

## C- PACK BATTERIE ET BMS

La batterie utilisée dans le cadre de ce projet utilise des éléments LiFePO<sub>4</sub> (Lithium fer phosphate). Ces éléments présentent une très bonne densité d'énergie volumique et massique. De plus, ils supportent un grand nombre de cycles de charge et décharge (environ 2000 cycles) en fonctionnement normal pour une profondeur de décharge de 80%. En revanche, ces éléments voient leur durée de vie se dégrader très rapidement si on les décharge trop profondément ou si on les surcharge. Aussi on associera toujours à une batterie un circuit, appelé BMS (Battery Management System), qui aura pour fonction de contrôler l'état de charge des éléments. Une batterie est en général réalisée par la mise en série et en parallèle de plusieurs éléments. Les caractéristiques des éléments utilisés dans la batterie sont données Figure 6 et Annexe 4.

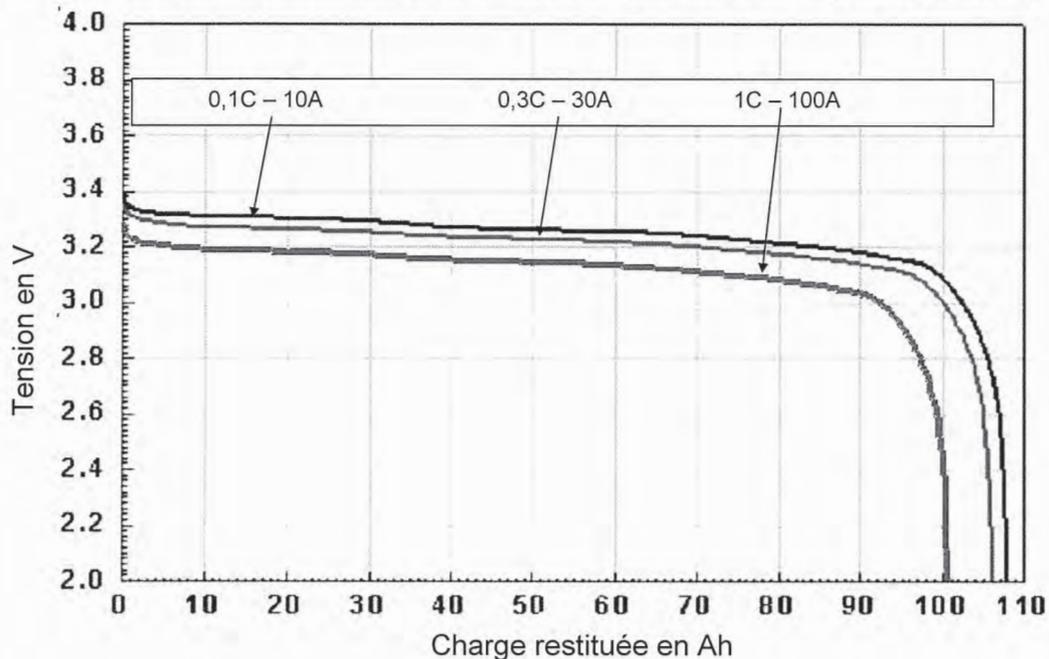


Figure 6 : Caractéristique tension/charge d'un élément LiFePO<sub>4</sub>.

Q41. Quelle est la capacité en Ah de l'élément dont la caractéristique est présentée Figure 6 ? Combien d'éléments  $N_e$  de ce type va-t-il falloir utiliser pour réaliser une batterie de 5kWh ? Comment seront-ils connectés pour obtenir une tension nominale de 24V environ ?

La recharge d'un élément LiFePO<sub>4</sub> se fait en deux temps :

- une charge rapide à un courant de environ 0,3C à 1C (C étant la capacité de la batterie (Ah), 1C signifiant un courant de C ampères). Cette charge rapide est interrompue lorsque la tension aux bornes de la cellule est de 3,5V (charge à 80% environ. Voir annexe 4).
- une charge normale à tension constante durant laquelle la tension est maintenue à 3,5V. Cette charge est interrompue lorsque le courant de charge atteint 0,05C.

