

**Corrigé de l'épreuve de conception préliminaire d'un système, d'un procédé  
ou d'une organisation**

Partie A - DIMENSIONNEMENT DE L'INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE

<p>Q1 – Potentiel photovoltaïque Energie annuelle produite = Surface x irradiation moyenne x nombre de jours x rendement <math>E_{\text{annuelle}} = 9 \cdot 9 \cdot 3,67 \cdot 365 \cdot 0,14 = 15,2 \text{MWh}</math></p>
<p>Q2 – Puissance crête <math>P_{\text{max}} = 36 \cdot 250 = 9 \text{kW}</math></p>
<p>Q3 – Signification des caractéristiques du PV <math>U_{\text{OC}}</math> : Tension à vide <math>I_{\text{CC}}</math> : Courant de court circuit <math>U_{\text{mpp}}</math> : Tension pour le point de puissance maximum <math>I_{\text{mpp}}</math> : Courant pour le point de puissance maximum Voir DR1</p>
<p>Q4 – Conditions de mesure Les grandeurs caractéristiques d'un PV sont réalisées dans des conditions de test standard à savoir : Irradiation de <math>1000 \text{W/m}^2</math> Température de <math>25^\circ\text{C}</math> Air masse de 1,5 La puissance maximale peut être dépassée si l'irradiation est <math>&gt; 1000 \text{W/m}^2</math> ou si la température devient <math>&lt; 25^\circ\text{C}</math>. On admet en général un dépassement possible de 25%.</p>
<p>Q5 – DR1</p>
<p>Q6 – DR2</p>
<p>Q7 – DR2</p>
<p>Q8 – Intérêt de plusieurs entrées MPPT Disposer de plusieurs entrées MPPT permet de connecter à un même onduleur plusieurs champs photovoltaïques de caractéristiques différentes : orientations, types et nombre de panneaux, tout en pouvant rechercher séparément le point de puissance maximal pour chaque champ.</p>
<p>Q9 – Différentes connexions possibles Plusieurs cas sont envisageables :</p> <p>(1) – 18 panneaux en série sur chaque onduleur (2 entrées MPPT sont utilisées)          → <math>U_{\text{oc}} = 18 \cdot 37,8 = 680 \text{V}</math> : Trop élevé peut passer au dessus de 700v si la température passe en dessous de <math>25^\circ\text{C}</math>          → <math>I_{\text{MPP}} = 8,25 \text{A}</math> : ok</p> <p>(2) – 9 panneaux en série sur une entrée MPPT d'un onduleur (2x2 entrées MPPT sont utilisées)          → <math>U_{\text{oc}} = 9 \cdot 37,8 = 340 \text{V}</math> : ok          → <math>I_{\text{MPP}} = 8,25 \text{A}</math> : ok</p>

(3) – 6 panneaux en série sur une entrée MPPT d'un onduleur 2x3 entrées MPPT sont utilisées

→  $U_{oc} = 6.37,8 = 227V$  : Tension trop proche de la limite basse de la plage de tracking du MPPT. Il peut y avoir des problèmes si la température  $> 25^{\circ}C$ .

→  $I_{MPP} = 8,25A$  : ok

La mise en parallèle de panneaux sur une entrée MPPT ne présente pas d'intérêt car il est plus intéressant d'utiliser toutes les entrées MPPT.

La solution retenue sera donc la solution (2). La puissance en entrée de chaque onduleur sera de :  $18 \cdot 250 = 4500W < 5400W$  autorisés

Q10 – Rôle de la diode Schottky

Cette diode Schottky aussi appelée diode de by-pass est là pour court-circuiter une série de cellules qui pourraient être ombrées ou moins irradiées.

C'est une diode Schottky en raison de la faible tension de seuil que propose cette technologie de diode limitant ainsi les pertes lorsque cette diode est passante.

Q11 – Caractéristique du panneau – DR3

Q12 – Caractéristique du panneau en présence d'ombrage – DR3

Q13 – Caractéristique  $p_{pv}(v_{pv})$  du panneau en présence d'ombrage – DR3

Q14 –  $I_0$  du modèle équivalent de la cellule

$$i_{cell} = I_{cc} - I_0 \left[ e^{\frac{v_{cell}}{\alpha}} - 1 \right] \text{ avec } \alpha = \frac{K \cdot T}{q} = 25mV \text{ et } I_{cc} = 8,3A \text{ donc } I_0 = 2,77 \cdot 10^{-10}A$$

Q15 – Point de fonctionnement des cellules ombrées et non ombrées

On appelle  $v_{cellombre}$  et  $i_{cellombre}$  la tension et le courant d'une cellule ombrée et  $v_{cell}$  et  $i_{cell}$  la tension et le courant d'une cellule non ombrée.

Il vient  $v_{cellombre} + 19 \cdot v_{cell} = 0$  On considère la tension de seuil de la Schottky nulle

D'autre part,  $i_{cellombre} = i_{cell}$

$$\text{Donc : } I_{cc} - I_0 \left[ e^{\frac{v_{cell}}{\alpha}} - 1 \right] = I_{ccombre} - I_0 \left[ e^{\frac{v_{cellombre}}{\alpha}} - 1 \right]$$

$$I_{ccombre} = 0,4 I_{cc} \text{ (cellule ombrée à 60\%)} \text{ et } v_{cellombre} = -19 \cdot v_{cell}$$

$$\text{D'où : } I_{cc} - I_0 \left[ e^{\frac{v_{cell}}{\alpha}} - 1 \right] = 0,4 \cdot I_{cc} - \underbrace{I_0 \left[ e^{\frac{-19v_{cell}}{\alpha}} - 1 \right]}_{\approx 0}$$

$$\text{Il vient : } v_{cell} = 0,61V \text{ et } i_{cell} \approx I_{ccombre} = 3,32A$$

Q16 – Puissances dans les cellules

$$P_{cellombre} = -19 \cdot 0,61 \cdot 3,32 = -38,5W$$

$$P_{cell} = 0,61 \cdot 3,32 = 2,03W$$

La puissance fournie par les cellules non ombrées est absorbée par la cellule ombrée qui devient réceptrice. La puissance de 38,5W est relativement importante en raison du faible ombrage.

Lorsque celui-ci augmente le courant de court-circuit baisse diminuant la puissance dissipée. Sans diode de by-pass cette puissance aurait été plus importante et aurait pu conduire à la destruction de la cellule ombrée.

Q17 – Tension inverse sur la cellule ombrée

$$V_{\text{cellombre}} = -19,0,61 = -11,6V$$

Dans ce cas (20 cellules) cette tension resta assez éloignée de la tension de claquage inverse. Toutefois, on voit que l'on ne pourrait pas se contenter d'une diode par panneau.

## Partie B - ONULEUR PHOTOVOLTAIQUE

Q18 – Allure des tensions – DR5

Q19 – Loi de variation de  $\beta(\omega t)$  et expression de  $\langle v_c(\omega t) \rangle$

$$\beta(\omega t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{\hat{m}}{\hat{r}ig} \sin(\omega t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} r \cdot \sin(\omega t)$$

$$\langle v_c(\omega t) \rangle = \beta(\omega t) \cdot \frac{E_c}{2} - (1 - \beta(\omega t)) \frac{E_c}{2} = \frac{E_c}{2} r \cdot \sin(\omega t)$$

Q20 – Valeur minimale de  $E_c$

$$\langle v_c(\omega t) \rangle = 230\sqrt{2} \cdot \sin(\omega t)$$

$$r_{\text{max}} = 1$$

$$\text{donc } E_c \geq 2 \cdot 230\sqrt{2} = 650V$$

Q21 – Profondeur de modulation pour  $E_c = 800V$

$$r = 0,81$$

Q22 –  $i_{TA}$  et  $i_{DA}$  – DR6

Q23 – Démontrer que :

$$\langle i_{TA} \rangle = \hat{i}_{SR} \cdot \left( \frac{r}{8} + \frac{1}{2\pi} \right), I_{TA\text{eff}} = \hat{i}_{SR} \cdot \sqrt{\frac{1}{8} + \frac{r}{3\pi}}$$

$$\langle i_{DA} \rangle = \hat{i}_{SR} \cdot \left( -\frac{r}{8} + \frac{1}{2\pi} \right), I_{DA\text{eff}} = \hat{i}_{SR} \cdot \sqrt{\frac{1}{8} - \frac{r}{3\pi}}$$

Sur une période de découpage on considère que  $i_{SR}$  est constant donc :

$$i_{TA}(\omega t) = \beta(\omega t) i_{SR}(\omega t)$$

donc :

