underline{u_{31} = v_{K3} - v_{K1}}}$$

**QC.2**

$$u_{12} = v_{1N} - v_{2N}$$

$$u_{23} = v_{2N} - v_{3N} \quad \text{et} \quad v_{1N} + v_{2N} + v_{3N} = 0$$

$$u_{31} = v_{3N} - v_{1N}$$

*A partir des expressions précédentes on obtient :*

$$v_{1N} = \frac{1}{3}(u_{12} - u_{31})$$

$$v_{2N} = \frac{1}{3}(u_{23} - u_{12})$$

$$\underline{\underline{v_{3N} = \frac{1}{3}(u_{31} - u_{23})}}$$

**QC.3** Voir document réponse 3

**QC.4** Voir document réponse 3

**QC.5** 
$$V_{1N} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} v_{1N}^2 dt} \quad T_0 \text{ est la période de } v_{1N}^2(t) \text{ On remarque que } T_0 = \frac{T}{2}$$

$$V_{1N} = \sqrt{\frac{2}{T} \left[ 2 \int_0^{T/6} \left( \frac{U_b}{3} \right)^2 dt + \int_{T/6}^{2T/6} \left( \frac{2U_b}{3} \right)^2 dt \right]} \quad \underline{\underline{V_{1N} = \frac{\sqrt{2}}{3} U_b}}$$

*L'application numérique donne*  $\underline{\underline{V_{1N} = 6,13 \text{ Volts}}}$

**QC.6** 
$$\hat{V}_{1N h1} = V_{1N h1} \sqrt{2} = \frac{2}{T} \int_0^T v_{1N}(t) \sin(? t) dt = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} v_{1N}(t) \sin(? t) dt$$

$$V_{1Nh1}\sqrt{2} = \frac{4}{T} \left[ \int_0^{T/6} \frac{U_b}{3} \sin(? t) dt + \int_{T/6}^{2T/6} \frac{2U_b}{3} \sin(? t) dt + \int_{2T/6}^{T/2} \frac{U_b}{3} \sin(? t) dt \right]$$

$$\underline{\underline{V_{1Nh1} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_b}} \quad \text{L'application numérique donne : } \underline{\underline{V_{1Nh1} = 5,85 \text{ Volts}}}$$

**QC.7** Voir document réponse 4

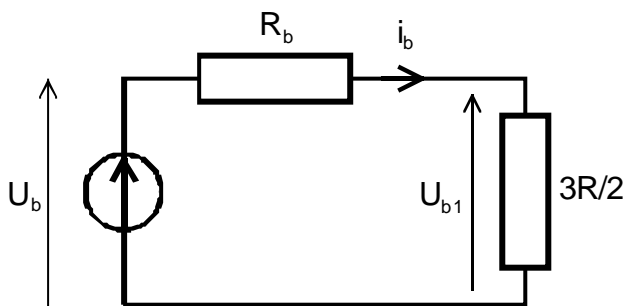
**QC.8**  $i_b = i_{K1+} + i_{K2+} + i_{K3+}$   $i_{K1+} = i_1$  quand  $i_1$  est positif

On fait le même raisonnement pour  $i_{K2+}$  et  $i_{K3+}$

$i_b$  est un courant continu qui a pour expression  $i_b = \frac{2U_b}{3R}$  Son allure est représentée sur le document réponse 5

L'application numérique donne  $i_b = 433,3 \text{ A}$

**QC.9** Le schéma équivalent coté continu est :



La tension d'entrée de l'onduleur s'écrit :  
 $U_{b1} = U_b - R_b i_b$

Le courant de batterie vaut  $i_b = \frac{2U_{b1}}{3R}$

En remplaçant  $U_{b1}$  par son expression on obtient  $i_b = \frac{2U_b}{3R + 2R_b}$

L'application numérique donne  $i_b = 361,1 \text{ A}$  On prend  $R_b = 6 \text{ m}\Omega$

**QC.10**  $I_1 = \frac{V_{1N}}{R} = \frac{\sqrt{2}U_{b1}}{3R}$  avec  $U_{b1} = \frac{3R}{2} i_b$  En remplaçant  $U_{b1}$  dans l'expression de  $I_1$  on

obtient  $I_1 = \frac{i_b}{\sqrt{2}}$  d'où l'expression du couple électromagnétique  $C_{EM} = \frac{0,29}{\sqrt{2}} i_b$

Couple électromagnétique sans  $R_b$  :  $C_{EM} = \frac{0,29}{\sqrt{2}} \times 433,3 = 88,85 \text{ Nm}$

Couple électromagnétique avec  $R_b$  :  $C_{EM} = \frac{0,29}{\sqrt{2}} \times 361,1 = 74,05 \text{ Nm}$

$\Delta C_{EM} = 88,85 - 74,05 = 14,8 \text{ Nm}$

**QC.11**  $i_1 = I_{MAX} \sin(\omega t - \Psi)$

**QC.12**  $v_{1N}$  et  $e_1$  sont en phase

**QC.13** Voir document réponse 5

**QC.14** Voir document réponse 5

**QC.15**  $i_b = i_{K1+} + i_{K2+} + i_{K3+}$  avec  $i_1 + i_2 + i_3 = 0$

$0 < t < T/6$   $K_{1+}$  et  $K_{3+}$  sont fermés

$$i_b = i_1 + i_3 \quad \underline{\underline{i_b = -i_2}}$$

$T/6 < t < 2T/6$   $K_{1+}$  est fermé

$$\underline{\underline{i_b = i_1}}$$

$2T/6 < t < T/2$   $K_{1+}$  et  $K_{2+}$  sont fermés

$$i_b = i_1 + i_2 \quad \underline{\underline{i_b = -i_3}}$$

$T/2 < t < 4T/6$   $K_{2+}$  est fermé

$$\underline{\underline{i_b = i_2}}$$

$4T/6 < t < 5T/6$   $K_{2+}$  et  $K_{3+}$  sont fermés

$$i_b = i_2 + i_3 \quad \underline{\underline{i_b = -i_1}}$$

$5T/6 < t < T$   $K_{1+}$  et  $K_{3+}$  est fermé

$$\underline{\underline{i_b = i_3}}$$

**QC.16** Voir document réponse 5

**QC.17** On remarque que la période de  $i_b$  vaut  $T/6$  et que  $i_b = i_1$  de  $T/6$  à  $2T/6$

La valeur moyenne de  $i_b$  s'écrit  $\langle i_b \rangle = \frac{6}{T} \int_{T/6}^{2T/6} I_{MAX} \sin t(\omega t - \Psi) dt$

$$\langle i_b \rangle = \frac{3}{\pi} I_{MAX} [\cos(\pi/3 - \Psi) - \cos(2\pi/3 - \Psi)] \quad \underline{\underline{\langle i_b \rangle = \frac{3}{\pi} I_{MAX} \cos(\Psi)}}$$

**QC.18** Voir document réponse 6

**QC.19** Voir document réponse 6

**QC.20**  $P_{CMOS} = R_{DS(on)} \langle i_T^2 \rangle$  avec  $\langle i_T^2 \rangle = \frac{1}{T} \int_{\Psi/\omega}^{T/2} I_{MAX}^2 \sin^2(\omega t - \Psi) dt$

$$\langle i_T^2 \rangle = \frac{I_{MAX}^2}{2T} \int_{\Psi/\omega}^{T/2} [1 - \cos(2\omega t - 2\Psi)] dt \quad \text{en développant on obtient}$$

$$\langle i_T^2 \rangle = \frac{I_{MAX}^2}{4\pi} \left( \pi - \Psi + \frac{\sin(2\Psi)}{2} \right) \text{ D'où l'expression des pertes par conduction}$$

$$\underline{P_{CMOS} = R_{DSON} \cdot I_{MAX}^2 \cdot \frac{\left( \pi - \Psi + \frac{\sin(2\Psi)}{2} \right)}{4\pi}}$$