Pour réaliser une batterie, on aura en général recours à la mise en série et en parallèle de plusieurs éléments. La tension de seuil pour le passage de la charge rapide à la normale sera donc  $3,5N_e$  (où  $N_e$  est le nombre d'éléments constituant la batterie). Les éléments LiFePO<sub>4</sub> étant très sensibles aux surcharges et aux décharges, il sera nécessaire de les surveiller individuellement et d'optimiser leur charge. Pour cela un BMS complète le chargeur. Il va avoir pour fonction d'assurer la protection des éléments en surveillant individuellement leur état de charge.

Dans cette partie, nous allons tout d'abord étudier le principe de fonctionnement d'un BMS dissipatif puis nous aborderons le principe et les avantages d'un BMS actif.

Le schéma de principe du BMS dissipatif est présenté Figure 7. Lors de la phase de charge normale, toutes les tensions sur les éléments sont surveillées. Dès qu'une de ces tensions devient supérieure à 3,65V le MOSFET en parallèle avec l'élément en question est rendu conducteur déviant ainsi une partie du courant de charge. Si malgré tout la tension d'un des éléments venait à atteindre 3,9V alors le courant de charge serait interrompu et les MOSFET gardés passants jusqu'à ce que les tensions sur ces éléments soient redescendues en dessous de 3,7V. On reprend alors le cycle de charge à tension constante.

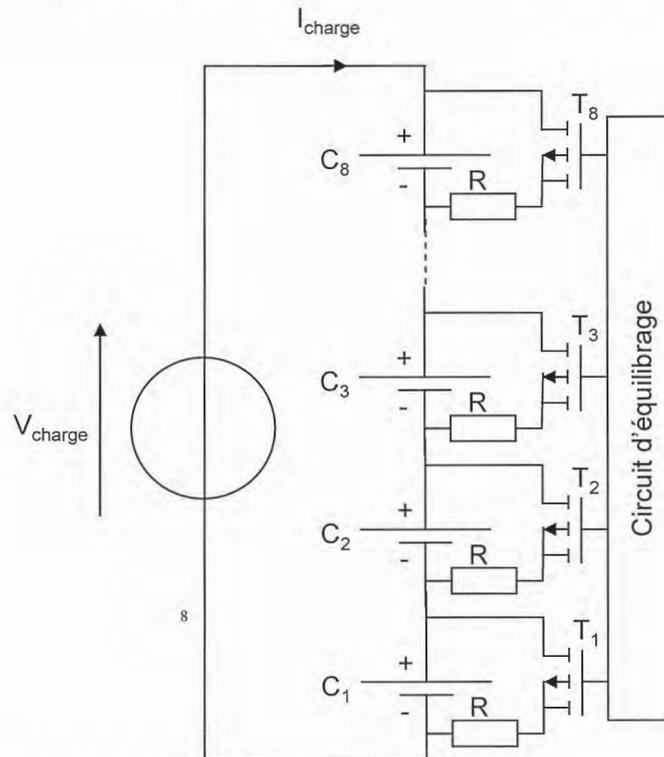


Figure 7 : Schéma de principe d'un BMS dissipatif assurant la protection d'un bras de 8 cellules LiFePO4.

Q42. En vous aidant de la caractéristique de charge présentée en Annexe 4 déterminer, dans sa zone linéaire (State Of Charge entre 10 et 90%) la capacité  $C_{eq}$  en Farad de cet élément.

Q43. Les éléments  $C_1$  à  $C_8$  de la Figure 7 présentent une capacité équivalente nominale  $C_{eq}$  égale à celle déterminée question Q42 et sont chargés par un courant  $I_{charge} = 30A$ . Sachant que les capacités  $C_{eq}$  des éléments sont données par le constructeur avec une précision de  $\pm 5\%$  et en vous plaçant dans le cas le plus défavorable, déterminer quelle valeur doit prendre la résistance d'équilibrage  $R$  pour que ce circuit soit efficace (tous les éléments arrivent à 100% de charge en même temps).

Q44. Quelle est la puissance dissipée dans  $R$ . Quelle est l'énergie perdue durant la charge en considérant que 1 élément parmi les  $N_e$  que comporte le pack batterie présente une capacité équivalente de 95% de la valeur nominale et que tous les autres ont une capacité équivalente de 105% de la capacité nominale ?