Dans le transistor :

$$\langle i_{TA} \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \beta(\omega t) \cdot i_{SR}(\omega t) \cdot d\omega t = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \frac{1}{2} (1 + r \cdot \sin(\omega t)) \cdot \hat{i}_{SR} \cdot \sin(\omega t) \cdot d\omega t$$

$$\langle i_{TA} \rangle = \hat{i}_{SR} \cdot \left( \frac{r}{8} + \frac{1}{2\pi} \right)$$

De la même façon

$$I_{TA\text{eff}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \beta(\omega t) (i_{SR}(\omega t))^2 \cdot d\omega t = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \left( \frac{1}{2} (1 + r \cdot \sin(\omega t)) \cdot \hat{i}_{SR} \cdot \sin(\omega t) \right)^2 \cdot d\omega t = \frac{1}{4\pi} \hat{i}_{SR}^2 \cdot \left( \frac{\pi}{2} + \frac{4}{3} r \right)$$

$$\text{donc } I_{TAeff} = \hat{i}_{SR} \cdot \sqrt{\frac{1}{8} + \frac{r}{3\pi}}$$

Dans la diode :

$$\langle i_{DA} \rangle = -\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (1 - \beta(\omega t)) \cdot i_{SR}(\omega t) \cdot d\omega t \quad \text{donc } \langle i_{DA} \rangle = -\hat{i}_{SR} \cdot \left( -\frac{r}{8} + \frac{1}{2\pi} \right)$$

$$I_{DAeff}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (1 - \beta(\omega t)) (i_{SR}(\omega t))^2 \cdot d\omega t = \frac{1}{4\pi} \hat{i}_{SR}^2 \cdot \left( \frac{1}{2\pi} - \frac{4}{3}r \right) \quad \text{donc } I_{DAeff} = \hat{i}_{SR} \cdot \sqrt{\frac{1}{8} - \frac{r}{3\pi}}$$

$$\hat{i}_{SR} = \sqrt{2} \cdot \frac{5000}{230} = 30,7A$$

$$\langle i_{TA} \rangle = 8A, I_{TAeff} = 14,1A$$

$$\langle i_{DA} \rangle = 1,77A, I_{DAeff} = 6,1A$$

Q24 – Contraintes sur les interrupteurs – DR7

Q25 – Courants  $i_{C1}$  et  $i_{C2}$  – DR8

Q26 – Valeur des capacités  $C_1$  et  $C_2$

$$i_{Ci} = C_i \frac{dv_{Ci}}{dt} = \frac{\hat{i}_{SR}}{2} \sin(\omega t) \quad \text{pour } i=1..2$$

$$\Rightarrow v_{Ci} = \frac{\hat{i}_{SR}}{2C_i\omega} \cos(\omega t)$$

$$\Rightarrow \Delta v_{Ci} = \frac{\hat{i}_{SR}}{C_i\omega} = 0,05 \frac{800}{2} = 20V$$

$$\Rightarrow C_1 = C_2 = 4900\mu F$$

Q27 – Expression de l'ondulation de courant dans l'inductance du filtre de sortie de l'onduleur

$$\langle v_{SR}(\omega t) \rangle = E_c \left( \beta(\omega t) - \frac{1}{2} \right)$$

$$L_s \cdot \Delta i_{LS} = \left( \frac{E_c}{2} - \langle v_{SR}(\omega t) \rangle \right) \cdot \Delta T$$

$$\Delta i_{LS} = \frac{E_c}{L_s F_{Do}} (1 - \beta(\omega t)) \beta(\omega t)$$

Q28 – Valeur de l'inductance du filtre limitant l'ondulation à 5% du courant crête

$\Delta i_c$  est maximale pour  $\beta(\omega t) = 0,5$

$$\Delta i_{cmax} = \frac{E_c}{L_s F_{Do}} \cdot \frac{1}{4} = 30,7 \cdot 0,05 = 1,5A$$

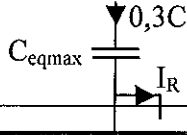
$$L_s = 6,7mH$$

Q29 – Fonction de transfert du filtre de sortie et valeur de  $C_s$

$\frac{i_{SR}(p)}{v_c(p)} \approx \frac{1}{L_r p} \frac{1}{1 + C_s L_s p^2}$ <p>La fréquence naturelle de ce filtre est <math>F_n = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{C_s L_s}} = 2\text{kHz} \Rightarrow C_s = 945\text{nF}</math></p>
<p>Q30 – Pertes par conduction dans les diodes les IGBT de l'onduleur – DR7 D'après la figure 6 de l'annexe 3 (documentation IHW40T120) : <math>V_{CE0} = 0,9\text{V}</math> et <math>r_{Ti} = 35\text{m}\Omega</math> D'après la figure 27 de l'annexe 3 <math>V_{D0} = 1\text{V}</math> et <math>r_{Td} = 40\text{m}\Omega</math> <math>P_{\text{condIGBT}} = V_{CE0} \langle I_{TA} \rangle + r_{Ti} I_{TA\text{eff}}^2 = 14,15\text{W}</math> <math>P_{\text{condDiode}} = V_{D0} \langle I_{DA} \rangle + r_{Td} I_{DA\text{eff}}^2 = 3,26\text{W}</math></p>
<p>Q31 – Energie de commutation Pour <math>I_C</math> compris entre 10 et 40A on peut approximer <math>E_{TS}(I_C)</math> à une droite passant par l'origine (Figure 13 annexe 3) dont on peut considérer <math>E_{TS}</math> proportionnelle à <math>I_C</math>. Le coefficient de proportionnalité est alors : <math>K_{E/I} = 0,25\text{mJ/A}</math> à 600V La figure 16 de l'annexe 3 nous montre que <math>E_{TS}</math> est proportionnel à la tension <math>V_{CE}</math> <math>K_{E/V} = 19\mu\text{J/V}</math> à 40A</p>
<p>Q32 – Energie de commutation proportionnelle au courant moyen commuté</p> <p>Sur une période de commutation <math>E_{\text{comTD0}} = K_{E/I} \cdot \langle i_{LS}(t) \rangle_{TD0} \cdot \frac{800}{600}</math></p> <p>Sur une période de commutation basse fréquence <math>E_{\text{comTr}} = \int_0^{\frac{T_r}{2}} K_{E/I} \cdot \langle i_{LS}(t) \rangle_{TD0} \cdot \frac{800}{600} \cdot F_{D0} dt</math></p> <p><math>E_{\text{comTr}} = K_{E/I} \frac{F_{D0}}{F_r} \cdot \frac{800}{600} \cdot \frac{1}{T_r} \int_0^{\frac{T_r}{2}} \langle i_{LS}(t) \rangle_{TD0} dt = K_{E/I} \frac{F_{D0}}{F_r} \cdot \frac{800}{600} \cdot \langle i_{LS} \rangle_{Tr}</math></p> <p>L'énergie de commutation est bien proportionnelle au courant moyen commuté <math>\langle i_{LS} \rangle_{Tr}</math>.</p>
<p>Q33 – Pertes par commutation d'un ensemble IGBT + Diode <math>P_{\text{com}} = F_r \cdot E_{\text{com}} = 65\text{W}</math></p>
<p>Q34 – Pertes totales <math>P_{\text{Totale}} = (14,15 + 3,2 + 65)2 = 165\text{W}</math> <math>\eta = \frac{5000}{5165} = 96,8\%</math></p>
<p>Q35 – Inductance <math>L_{Ei}</math> permettant de limiter l'ondulation du courant d'entrée <math>L_{Ei} \cdot \Delta I_{MPPi} = E_{MPPi} \cdot \alpha_{MPPi} \cdot T_{D0}</math> donc <math>L_{Ei} = \frac{E_c (1 - \alpha_{MPPi}) \alpha_{MPPi}}{\Delta I_{MPPi} \cdot F_{D0}}</math> On se place à <math>\alpha_{MPPi} = 0,5 \Rightarrow E_{MPPi} = 400\text{V}</math> On obtient alors <math>L_{Ei} = 10\text{mH}</math> pour <math>\Delta I_{MPPi} = 1\text{A}</math></p>
<p>Q36 – Courant d'entrée <math>I_{MPPi}</math> et rapport cyclique <math>\alpha_{MPPi}</math> <math>E_{MPPi} = 450\text{V}</math> donc <math>\alpha_{MPPi} = 0,4375</math> <math>\Delta I_{MPPi} = 0,98\text{A}</math> et <math>\langle i_{MPPi} \rangle = 4\text{A}</math> on est en conduction continue.</p>