**QC.21**  $P_{CDIODE} = V_0 \langle i_D \rangle$  avec  $\langle i_D \rangle = \frac{1}{T} \int_0^{\Psi/\omega} -I_{MAX} \sin(\omega t - \Psi) dt$

$$\langle i_D \rangle = \frac{I_{MAX}}{2\pi} (1 - \cos(\Psi)) \text{ d'où l'expression des pertes par conduction}$$

$$\underline{P_{CDIODE} = V_0 \cdot I_{MAX} \cdot \frac{(1 - \cos(\Psi))}{2\pi}}$$

**QC.22** Instant de fermeture :  $\underline{t_1 = \Psi / \omega}$   $\underline{i_{T1+}(t_1) = 0}$   
 Instant d'ouverture :  $\underline{t_2 = T / 2}$   $\underline{i_{T1+}(t_2) = I_{MAX} \sin(\pi - \Psi)}$

**QC.23** Il y a des pertes par commutation uniquement à l'ouverture du transistor. Pendant l'ouverture la tension aux bornes du transistor vaut  $U_b$

$$\underline{P_{COM} = \frac{f}{2} \cdot t_{OFF} \cdot U_b \cdot I_{MAX} \sin(\pi - \Psi)} \text{ avec } f = 1/T$$

**QC.24** Sur le document technique donné en annexe on peut lire :

$$t_{ON} = 350 \text{ ns} \quad t_{OFF} = 1250 \text{ ns}$$

$$R_{DSON} = 2,3 \text{ m}\Omega \quad V_0 = 0,8 \text{ Volts}$$

**QC.25** Pour le point de fonctionnement on peut déterminer les grandeurs suivantes :

$$I_{MAX} = I_1 \sqrt{2} = 110 \times \sqrt{2} = 155,56 \text{ A}$$

$$\Psi = \cos^{-1}(\cos(\varphi)) = \cos^{-1}(0,9) = 25,84^\circ \quad \Psi = 0,451 \text{ rad}$$

$$f = \frac{pN}{60} = \frac{6 \times 400}{60} = 40 \text{ Hz}$$

On peut écrire que  $P_T = P_{COM} + P_{CMOS}$

$$P_{CMOS} = 2,3 \cdot 10^{-3} \cdot 155,56^2 \cdot \frac{1}{4\pi} \left( \pi - 0,451 + \frac{\sin(2 \cdot 0,451)}{2} \right) = 13,65 \text{ W}$$

$$P_{COM} = \frac{40}{2} \cdot 1250 \cdot 10^{-9} \cdot 12 \cdot 155,56 \cdot \sin(\pi - 0,451) = 0,02 \text{ W}$$

On constate que les pertes par commutation sont faibles devant les pertes par conduction

$$\underline{P_T = 13,67 \text{ W}}$$

**QC.26**  $P_{\text{MODULE}} = 2P_T + 2P_{\text{CDIODE}}$   $P_{\text{CDIODE}} = 0,8 \cdot 155,56 \cdot \frac{(1 - \cos(0,451))}{2\pi} = 1,98 \text{ W}$

$P_{\text{MODULE}} = 2 \cdot 13,67 + 2 \cdot 1,98 = 31,26 \text{ W}$

**QC.27**  $P_{\text{CONV}} = 3P_{\text{MODULE}}$   $P_{\text{CONV}} = 3 \cdot 31,26 = 93,78 \text{ W}$

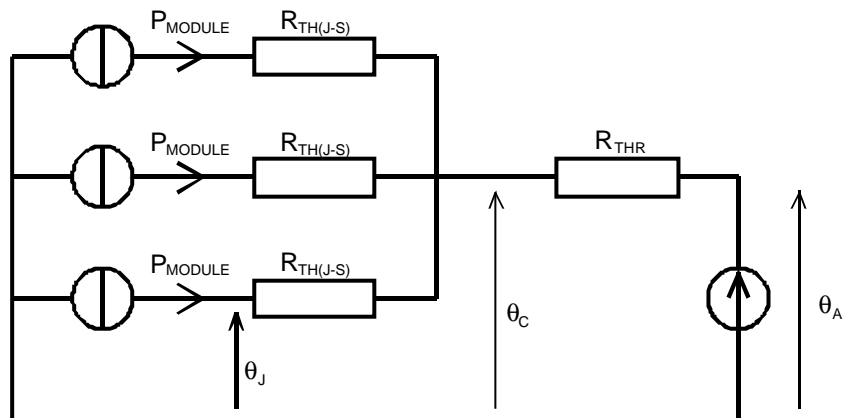
**QC.28**  $\eta_{\text{CONV}} = \frac{P_U}{P_U + P_{\text{CONV}}}$  avec  $P_U = 3V_{1\text{Nh1}}I_1 \cos(\Psi)$  et  $V_{1\text{Nh1}} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_b$

$V_{1\text{Nh1}} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot 12 = 5,4 \text{ Volts}$   $P_U = 3 \cdot 5,4 \cdot 110 \cos(0,451) = 1603,83 \text{ W}$

$\eta = \frac{1603,83}{1603,83 + 93,78} = 0,945$   $\eta = 94,5\%$

**QC.29**  $R_{\text{TH(J-S)}} = 0,45^\circ/\text{W}$   $\theta_{\text{JMAX}} = 150^\circ$

**QC.30**



**QC.31** La loi des mailles appliquée au schéma ci-dessus donne

$$\theta_J - R_{\text{TH(J-S)}} \cdot P_{\text{MODULE}} - R_{\text{THR}} \cdot 3P_{\text{MODULE}} - \theta_A = 0$$

de cette expression on obtient

$$R_{\text{THR}} = \frac{\theta_{\text{JMAX}} - \theta_A - R_{\text{TH(J-S)}} \cdot P_{\text{MODULE}}}{3P_{\text{MODULE}}}$$

L'application numérique donne

$$R_{\text{THR}} = 0,382^\circ/\text{W}$$

Prendre une marge de sécurité revient à diminuer la résistance thermique. Avec une marge de sécurité de 20% on obtient :

$$R_{\text{THR}} = 0,306^\circ/\text{W}$$

**QC.32**  $\theta_C = R_{\text{THR}} \cdot 3P_{\text{MODULE}} + \theta_A$  L'application numérique donne  $\theta_C = 128,7^\circ$

$\theta_J = R_{\text{TH(J-S)}} \cdot P_{\text{MODULE}} + \theta_C$  L'application numérique donne  $\theta_J = 142,78^\circ$



**QC.33** Les principales fonctions sont :

- ⇒ Assurer l'isolement galvanique ;
- ⇒ Protéger contre la dé-saturation ;
- ⇒ Protection contre les courts-circuits ;
- ⇒ Avoir une entrée de commande du transistor compatible CMOS ou TTL.

### **Fonctionnement redresseur du mode recharge de batterie**

**QC.34**  $E = k_{EX} I_{EX} \frac{\pi}{30} N = 4,775 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot \frac{\pi}{30} \cdot 6000 = 30 \text{ Volts}$  d'ou

$E = 30\sqrt{2} = 42,33 \text{ Volts}$  ce qui est conforme à l'amplitude de  $E_1$  de la simulation

$f = \frac{pN}{60} = \frac{6 \cdot 6000}{60} = 600 \text{ Hz}$        $T = \frac{1}{f} = 1,67 \text{ ms}$       cette valeur correspond à la  
période lue sur l'oscillogramme de  $E_1$

**QC.35** La tension  $V_1 - E_1$  est appliquée au circuit R,L série. Cette tension présente des harmoniques à des fréquences multiple de 600 Hz qui est le fréquence du fondamental. Le circuit R,L série est un filtre passe bas du premier ordre avec  $I_1$  en sortie et  $V_1 - E_1$  en entrée.