Q45. Lors de la décharge d'un bras de la batterie, afin de protéger les éléments, le BMS va couper le courant dès qu'un des éléments verra sa tension arriver à 2,5V. Quelle énergie aura-t-on pu récupérer si l'on considère les caractéristiques des éléments similaires à celles de la question Q44 ?

Afin d'améliorer le rendement lors de la charge et de permettre une meilleure utilisation de l'énergie stockée dans les batteries, une deuxième famille de BMS existe. Le principe est de soutenir les éléments les plus faibles lors de la charge et de la décharge en permettant un transfert d'énergie d'un élément trop chargé vers un deuxième sous chargé grâce à une électronique adaptée. Une structure permettant le transfert de n'importe quel élément vers n'importe quel autre est présentée Figure 8. La capacité  $C_0$  est un condensateur de forte valeur dont la tension est considérée constante à l'échelle de la période de découpage.

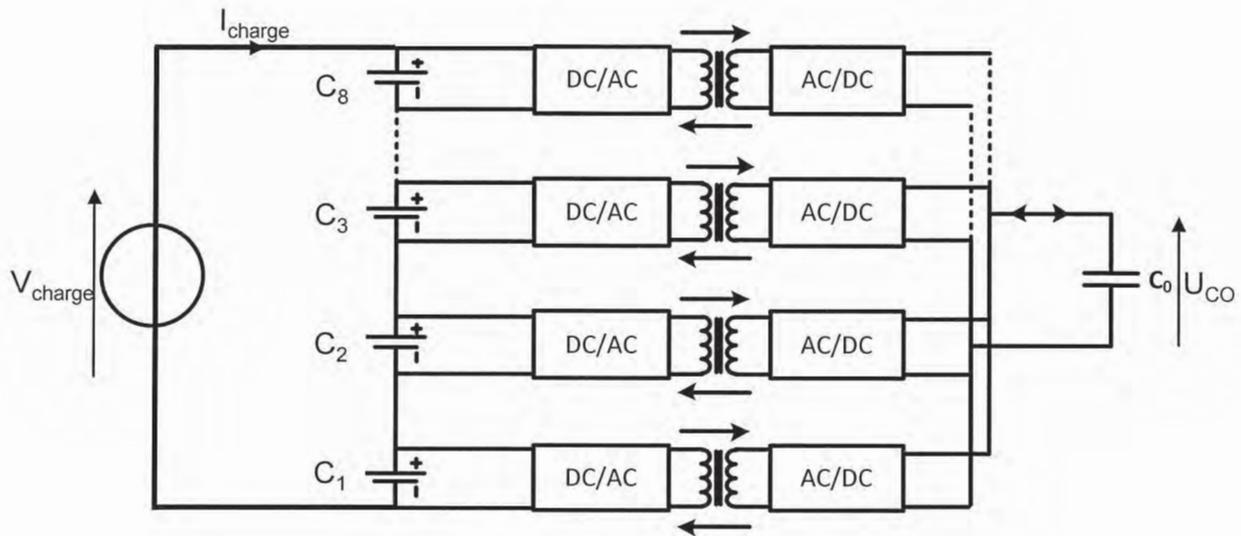


Figure 8 : Schéma de principe d'un BMS actif.

Q46. Chaque convertisseur reliant un élément au condensateur  $C_0$  peut être considéré comme étant équivalent à un transformateur de rapport de transformation unitaire en série avec une résistance  $R_s$  de faible valeur (Figure 9). Montrer que la tension  $U_{C_0}$  aux bornes de la capacité  $C_0$  est égale à la moyenne des tensions  $U_{C_i}$  ( $i$  variant de 1 à  $N$ ) aux bornes des  $N$  éléments.