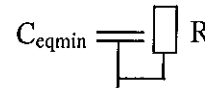
<p>Q37 – Courants <math>I_{TEi}</math> et <math>I_{DEi}</math></p> $\langle i_{TEi} \rangle = \alpha_{MPPi} \cdot \langle i_{MPPi} \rangle = 1,75A$ $\langle i_{DEi} \rangle = (1 - \alpha_{MPPi}) \cdot \langle i_{MPPi} \rangle = 2,1A$ <p>En considérant l'ondulation de courant pour le calcul des valeurs efficaces il vient :</p> $I_{TEieff} = \sqrt{\alpha_{MPPi} \left( I_0^2 + I_0 \cdot \Delta I_{MPPi} + \frac{\Delta I_{MPPi}^2}{3} \right)} = 2,65A \text{ où } I_0 \text{ est la valeur de } I_{MPPi} \text{ en début de période}$ $I_{DEieff} = \sqrt{(1 - \alpha_{MPPi}) \left( I_0^2 + I_0 \cdot \Delta I_{MPPi} + \frac{\Delta I_{MPPi}^2}{3} \right)} = 3A$
<p>Q38 – Pertes dans les IGBT et dans les diodes</p> $P_{condIGBT} = V_{CE0} \cdot \langle I_{TEi} \rangle + r_{Tt} \cdot I_{TEieff}^2 = 2,45W$ $P_{condDiode} = V_{D0} \cdot \langle I_{DEi} \rangle + r_{Td} \cdot I_{DEieff}^2 = 2,34W$ $P_{Commut} = 2mJ \cdot 20kHz = 40W$ <p>Pertes totales = <math>3(2,45 + 2,34 + 40) = 134W</math></p>
<p>Q39 – Pertes dans les inductances <math>L_{EI}</math></p> $P_L = R_{DC} \cdot \langle I_{DC} \rangle^2 + R_{AC} \cdot I_{ACeff}^2$ $\langle I_{DC} \rangle = \langle I_{MPPi} \rangle = 4A$ $I_{AC} = \Delta I_{MPPi} \cdot \frac{1}{2\sqrt{3}} = 4A \text{ Valeur efficace d'un signal triangulaire d'amplitude } \Delta I_{MPPi}$ $P_L = 1W$
<p>Q40 – Pertes et rendement de l'onduleur</p> <p>Pertes = <math>134 + 3 + 165 = 303W</math></p> $\eta = 94,3\%$

Partie C – PACK BATTERIE et BMS

<p>Q41 – Constitution du pack batterie</p> <p>La capacité <math>C</math> d'un élément de la figure 6 est <math>C = 100Ah</math></p> <p>Soit une énergie stockée de <math>3,2 \cdot 100 = 320Wh</math></p> <p>Il faudra donc 16 éléments de ce type pour réaliser une batterie de 5kWh.</p> <p>Afin d'obtenir une tension d'environ 24V on place 8 éléments de ce type en parallèle avec 8 autres. La tension sera alors de 25,6V</p>
<p>Q42 – Capacité équivalente <math>C_{eq}</math> à un élément</p> $Q = C_{eq} \cdot \Delta U$ $\Delta U = 3,6 - 3,35 = 0,25V$ $Q = i \cdot t = 0,8 \cdot 100 = 80Ah \text{ soit } 288kCoulomb$ $C_{eq} = \frac{288 \cdot 10^3}{0,25} = 1,15 \cdot 10^6 F$
<p>Q43 – Résistance d'équilibrage</p> <p>L'écart maximal entre 2 cellules est de 10%</p> <p>Soit <math>C_{eqmax} = 1,27 \cdot 10^6 F</math> et <math>C_{eqmin} = 1,09 \cdot 10^6 F</math></p> <div style="text-align: right;">  </div>

Pour que l'on est le même  $\Delta V$  sur les deux éléments il faut :

$$I_R = C_{eq\max} \frac{\Delta V}{\Delta T} = C_{eq\min} \frac{\Delta V}{\Delta T}$$



$$I_R = (C_{eq\max} - C_{eq\min}) \frac{0,3C}{C_{eq\max}} = \left(1 - \frac{0,95}{1,05}\right) \cdot 0,3C = 2,86A$$

$$R = \frac{U_{cell}}{I_R} = 1,22\Omega$$

Q44 – Energie perdue dans R

Puissance dans R :  $P_R = R \cdot I_R^2 = 10W$

Energie dissipée dans R :  $E_R = P_R \cdot T_{charge}$ .  $T_{charge}$  : temps de charge de la batterie et de mise en service de la résistance

$$I_{charge} = 0,3C = 30A = C_{eq\max} \frac{\Delta U}{T_{charge}} = C_{eq\max} \frac{3,65 - 3,5}{T_{charge}}$$

d'où :  $T_{charge} = 1,76h$  et  $E_R = 63kJ = 17,6Ah$

Q45 – Energie récupérée lors de la décharge

C'est l'élément le plus faible qui va se décharger le plus vite. Lorsque celui-ci sera déchargé il ne sera plus possible d'utiliser la batterie. On ne pourra donc récupérer que  $0,95 \cdot C$  par élément soit  $320 \cdot 0,95 \cdot 16 = 4864Wh$

Q46 – Tension  $U_{Co}$  aux bornes de  $C_o$

$$i_{Co} = \sum i_{Si} = \sum \frac{U_{ci} - U_{Co}}{R_S} = 0 \text{ donc } \sum (U_{ci} - U_{Co}) = 0 \text{ or } \sum U_{ci} = N \cdot U_{Co} \text{ avec } N \text{ nombre d'éléments}$$

d'où  $U_{Co} = \frac{\sum U_{ci}}{N}$  = valeur moyenne des  $U_{ci}$

Q47 – Puissance échangée

$$P_i = U_{ci} \cdot i_{Si} = U_{ci} \frac{U_{ci} - U_{Co}}{R_S} = \underbrace{\frac{(U_{ci} - U_{Co})^2}{R_S}}_{\text{Pertes}} + \underbrace{U_{Co} \frac{U_{ci} - U_{Co}}{R_S}}_{\text{Puissance délivrée à } C_o}$$

Q48 – Equilibrage naturel

Si  $U_{ci} > U_{Co}$  alors  $P_i > 0$ , si  $U_{ci} < U_{Co}$  alors  $P_i < 0 \Rightarrow$  on a un transfert d'énergie du plus chargé vers le moins chargé. Il y a donc un équilibrage naturel entre les cellules.

Q49 – Fonctionnement lors d'une dispersion de  $\pm 5\%$  entre les cellules

On est dans les mêmes conditions que pour la question Q43.

Pour le convertisseur relié à l'élément le plus faible

$$i_{Si} = -\left(0,3C - \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \cdot 0,3C\right) = -0,029C = -2,9A$$

Pour les autres convertisseurs  $i_{Si} = \frac{0,029C}{N} = 0,36A$

Q50 – Ce fonctionnement est possible lors de la décharge. L'énergie récupérée est alors la somme de toutes les énergies stockées moins les pertes.

Si le rendement des convertisseurs est de 90% alors les pertes dans ces convertisseurs sera de  $0,9^2$  énergie échangée entre les éléments.

Cette énergie échangée est de 10% de 100C soit 10C

Les pertes sont donc de  $10C \cdot 0,9^2 = 8,1C$

L'énergie récupérée est alors de  $(N-1)105C + 95C - 8,1C$

Partie D – CONVERTISSEUR DAB

Q51 – Allure des courants et tensions dans le transformateur – DR9

Q52 – Expression du courant  $i_{lf}(t)$

En prenant  $m = \frac{\text{tension primaire}}{\text{tension secondaire}}$

$$v_{lf}(t) = v_e(t) - m \cdot v_s(t) \text{ et } v_{lf}(t) = L_f \frac{di_{lf}(t)}{dt} \quad 0 \leq t \leq \delta T_d : i_{lf}(t) = i_{lf}(0) + \frac{V_e + mV_s}{L_f} \cdot t,$$

$$i_{lf}(\delta T_d) = i_{lf}(0) + \frac{V_e + mV_s}{L_f} \cdot \delta T_d$$

$$\delta T_d \leq t \leq \frac{T_d}{2} : i_{lf}(t) = i_{lf}(\delta T_d) + \frac{V_e - mV_s}{L_f} \cdot (t - \delta T_d),$$

$$i_{lf}\left(\frac{T_d}{2}\right) = i_{lf}(0) + \frac{T_d}{L_f} \left( \frac{1}{2} V_e + mV_s \left( 2\delta - \frac{1}{2} \right) \right)$$

$$\frac{T_d}{2} \leq t \leq \frac{T_d}{2} + \delta T_d : i_{lf}(t) = i_{lf}\left(\frac{T_d}{2}\right) + \frac{V_e + mV_s}{L_f} \cdot \left( t - \frac{T_d}{2} \right),$$

$$i_{lf}\left(\frac{T_d}{2} + \delta T_d\right) = i_{lf}(0) + \frac{T_d}{L_f} \left( V_e \left( \frac{1}{2} - \delta \right) + mV_s \left( \delta - \frac{1}{2} \right) \right)$$

$$\frac{T_d}{2} + \delta T_d \leq t \leq T_d : i_{lf}(t) = i_{lf}\left(\frac{T_d}{2} + \delta T_d\right) - \frac{V_e - mV_s}{L_f} \cdot \left( t - \frac{T_d}{2} - \delta T_d \right), \quad i_{lf}(T_d) = i_{lf}(0)$$