La fréquence de coupure du filtre vaut  $f_0 = \frac{R}{2\pi L} = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{2\pi \cdot 50 \cdot 10^{-6}} = 63,66 \text{ Hz}$

Le premier harmonique non nul de la tension d'entrée est à 3 Khz. Le courant généré par cet harmonique de tension est donc fortement atténué. Le courant de sortie du filtre est essentiellement du au fondamental de la tension  $V_1 - E_1$ .

**QC.36** La machine synchrone se comporte comme une source de courant.

**QC.37** On connexe une source de courant à une source de tension (la batterie) via le pont redresseur. La règle d'interconnexion des sources est respectée.

**QC.38** Voir document réponse 7

**QC.39** Puissance moyenne dissipée dans une diode

$$P_{CDIODE} = V_0 \frac{1}{T} \int_0^{T/2} I_{MAX} \sin(\omega t) dt = \frac{V_0 I_{MAX}}{\pi}$$

Puissance moyenne dissipée dans un module

$$\underline{P_{MODULE} = 2P_{CDIODE}}$$

L'application numérique donne

$$\underline{P_{MODULE} = 101,86 \text{ W}}$$

Sur l'oscillogramme de  $I_1$  on lit  $I_{MAX} = 200 \text{ A}$

**QC.40**  $\theta_J = R_{TH(J-S)} \cdot P_{MODULE} + R_{THR} \cdot 3P_{MODULE} + \theta_A$

L'application numérique donne  $\theta_J = 237,5^\circ$

La température de jonction est supérieure à la température maximum. Il faut choisir un radiateur avec une résistance thermique plus faible.

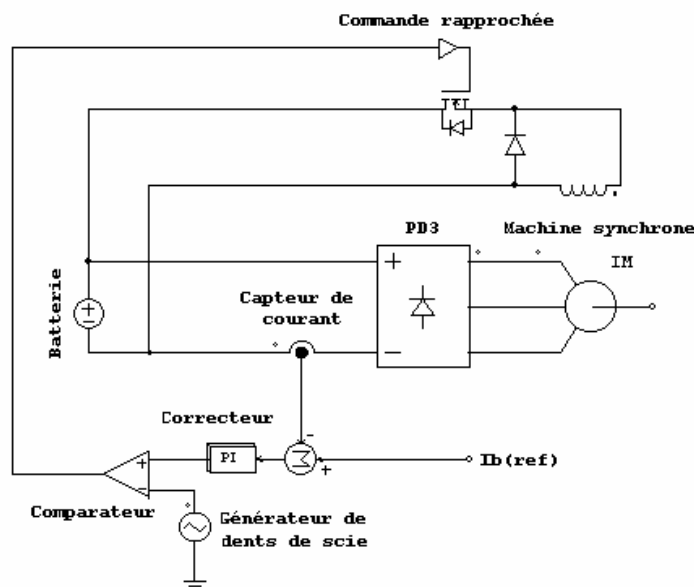
Nouvelle valeur de  $R_{THR}$  
$$R_{THR} = \frac{\theta_{JMAX} - \theta_A - R_{TH(J-S)} \cdot P_{MODULE}}{3P_{MODULE}}$$

L'application numérique donne  $R_{THR} = 0,0136^\circ / W$

**QC.41** 
$$\langle i_b \rangle = 3 \frac{1}{T} \int_0^{T/2} I_{MAX} \sin(\omega t) dt = \frac{3I_{MAX}}{\pi}$$

L'application numérique donne  $\langle i_b \rangle = 190,98 A$

**QC.42**



### Choix des appareil de mesure

**QC.43** 
$$V_{moy} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v(t) \cdot dt, \text{ mesurable avec un voltmètre numérique sur la position valeur}$$

moyenne ou avec un voltmètre magnéto-électrique

$$V_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v^2(t) \cdot dt}, \text{ mesurable avec un voltmètre numérique sur la position RMS ou avec un}$$

voltmètre ferromagnétique ou encore avec un voltmètre magnéto-électrique avec redresseur dans le cas de signaux sinusoïdaux.

**QC.44** Lorsqu'on travaille sur des installations ou équipements électriques reliés au secteur, il faut non seulement être protégé contre la tension nominale maximale des circuits, **mais aussi contre les surtensions transitoires** (voir CEI 1010). Plus une mesure est effectuée près de l'arrivée du secteur, plus la probabilité de brusques surtensions transitoires sur les entrées du multimètre augmente.

Dans le cas de cette salle de TP, on peut prendre par exemple un appareil catégorie III 600 V (tension assignée phase – terre)

**QC.45** La notion de classe d'isolation renvoie à la protection des personnes :

Classe 0 : pas de protection

Classe 1 : toutes les parties métalliques sont reliées à la terre

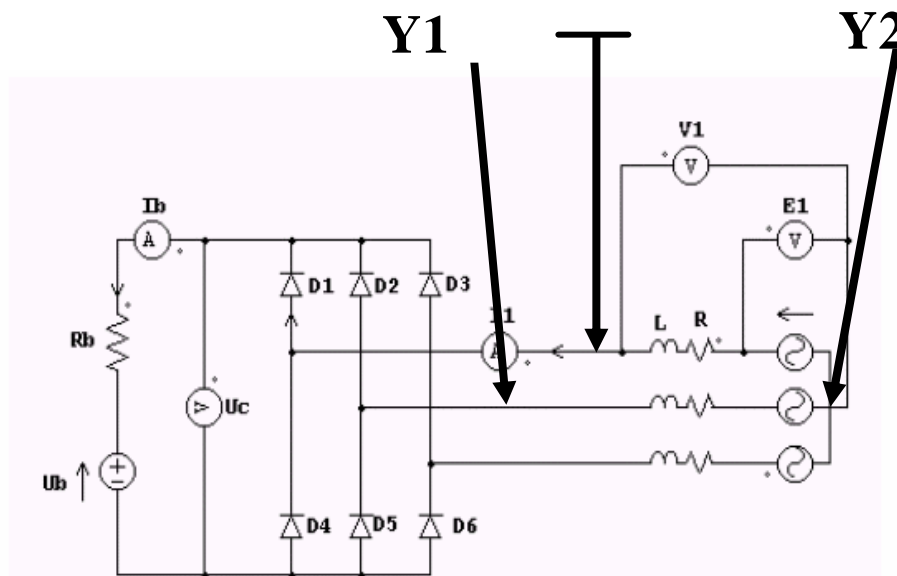
Classe 2 : pas de liaison à la terre des parties métalliques mais elle sont rendues inaccessibles par une isolation supplémentaire.

Dans le cas d'appareils de classe 1, il ne faut pas avoir plusieurs masses et bien faire attention, en cas de mesure sur le réseau (régime TT) à ne pas brancher une phase sur la masse de l'appareil.