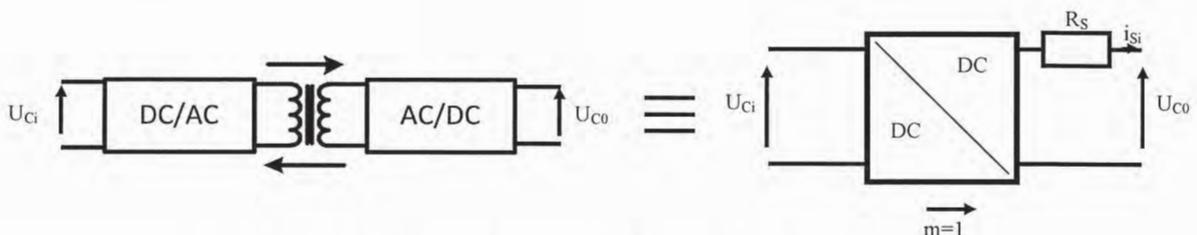


Figure 9 : Schéma équivalent des convertisseurs.

Q47. Déterminer l'expression de la puissance échangée entre l'élément  $i$  ( $i$  variant de 1 à  $N$ ) de la batterie et la capacité  $C_0$ .

Q48. En étudiant le signe de cette puissance en fonction de  $U_{C_i}$  et  $U_{C_0}$ , montrer qu'un équilibrage a lieu entre les éléments  $C_i$ . Montrer que ce mode est désavantageux au niveau énergétique.

Q49. La dispersion dans les valeurs des capacités des éléments étant  $\pm 5\%$ , calculer les courants d'équilibrage  $I_{s_i}$  susceptibles de circuler au travers de ces convertisseurs lorsqu'un élément est à 95% de la capacité nominale et les autres à 105% et que l'on souhaite une même augmentation de tension sur tous les éléments et ce pour un courant de charge de 0,3C. Faire l'application

numérique en considérant 8 éléments. Donner le courant dans le convertisseur associé à l'élément le plus faible et le courant dans chacun des 7 autres éléments.

Q50. Ce fonctionnement est-il possible lors de la phase de décharge de la batterie ? Quelle est alors l'énergie qui est théoriquement récupérable si la dispersion entre les éléments est la même que dans la question Q49 ? Qu'en est-il si on considère que le rendement des convertisseurs d'équilibrage est de 90% ?

## D- CONVERTISSEUR DUAL ACTIVE BRIDGE (DAB)

Afin d'accélérer l'équilibrage, on préférera agir sur le rapport  $m$  du transformateur électronique pour régler le transfert de puissance. C'est ce mode de fonctionnement du transformateur électronique qui va être étudié dans la partie D. Cette structure de transformateur électronique est aussi appelée Dual Active Bridge

La structure du convertisseur est présentée Figure 10. Ce convertisseur est constitué d'un étage onduleur, d'un transformateur et d'un étage redresseur commandé. Le réglage du transfert de l'énergie entre la source et la charge est effectué par réglage du décalage  $\delta T_d$  entre les commandes de l'onduleur et celles du redresseur où  $T_d$  est la période de découpage. Dans cette étude, ce convertisseur va permettre de réaliser la fonction BMS actif en assurant le transfert d'énergie entre deux cellules de la batterie. Les tensions  $V_e$  et  $V_s$  sont donc des tensions de cellules LiFePO4 et seront considérées constantes, dans la suite, à l'échelle de la période de découpage.