Q53 – Valeur moyenne et condition initiale de  $i_{lf}$

$$\langle i_{lf} \rangle = 0 \Rightarrow i_{lf}(0) = -i_{lf}\left(\frac{T_d}{2}\right) = -\frac{T_d}{2L_f} \left( \frac{1}{2} V_e + mV_s \left( 2\delta - \frac{1}{2} \right) \right)$$

Q54 – Allure des courants d'entrée et de sortie du convertisseur DAB – DR11

Q55 – Valeurs moyennes des courants d'entrée et de sortie du DAB

$$\langle i_e \rangle = 2 \left( \frac{i_{lf}(0) + i_{lf}(\delta T_d)}{2} \cdot \delta + \frac{i_{lf}(\delta T_d) + i_{lf}\left(\frac{1}{2} - \delta\right)}{2} \left( \frac{1}{2} - \delta \right) \right)$$

$$\langle i_e \rangle = \frac{2T_d}{L_f} mV_s \delta \left( \frac{1}{2} - \delta \right)$$

De la même façon on trouve :

$$\langle i_s \rangle = \frac{2T_d}{L_f} mV_e \delta \left( \frac{1}{2} - \delta \right)$$

On vérifie que  $P_e = P_s$  ce qui est normal car il n'y a pas de pertes dans cette étude.

Q56 – Puissance transmise  $P_{DAB}$

$$P_{DAB} = V_e \langle i_e \rangle = V_s \langle i_s \rangle = \frac{2T_d}{L_f} mV_s \cdot V_e \left( \delta \left( \frac{1}{2} - \delta \right) \right)$$



Cette puissance est nulle pour  $\delta = 0$  et  $\delta = \frac{T_d}{2}$  et maximale pour  $\delta = \frac{T_d}{4}$

$$P_{DABMax} = \frac{0,125T_d}{L_f} m' V_s \cdot V_e$$

La puissance maximale dépend du rapport  $\frac{T_d}{L_f}$ .

#### Q57 – Réversibilité

Ce convertisseur est symétrique et  $\delta$  peut varier de  $-\frac{T_d}{2}$  à  $\frac{T_d}{2}$ . Des valeurs de  $\delta < 0$  reviennent à permuter  $V_s$  et  $V_e$  dans les calculs précédents.

#### Q58 – Valeur de $L_f$

Dans le pire cas  $V_e = V_s = 2,4V$

$$\langle i_e \rangle = 2A \Rightarrow P = 4,8W = P_{DABMax} = \frac{0,125T_d}{L_f} m' V_s \cdot V_e$$

$$L_{fmax} = 300nH \text{ pour } F_d = 500kHz$$

#### Q59 – Point de fonctionnement

$$L_f = 100nH, m' = 1, P = 6W \Rightarrow \delta = 0,036$$

$$i_{lf}(0) = -2,16A$$

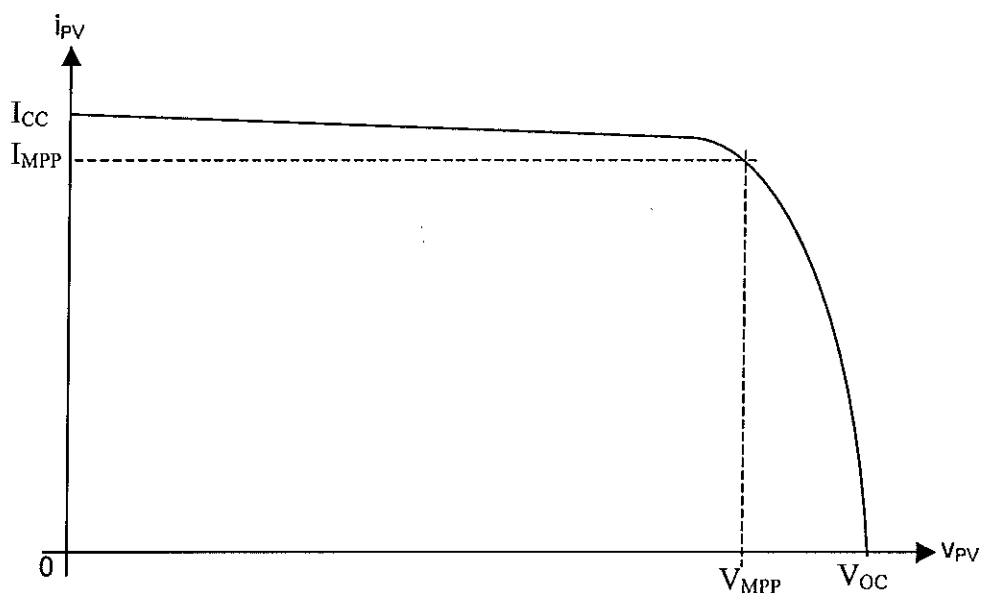
$$I_{lfaff}^2 = \frac{2}{T_d} \left[ \int_0^{\delta T_d} \left( i_{lf}(0) - \frac{2i_{lf}(0)}{\delta T_d} t \right)^2 dt + \int_{\delta^* T_d}^{T_d} (-i_{lf}(0))^2 dt \right]$$

$$I_{lfaff} = 3,01A = I_{1eff} = I_{2eff}$$

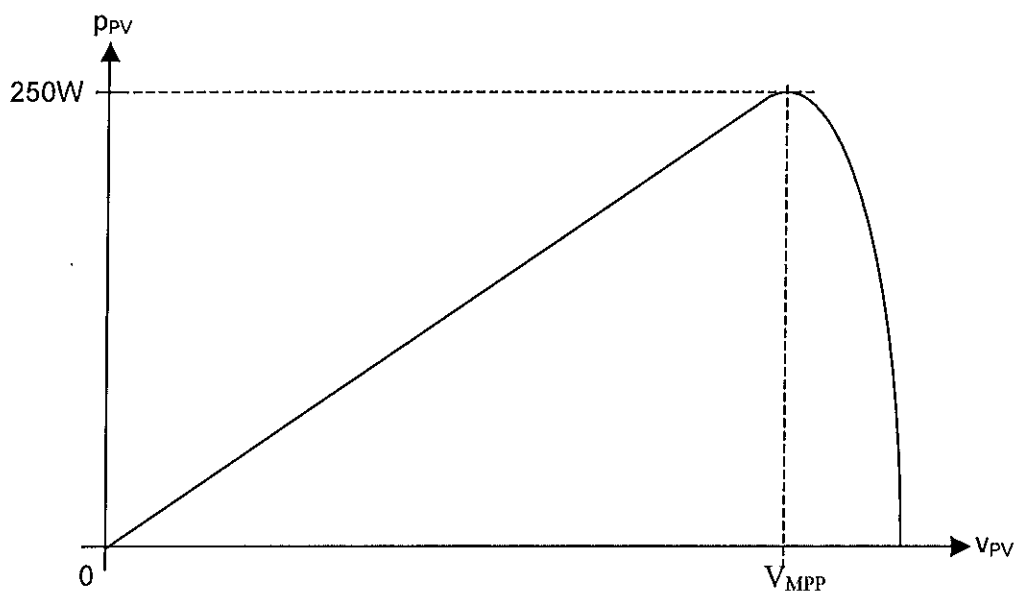
## Documents réponses

DR1 Caractéristique d'un panneau photovoltaïque SW 250 mono

Q3 : Caractéristique nominale  $i_{PV}(v_{PV})$  d'un panneau photovoltaïque SW 250 mono