### Mesurage sur l'alternodémarreur

**QC.46** Pour avoir en concordance des temps les 2 signaux, il faut afficher (-Y2)

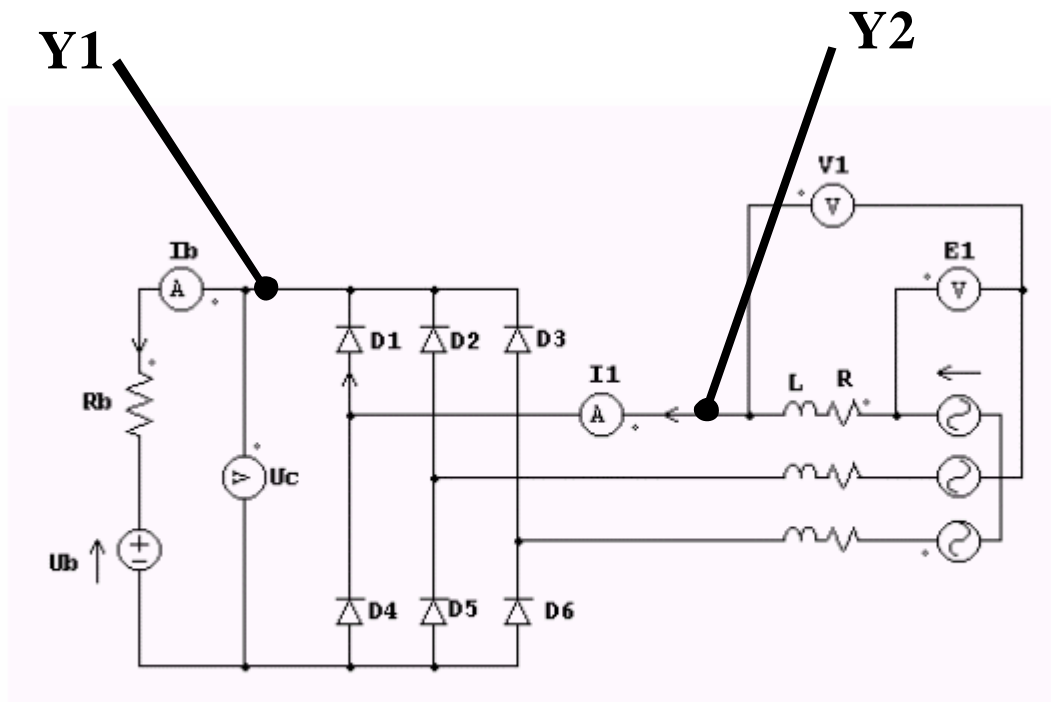
Il n'y a pas de problème entre le point froid de la mesure et le – de la tension fournie par les batteries car le réseau d'alimentation et les batteries sont indépendants (pas de liaison électrique).



On peut aussi utiliser un oscilloscope à entrées différentielles ou bien utiliser des boîtiers d'isolation. Attention à la bande passante des boîtiers d'isolation car les signaux ont une fréquence du fondamental égale à 154 Hz et ils sont déformés. Une analyse de Fourier montre que la BP minimum requise s'élève à XX Hz (si on prend, par exemple, un facteur 10 par rapport à la fréquence harmonique la plus élevée avec une amplitude qui ne dépasse pas 5% de celle du fondamental).

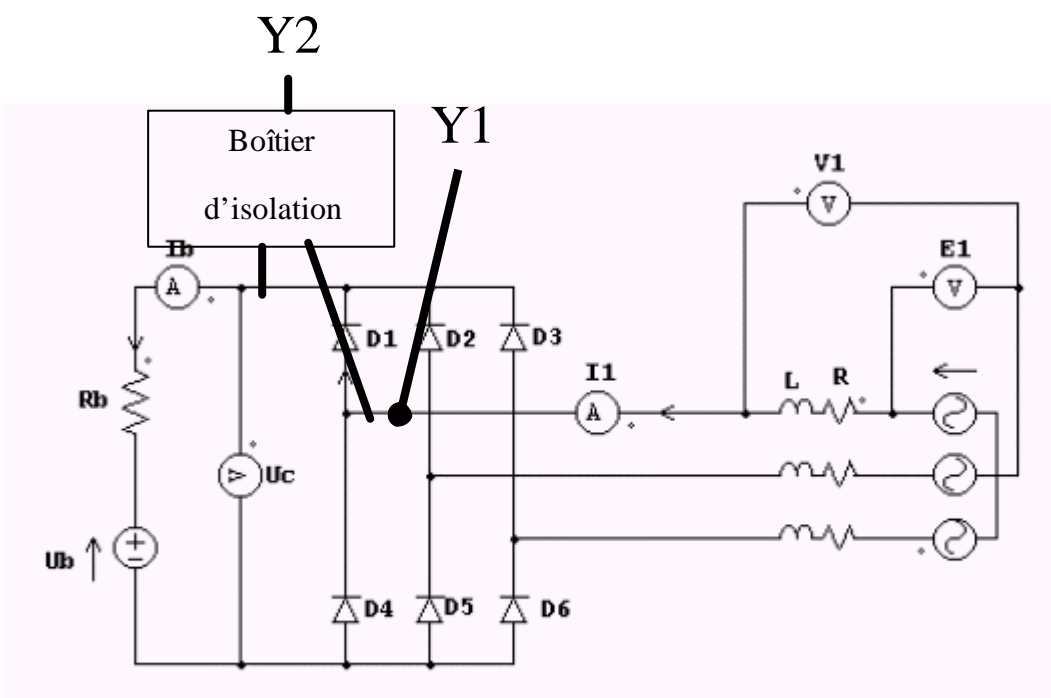
**QC.47** Attention à la bande passante des boîtiers d'isolation car les signaux ont une fréquence du fondamental égale à 600 Hz et ils sont déformés. Une analyse de Fourier montre que la BP minimum requise s'élève à 42 kHz (si on prend, par exemple, un facteur 10 par rapport à la fréquence harmonique la plus élevée avec une amplitude qui ne dépasse pas 5% de celle du fondamental).

QC.48



La bande passante des pinces de courant doit être au minimum de 0 à 600 Hz.

QC.49



Nous n'avons pas accès directement au courant dans l'interrupteur  $K1+$  du bras de pont. Il faut donc prendre le courant dans la phase correspondante et ne prendre en compte que la partie qui correspond au courant qui circule dans  $K1+$ .

Procéder à une simulation pour obtenir le spectre d'amplitude de  $I_{K1+}$  et choisir la BP correspondante.

## Respect des conditions à remplir vis à vis des risques électriques

**QC.50** Cordons IP2x et CAT III 600 V car ils sont mis en commun dans une salle où il y a présence de BTA à partir d'un réseau industriel.

**QC.51** Non, car les activités de TP réalisées sur ce dispositif se font en présence de TBT (12 V=) et, de plus, les câblages se font avec des cordons IP2x.

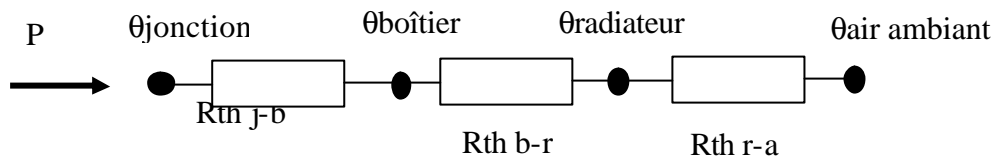
## Détermination expérimentale de la température de jonction en mode alternateur

**QC.52** La mesure de la température du radiateur peut être faite à partir d'une visée infrarouge

**QC.53** On mesure  $P$ , la puissance développée par un interrupteur (voir QC.49). Connaissant les résistances thermiques  $R_{th\ j-b}$  et  $R_{th\ b-r}$ , une mesure de la température avec du radiateur permet d'évaluer la température de jonction d'un interrupteur électronique.

**QC.54**

La loi thermique donne :