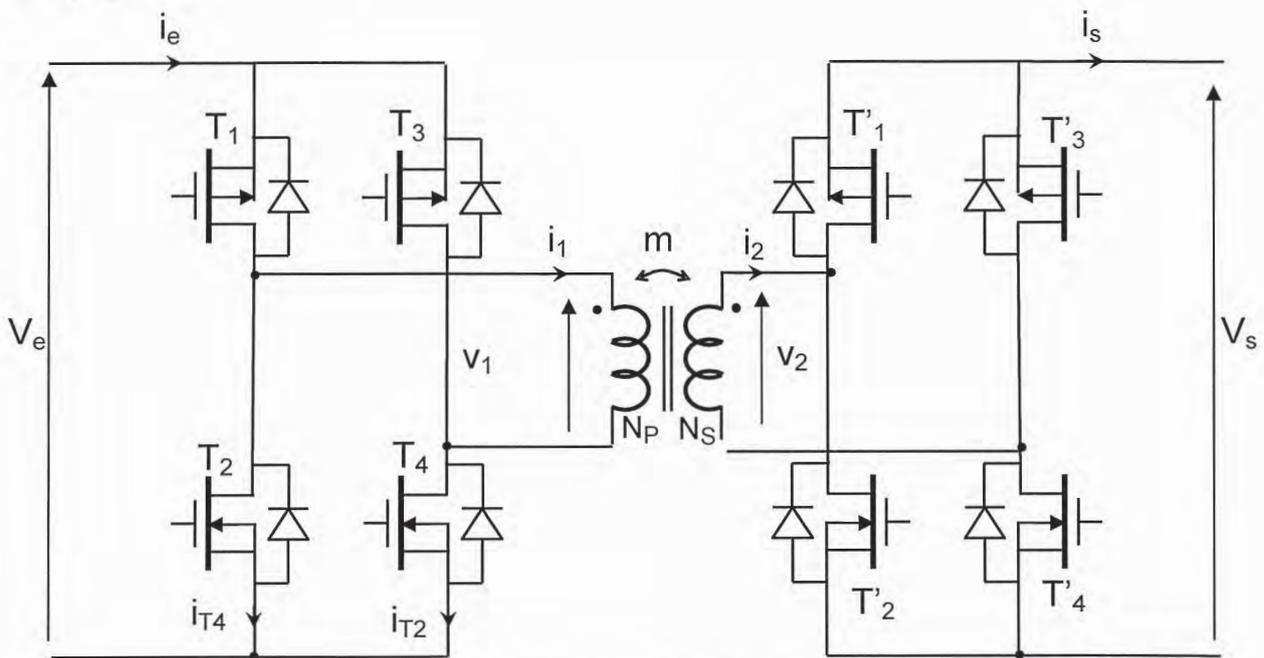


Figure 10 : Structure Dual Active Bridge

Les rapports cycliques des commandes des bras de l'onduleur et du redresseur sont de 0,5 et les commandes sont complémentaires pour les deux bras de sorte que :

- Dans l'onduleur :

- de  $t = 0$  à  $t = T_d/2$   $T_1$  et  $T_4$  sont commandés et  $T_2$  et  $T_3$  bloqués
- de  $t = T_d/2$  à  $t = T_d$   $T_2$  et  $T_3$  sont commandés et  $T_1$  et  $T_4$  bloqués

- Dans le redresseur :

- de  $t = \delta T_d$  à  $t = T_d/2 + \delta T_d$   $T'_1$  et  $T'_4$  sont commandés et  $T'_2$  et  $T'_3$  bloqués
- de  $t = T_d/2 + \delta T_d$  à  $t = T_d + \delta T_d$   $T'_2$  et  $T'_3$  sont commandés et  $T'_1$  et  $T'_4$  bloqués

$\delta T_d$  pouvant varier de  $-T_d/2$  à  $T_d/2$ .

Le schéma équivalent du transformateur qui va être utilisé dans la suite du problème est présenté Figure 11. Dans cette partie nous négligerons dans un premier temps l'inductance magnétisante en considérant qu'elle est grande devant les autres impédances du montage.

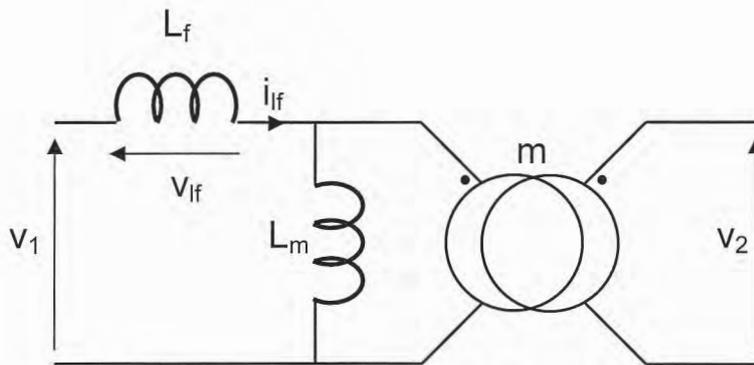


Figure 11 : Schéma équivalent du transformateur

Q51. En considérant  $V_e > V_s$ ,  $m=1$  et  $\delta = 0,1$ , représenter sur le document réponse DR10 l'allure des tensions  $v_1(t)$  et  $v_2(t)$  ainsi que de la tension  $v_{lf}(t)$  présente sur l'inductance de fuite. En déduire l'allure du courant  $i_{lf}(t)$  traversant cette inductance et le représenter sur le document réponse DR10.