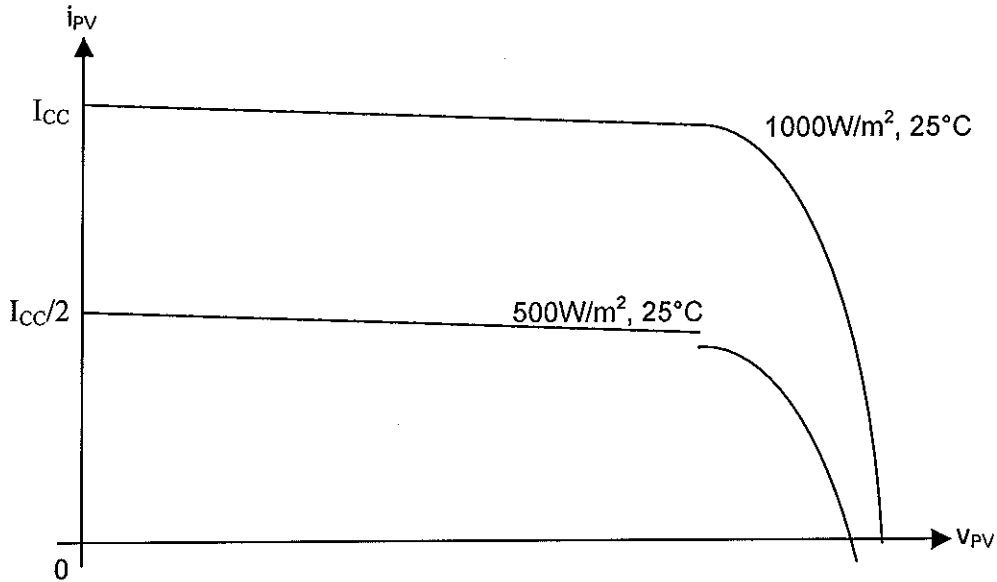
Q5 : Caractéristique nominale  $p_{PV}(v_{PV})$  d'un panneau photovoltaïque SW 250 mono



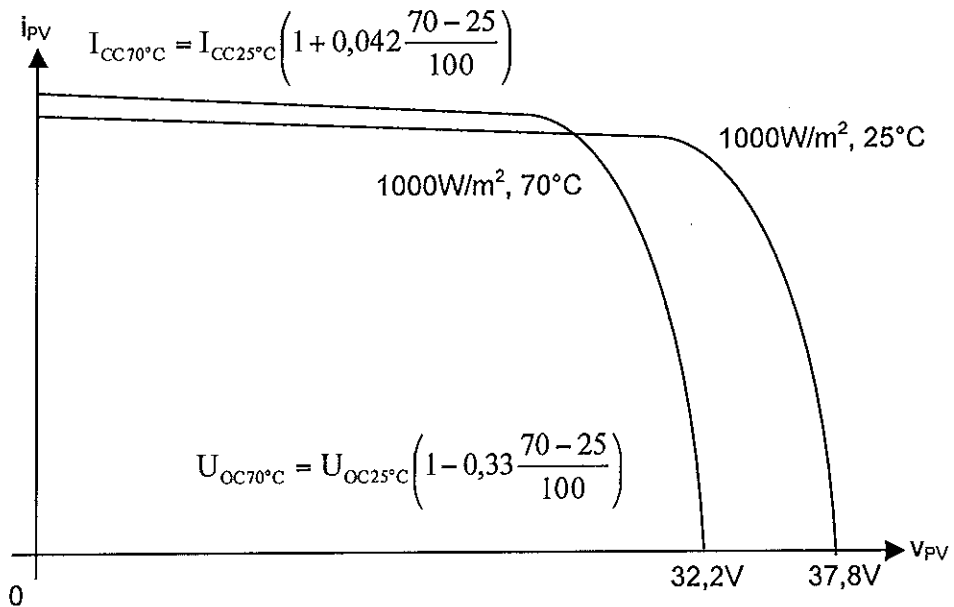
DR2 Page 1/2 Caractéristique d'un panneau photovoltaïque SW 250 mono

Q6 : Evolution des caractéristiques d'un panneau photovoltaïque SW 250 mono en fonction de l'irradiation et de la température.

Courbe a : Irradiation diminuée de 50%

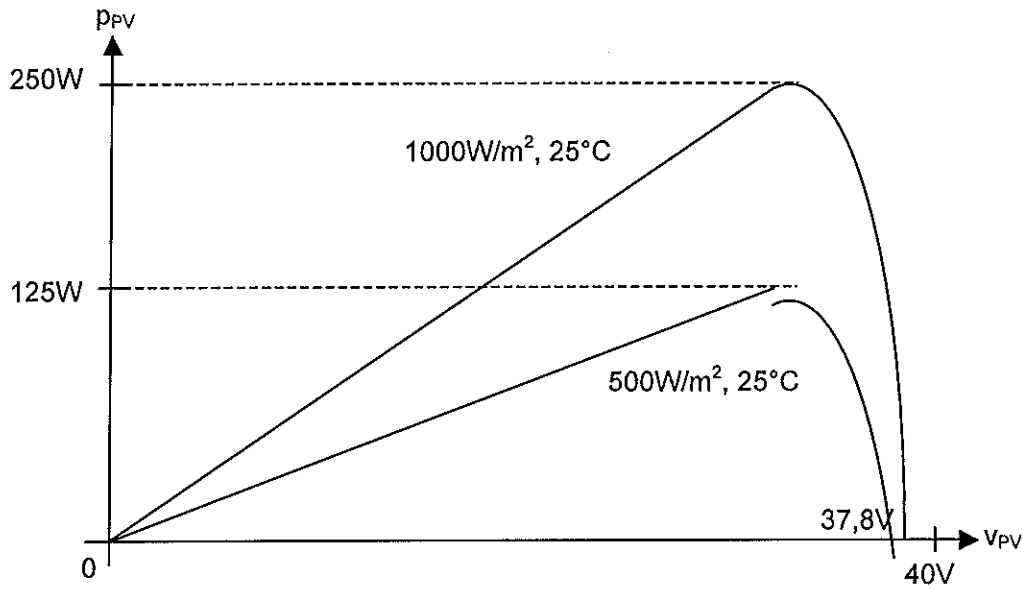


Courbe b : Température augmente à 70°C

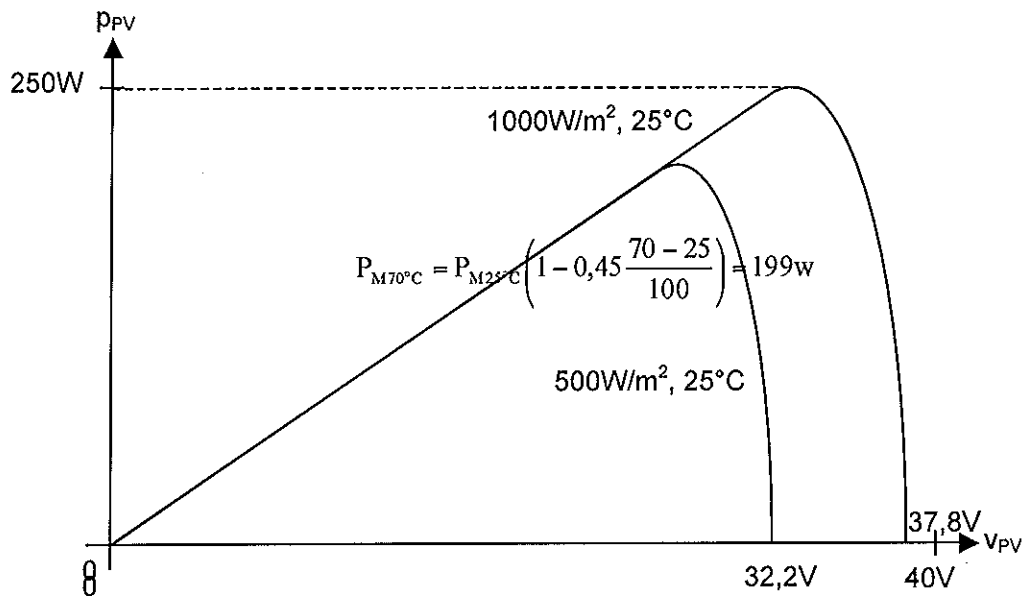


Q7 : Evolution de la caractéristique  $p_{PV}(V_{PV})$  :