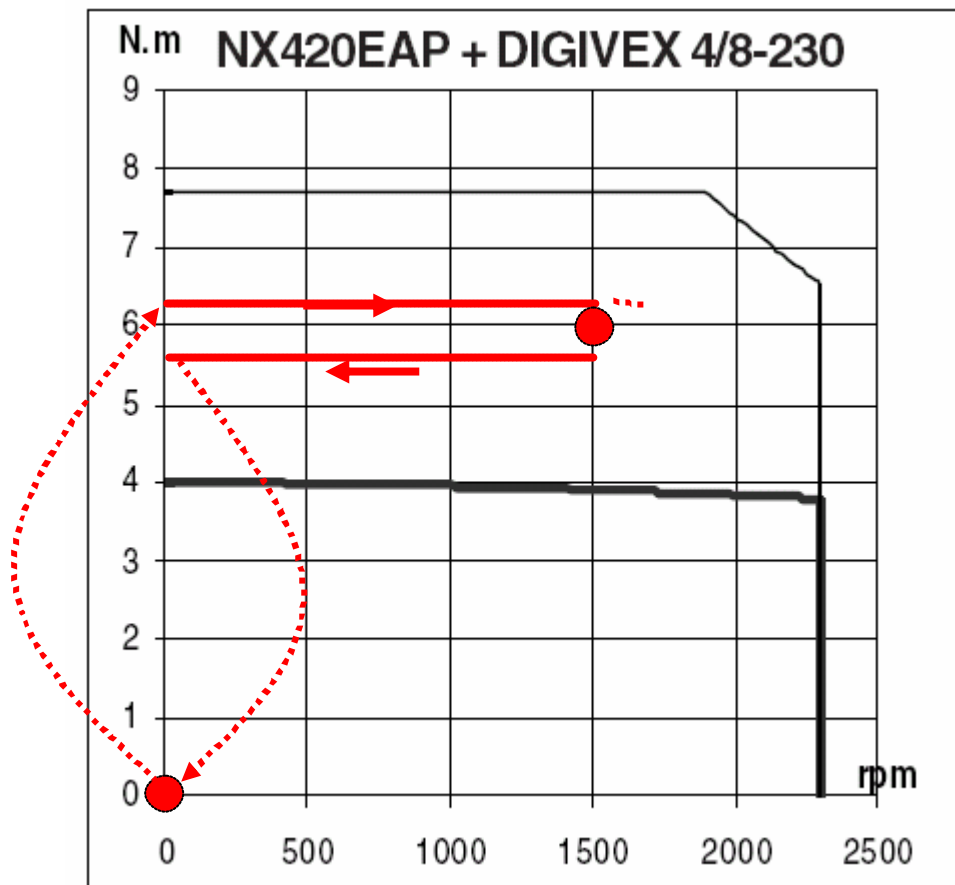


$$\theta_j - \theta_R = P.(R_{th.j-b} + R_{th.b-r})$$

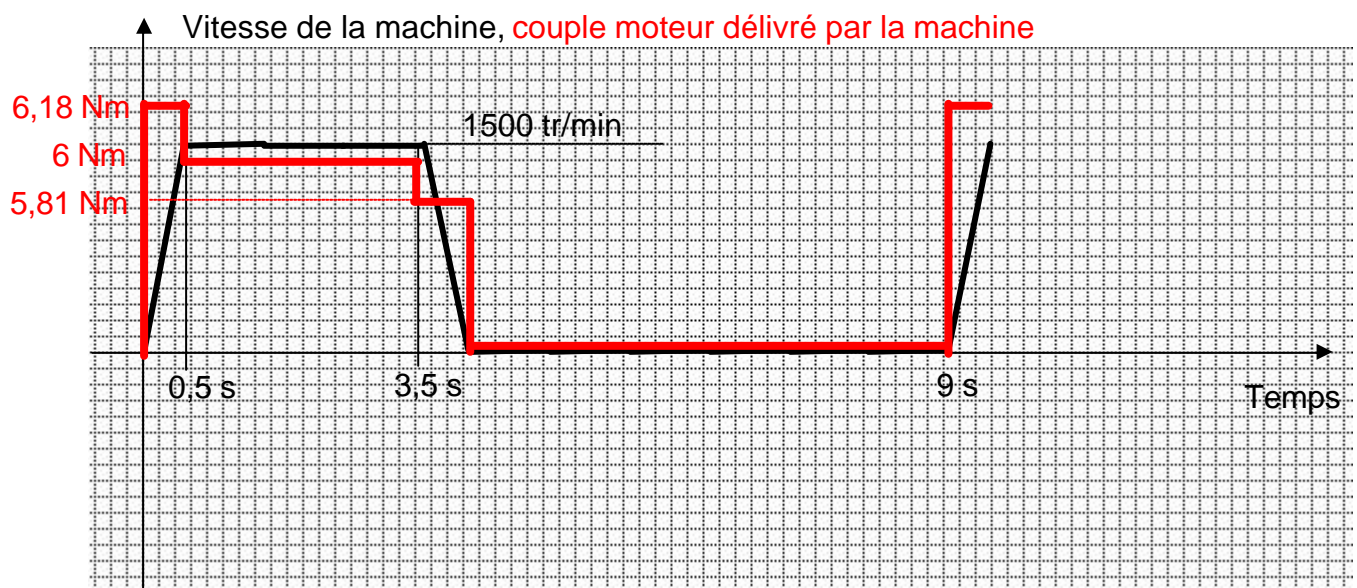
$$\underline{\underline{\theta_j = P.(R_{th.j-b} + R_{th.b-r}) + \theta_R}}$$