Courbes c : Irradiation de 100% ( $1000W/m^2$ ) puis 50%



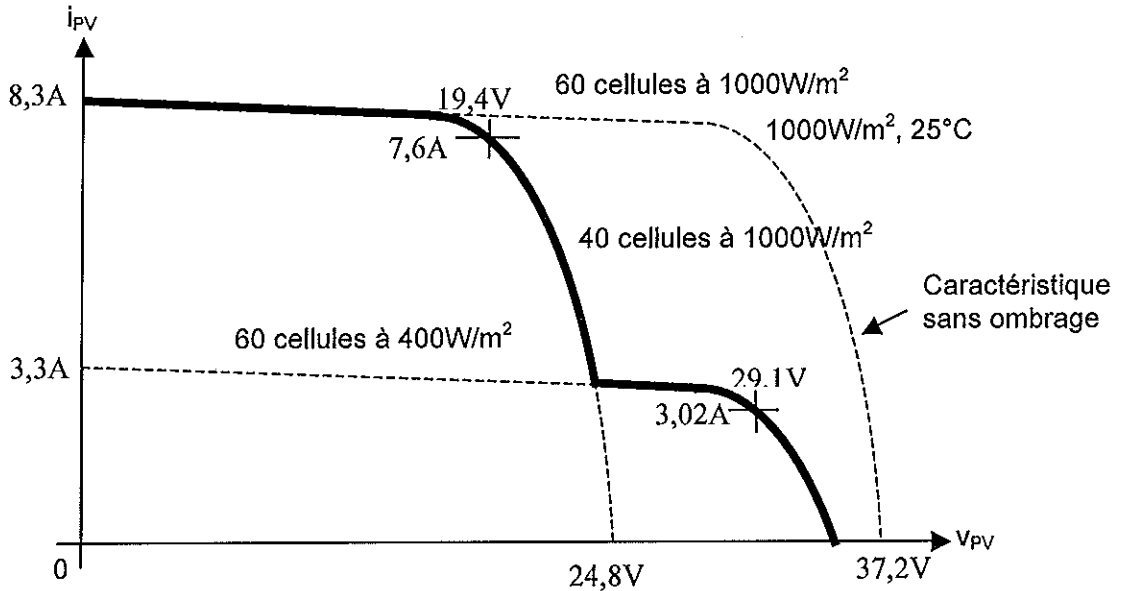
Courbes d : Température de 25°C puis de 70°C



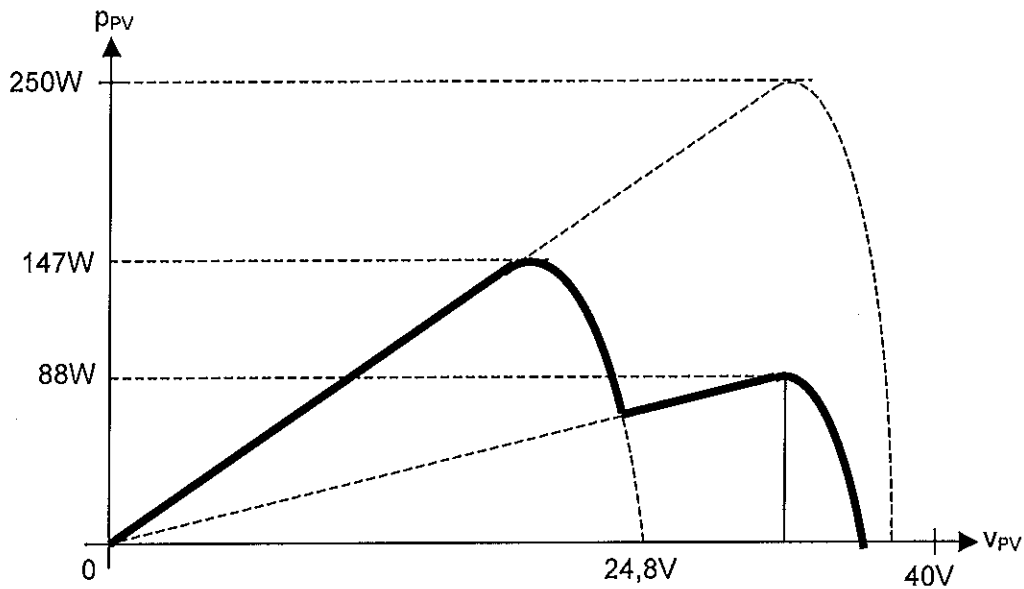
DR3 Effet des ombrages

Q11 : Caractéristique  $i_{PV}(v_{PV})$  d'un panneau photovoltaïque sans ombrage

Q12 : Caractéristique  $i_{PV}(v_{PV})$  d'un panneau photovoltaïque avec une cellule masquée à 60 %



Q13 : Caractéristique  $p_{PV}(v_{PV})$  d'un panneau photovoltaïque avec une cellule masquée à 60%



**DR4** Fonctionnement d'une branche de panneau photovoltaïque en présence d'ombrage.

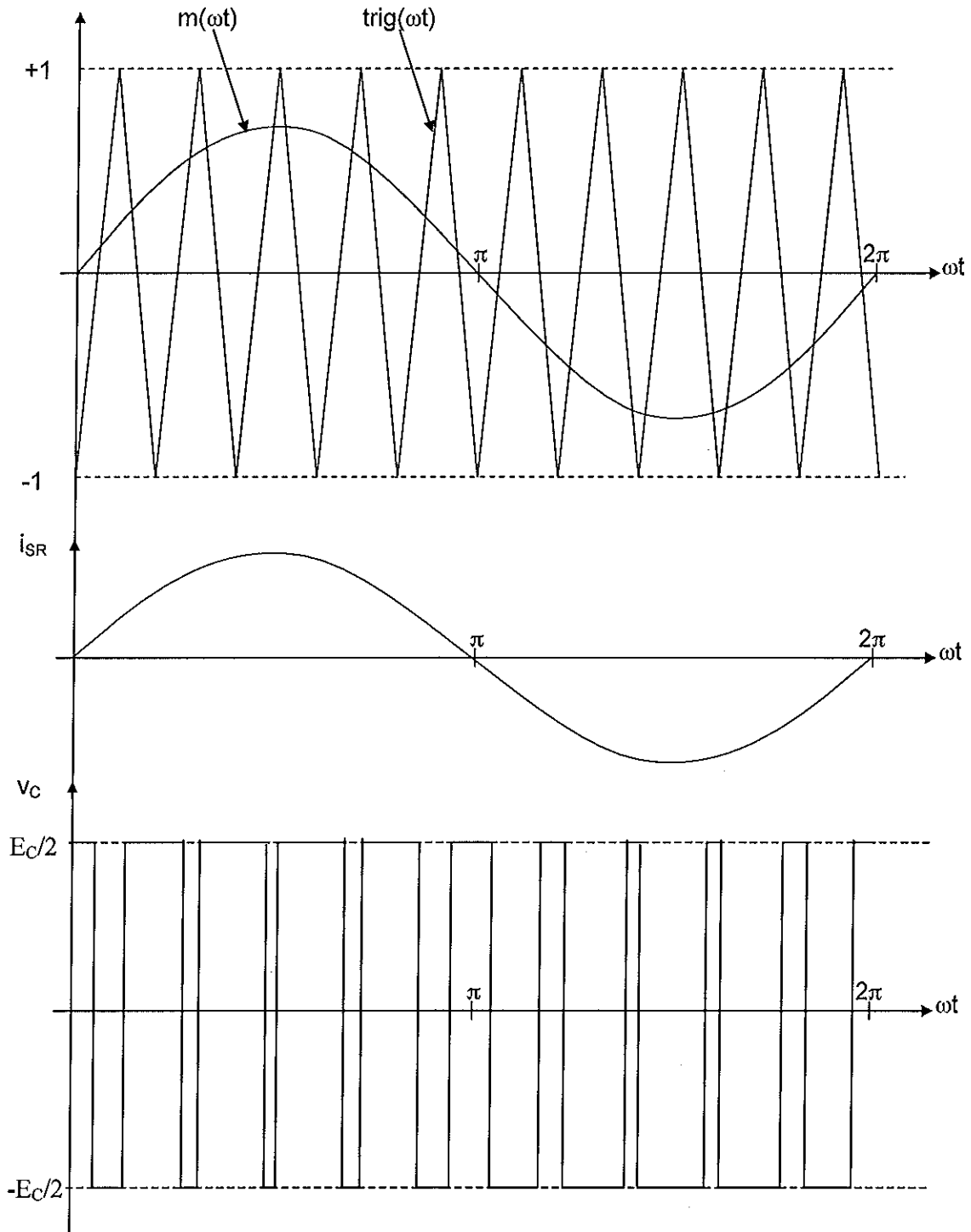
**Q15** : Tensions et courants traversant les cellules en présence d'ombrage lorsque la branche est court-circuitée.

**Q16** : Puissances fournies par les cellules en présence d'ombrage lorsque la branche est court-circuitée.

	<b>Cellule ombrée à 60%</b>	<b>Cellule éclairée à 100%</b>
<b><math>V_{cell}</math></b>	<b>-11,6V</b>	<b>0,61V</b>
<b><math>I_{cell}</math></b>	<b>3,32A</b>	<b>3,32A</b>
<b><math>P_{cell}</math></b>	<b>-38,5W</b>	<b>2,03W</b>

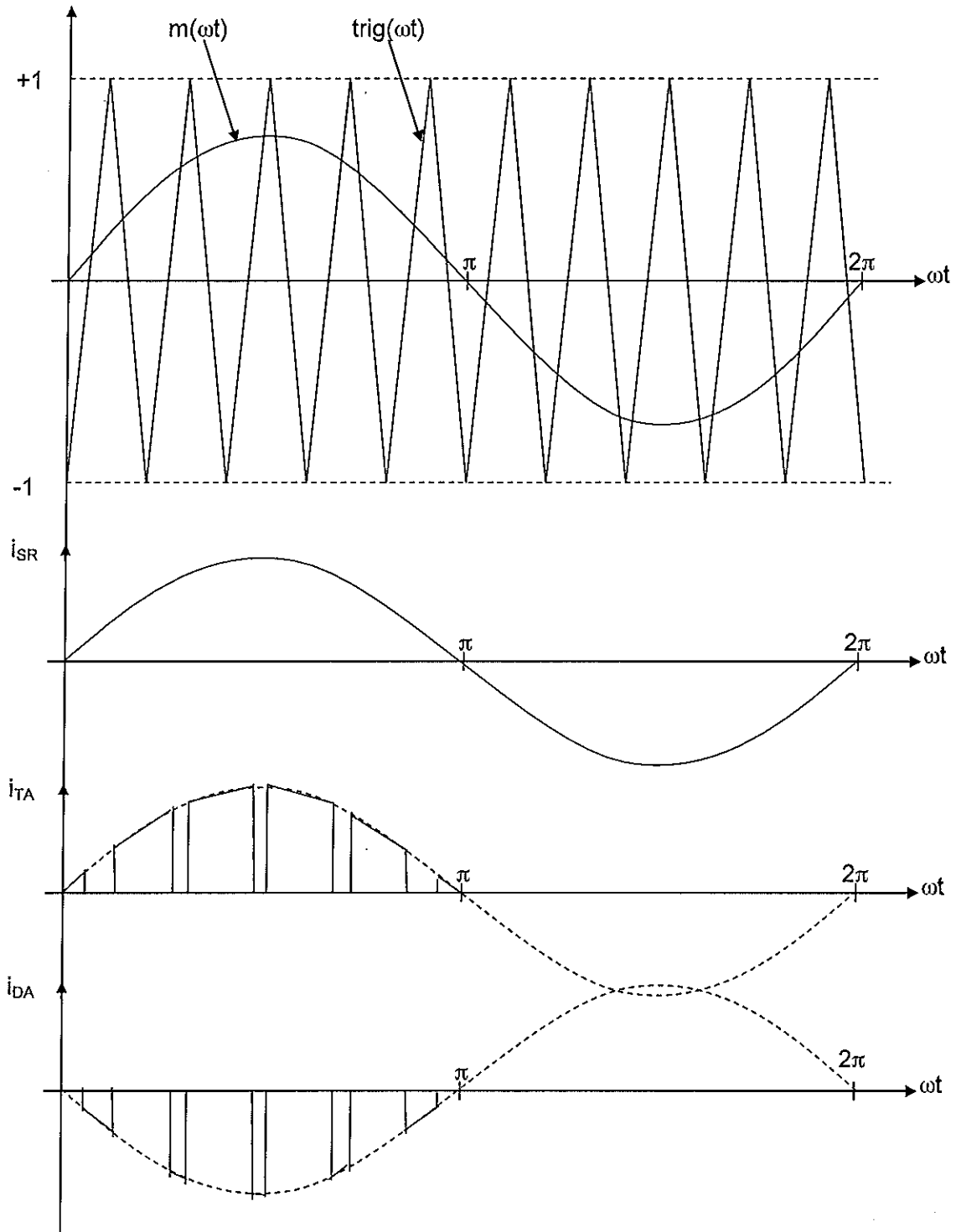
DR5 Onduleur MLI

Q18 : tracé de  $v_c(\omega t)$



DR6 Onduleur MLI

Q22 : Courants dans  $T_A$  et  $D_A$ .





DR7 : Onduleur MLI

Q24 : Contraintes sur les interrupteurs de l'onduleur

Q30 : Pertes par conduction

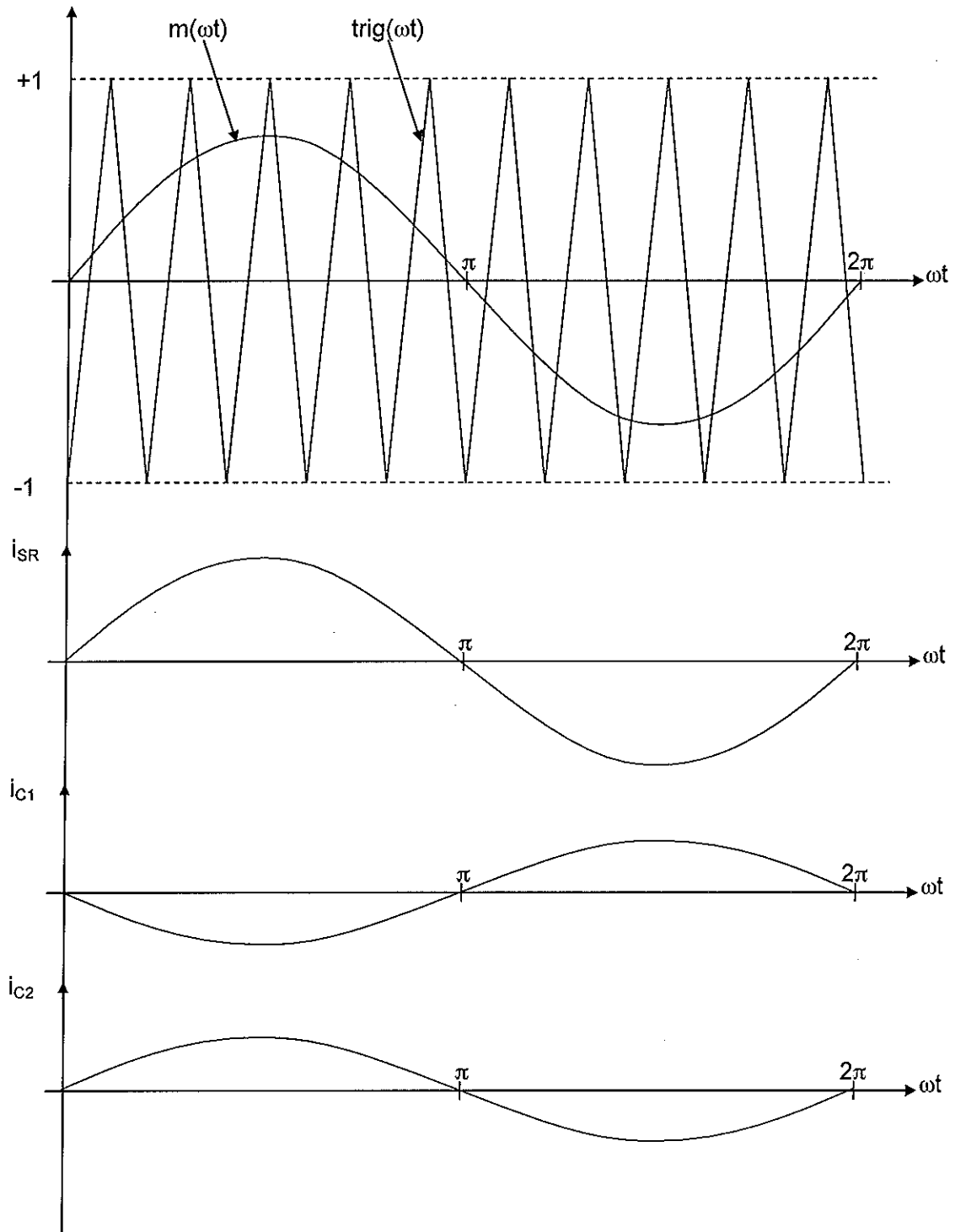
Q33 : Pertes par commutation

Q34 : Pertes totales

Interrupteur	Tension crête	Courant moyen	Courant efficace	Pertes par conduction	Pertes par commutation
IGBT T <sub>A</sub> , T <sub>B</sub>	800V	8A	14,1A	14,15W	65W
Diodes D <sub>A</sub> , D <sub>B</sub>	800V	1,77A	6,1A	3,26W	
Pertes totales onduleur	165W				

DR8 Onduleur MLI

Q25 : Courants dans  $C_1$  et  $C_2$ .