# DOCUMENT RÉPONSE 1

QA.14

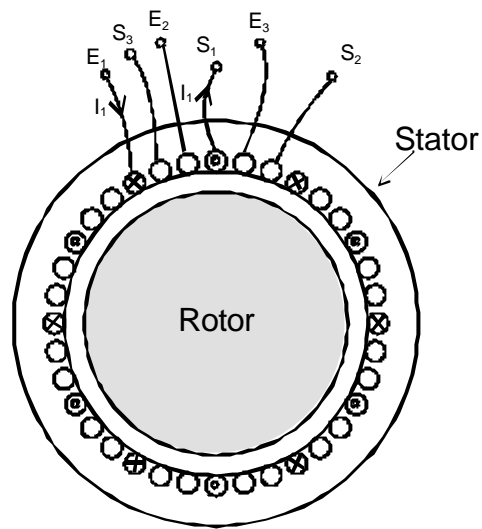


QA.15

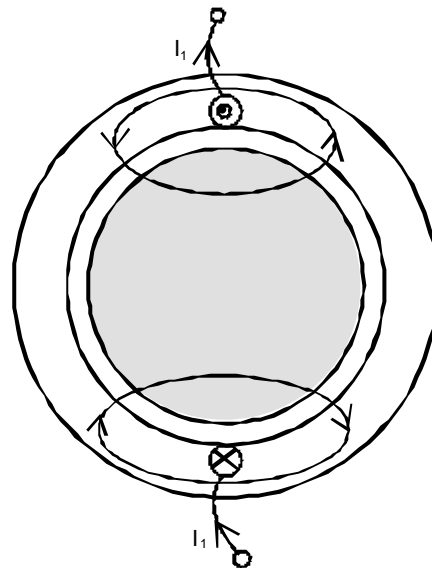


## DOCUMENT RÉPONSE 2

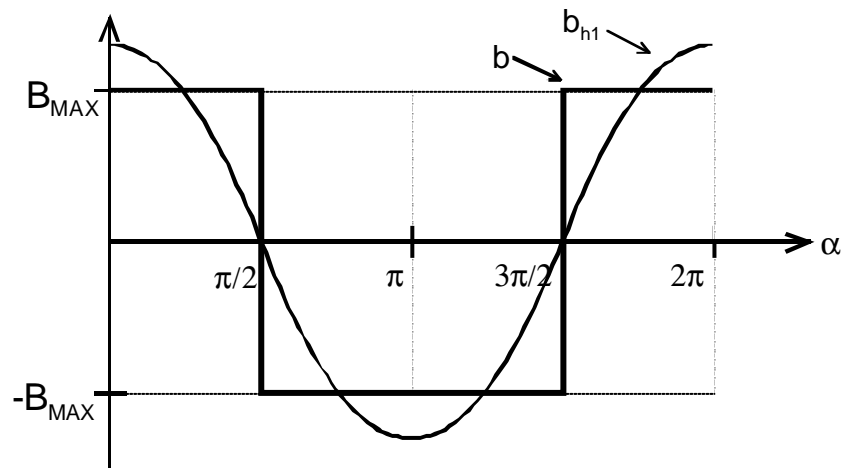
QB.2 et QB.3



QB.4

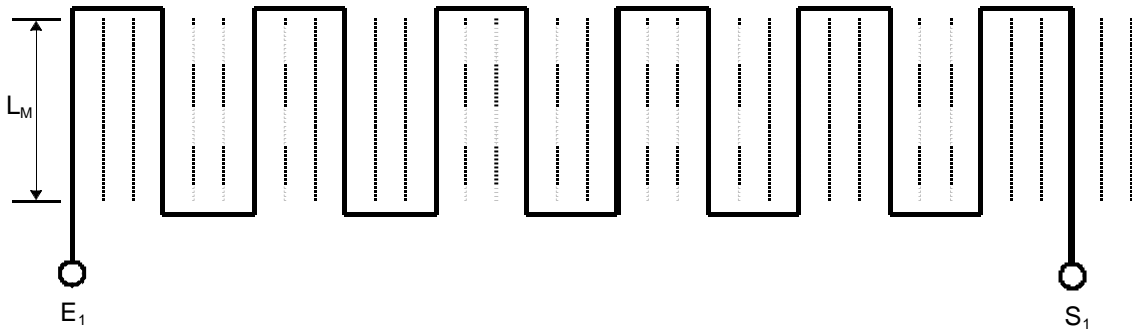


QB.5 et QB.8

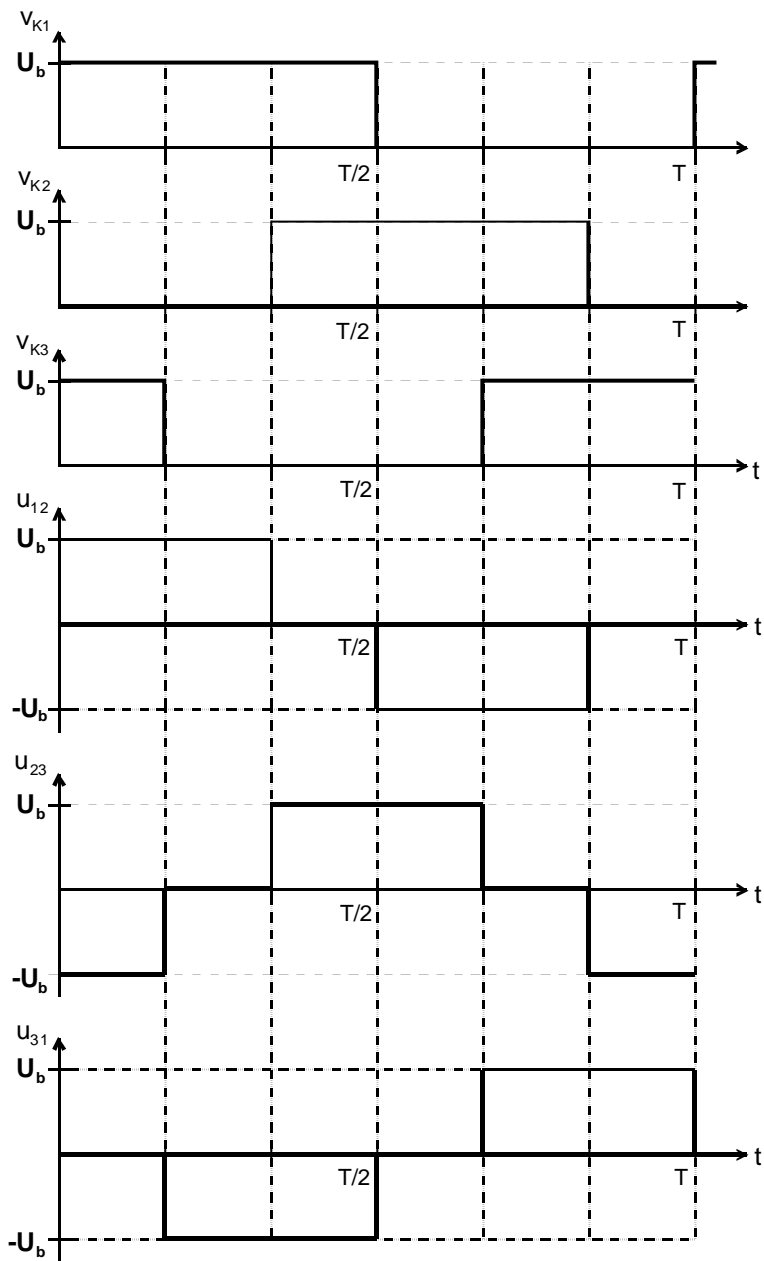


# DOCUMENT RÉPONSE 3

QB.13



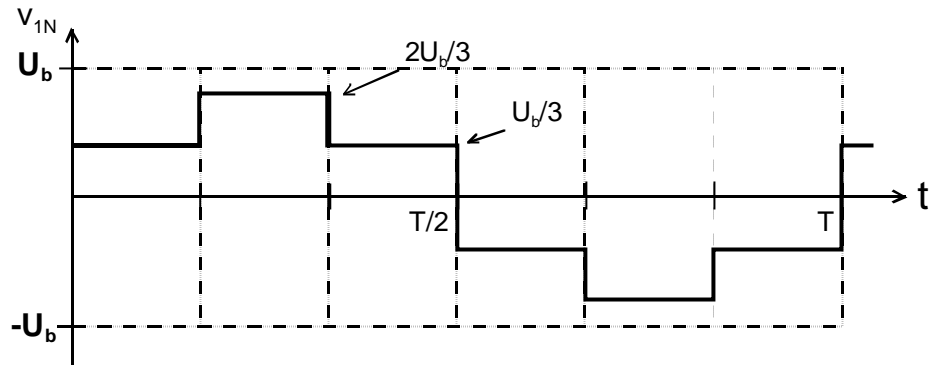
QC.3



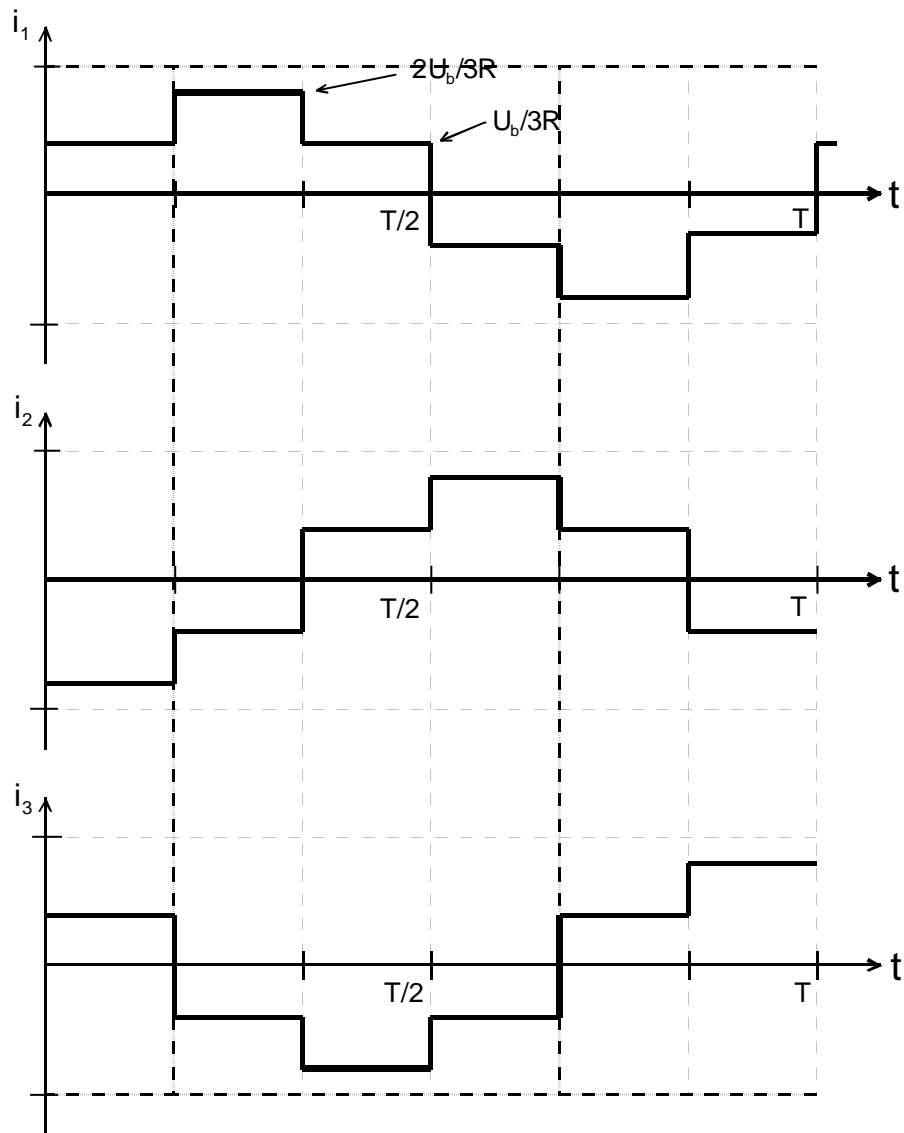


## DOCUMENT RÉPONSE 4

QC.4

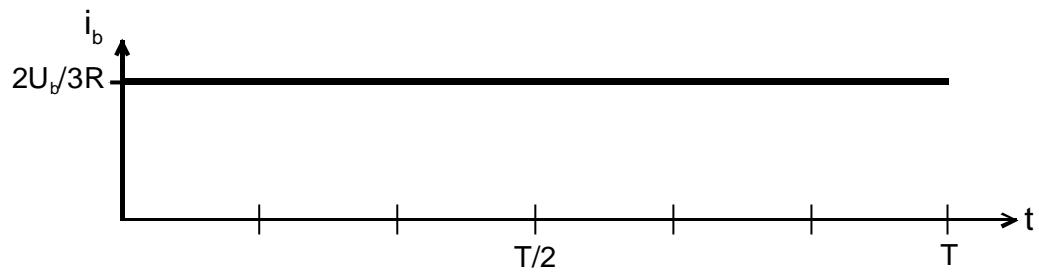


QC.7

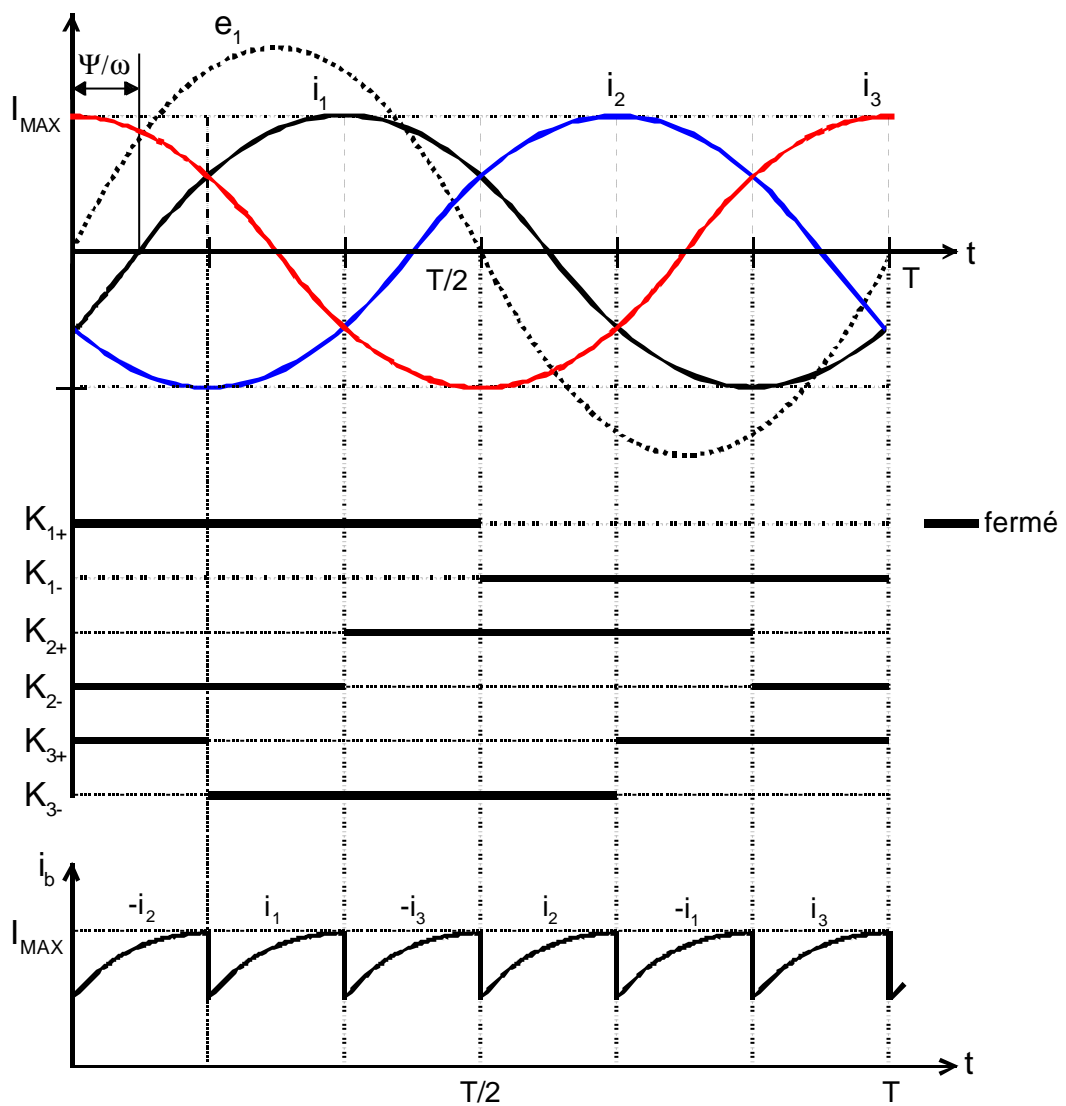


# DOCUMENT RÉPONSE 5

QC.8

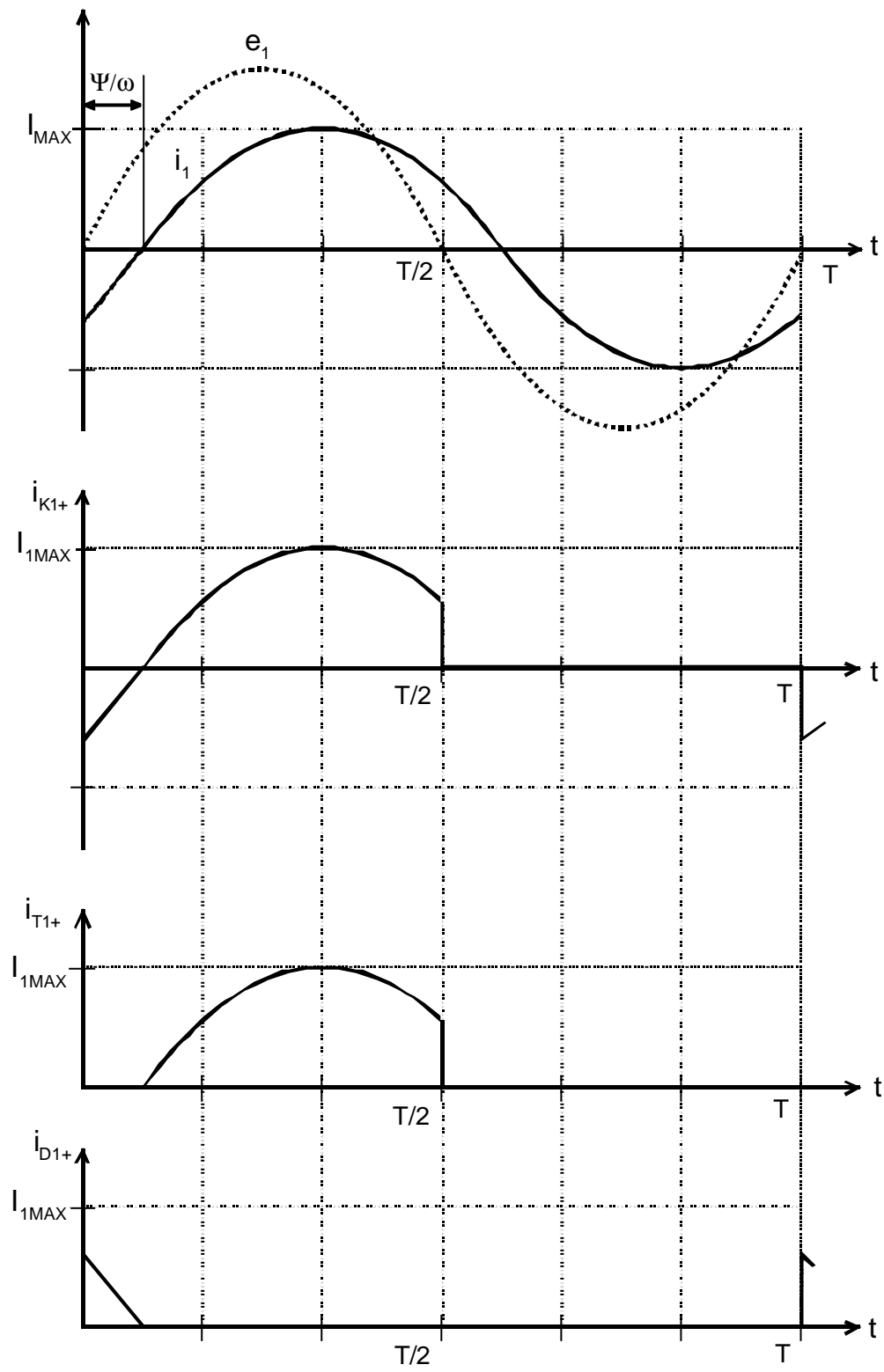


QC.13 , QC.14 et Q.C16



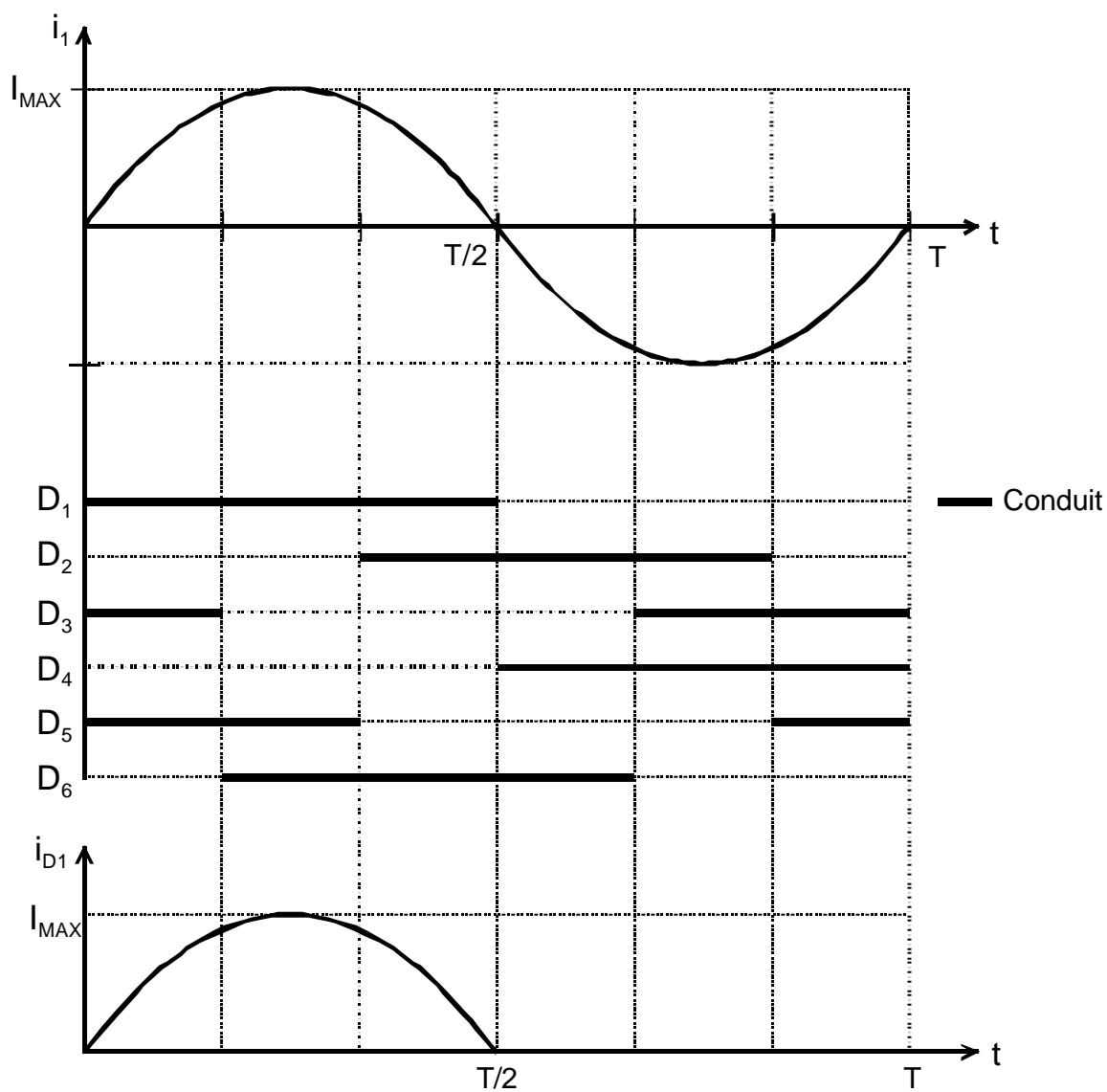
# DOCUMENT RÉPONSE 6

QC.18 et QC.19



# DOCUMENT RÉPONSE 7

QC.38



## ÉTUDE D'UN SYSTÈME INDUSTRIEL

### Option B : électrotechnique et électronique de puissance

#### COMMENTAIRES DU JURY

##### **Partie A : contexte industriel et pédagogique**

La découverte du contexte de l'application a été abordée par la majorité des candidats. Les calculs scientifiques se rapportant aux problèmes de mécanique n'ont été traités que trop superficiellement ; Les réflexions proposées autour de la pédagogie associée au support industriel n'ont pas suscité, malheureusement, un intérêt particulier de la part d'un grand nombre de candidats. En ce qui concerne le questionnement relatif au mesurage, il a été constaté une méconnaissance des méthodes et moyens de mesurage adaptés au contexte qui s'est traduite par peu de réponses et peu d'intérêt de la part des candidats.

##### **Partie B : étude du fonctionnement de l'alternateur en vue de la préparation d'une simulation**

Cette partie qui faisait le lien entre l'objet technologique et son modèle a été abordée par la majorité des candidats. Les règles de base du magnétisme ne sont connues que par la moitié des candidats. Certains ne savent pas appliquer l'outil mathématique aux calculs technologiques. Trop de candidats n'ont pas traité convenablement l'étude du bobinage proposé qui était pourtant élémentaire. Les diagrammes vectoriels qui ont été établis ne sont pas correctement exploités. Les relations de base sur les puissances en triphasé doivent être connues.

##### **Partie C : étude du convertisseur statique et de sa commande**

Un grand nombre de candidats a traité correctement cette partie. On relève toutefois des formes d'onde fantaisistes pour l'étude du fonctionnement en onduleur ainsi qu'un manque de connaissances technologiques relatives aux semi-conducteurs de puissance (température limite de fonctionnement, structure de la commande rapprochée, calcul des pertes à la commutation). Les candidats pouvaient obtenir un certain nombre de points en traitant davantage les questions ne nécessitant pas de calculs.