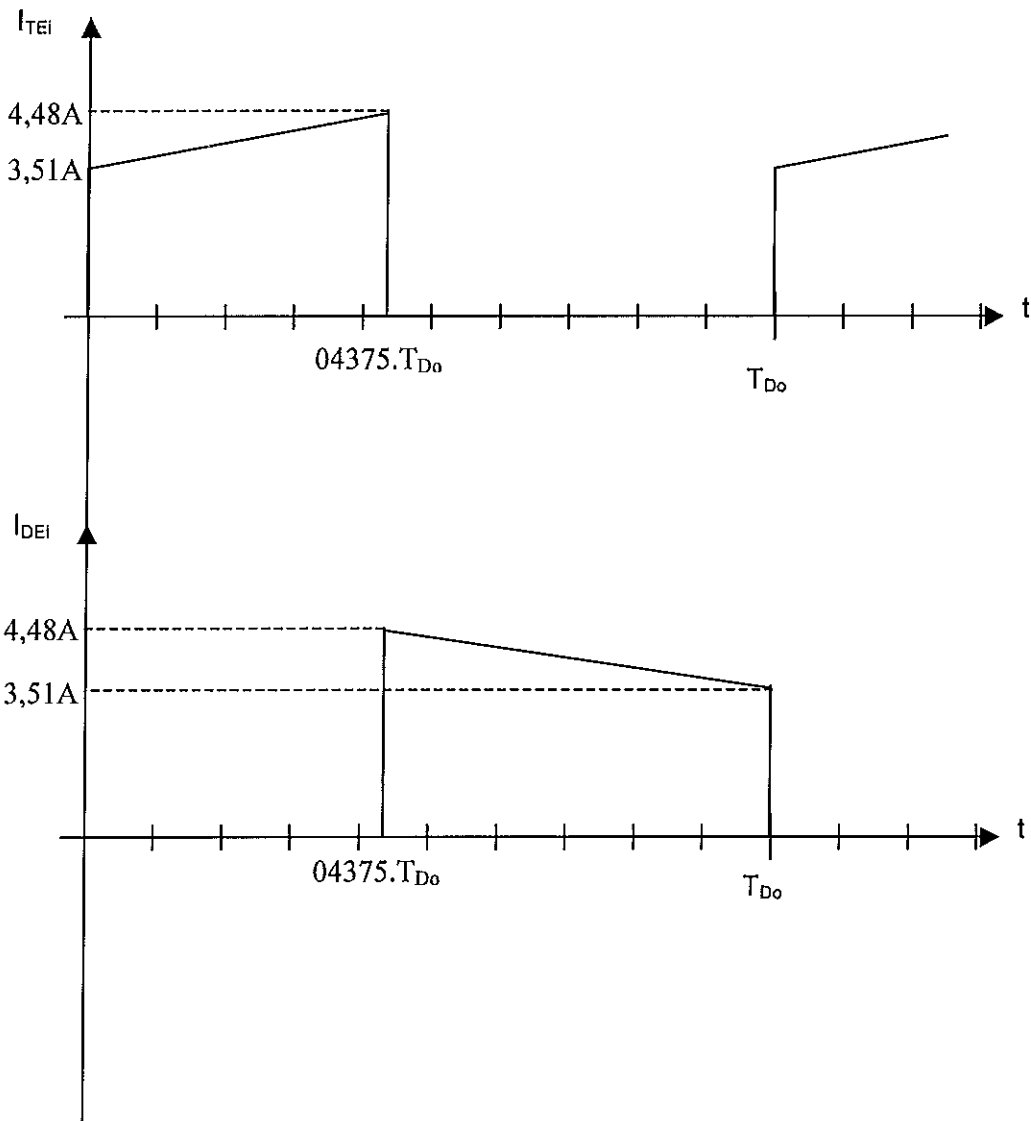
DR9 Etage MPPT

Q36 : Rapport cyclique ondulation et formes d'ondes dans l'étage MPPT i :

$\langle i_{MPPI} \rangle = \dots 4A \dots$

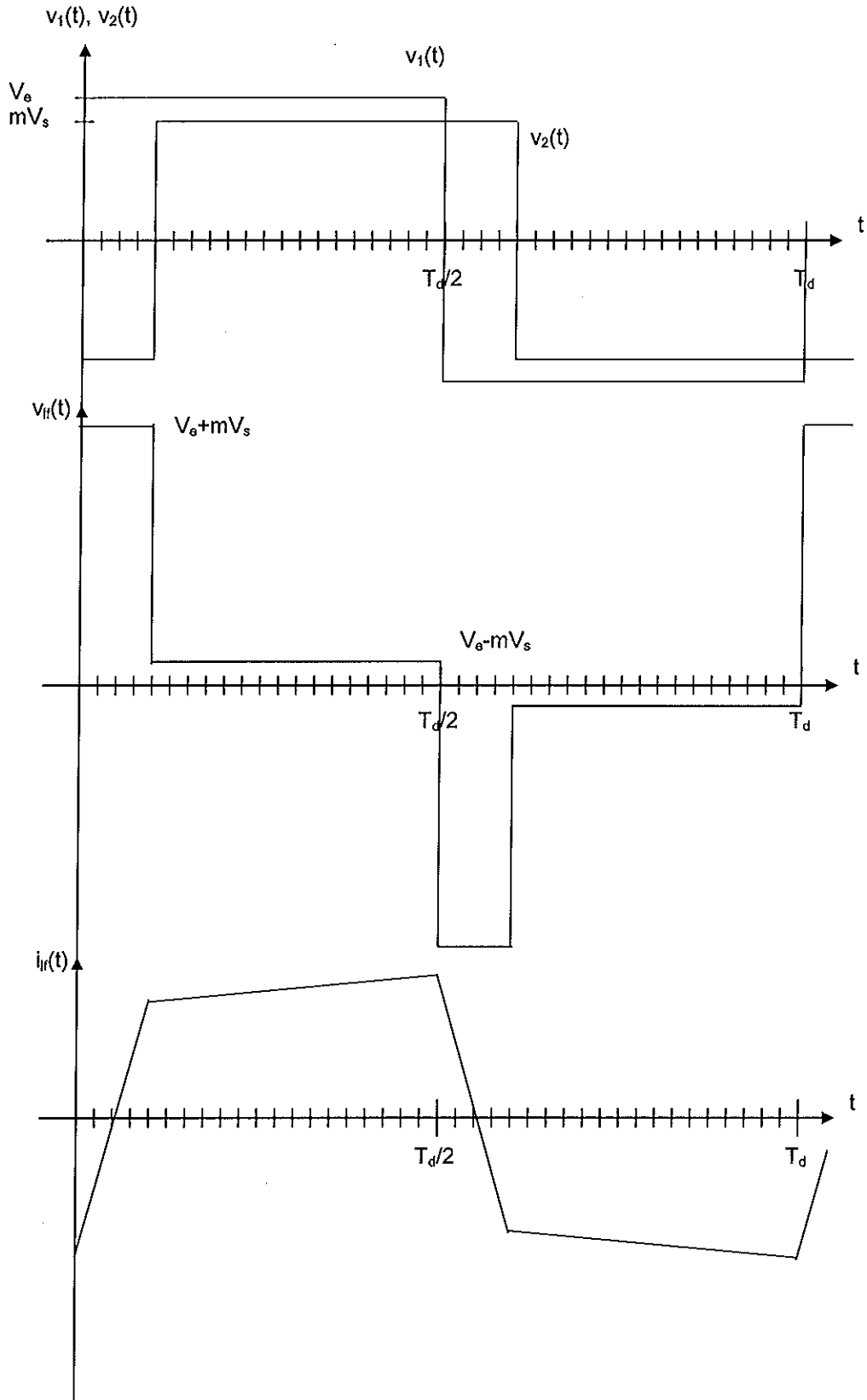
$\alpha_{MPPI} = \dots 0,4375 \dots$

$\Delta i_{MPPI} = \dots 0,98A \dots$



DR10 Structure DAB

Q51 : Formes d'ondes dans le transformateur de la structure DAB



DR11 Structure DAB

Q55 : Courants d'entrée  $i_e(t)$  et de sortie  $i_s(t)$  du convertisseur DAB