Q52. Donner en fonction de  $L_f$ ,  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $m$ ,  $\delta$  et  $T_d$  les expressions de  $i_{lf}(t)$  pour les 4 intervalles  $0 < t < \delta T_d$ ,  $\delta T_d < t < T_d/2$ ,  $T_d/2 < t < T_d/2 + \delta T_d$  et  $T_d/2 + \delta T_d < t < T_d$ . Aux instants  $t_{trans}$  des transitions entre les différents intervalles, on appellera le courant circulant dans l'inductance de fuite  $i_{lf}(t_{trans})$  avec  $t_{trans}$  pouvant prendre les valeurs  $0$ ,  $\delta T_d$ ,  $T_d/2$ ,  $T_d/2 + \delta T_d$ ,  $T_d$ . Donner les expressions de  $i_{lf}(t_{trans})$  pour  $t = \delta T_d$ ,  $T_d/2$ ,  $T_d/2 + \delta T_d$  et  $T_d$  en fonction de  $i_{lf}(0)$ .

Q53. Compte tenu des symétries dans ce montage, que peut-on dire de la valeur moyenne du courant  $i_{lf}(t)$  ? En déduire l'expression de  $i_{lf}(0)$ .

Q54. Tracer sur le document réponse DR11 l'allure des courants d'entrée  $i_e(t)$  et de sortie  $i_s(t)$  du convertisseur DAB.

Q55. Donner les expressions des valeurs moyennes  $\langle i_e \rangle$  et  $\langle i_s \rangle$  de ces courants en fonction de  $L_f$ ,  $V_e$ ,  $V_s$ ,  $T_d$ ,  $m$  et  $\delta$ . Vérifier leurs valeurs relatives et justifier cette relation.

Q56. Déduire de la question précédente la puissance moyenne  $\langle p_{DAB} \rangle$  transmise par ce convertisseur de  $V_e$  vers  $V_s$  en fonction de  $L_f$ ,  $V_e$ ,  $V_s$ ,  $T_d$ ,  $m$  et  $\delta$ . Montrer qu'il existe un maximum  $P_{DABmax}$  à cette puissance  $\langle p_{DAB} \rangle$  lorsque l'on fait varier  $\delta$ , en déterminer l'expression et indiquer quel(s) élément(s) du circuit limite(nt) cette puissance.

Q57. Montrer que le convertisseur est réversible de sorte que la puissance peut transiter de  $V_e$  vers  $V_s$  ou de  $V_s$  vers  $V_e$ . Justifier la réponse.

*Les tensions  $V_e$  et  $V_s$  sont les tensions des cellules  $LiFePO_4$  placées en entrée et en sortie et peuvent varier entre 2,4V et 4,2V selon l'état de charge. Le convertisseur DAB va servir ici de circuit d'équilibrage de charge et on souhaite permettre un courant d'équilibrage de 2A entre ces deux cellules. La fréquence de découpage  $F_d$  est fixée à 500kHz. Pour assurer une réversibilité symétrique on prendra  $m=1$ .*

Q58. Déterminer la valeur maximale de l'inductance de fuite  $L_f$  qui va permettre ce courant d'équilibrage quels que soient les niveaux de tension de  $V_e$  et  $V_s$  compris dans la plage 2,4V à 4,2V. Il est rappelé que la fonction est ici un circuit d'équilibrage et que donc le transfert d'énergie ira toujours de la cellule la plus chargée vers celle la moins chargée.

Q59. On fixe  $L_f=100nH$  et  $m=1$ . Déterminer pour le point de fonctionnement  $V_e=V_s=3V$  et  $\langle i_e \rangle=2A$  les valeurs des courants efficaces au primaire et au secondaire dans le transformateur.

**Fin du problème**

## Annexe 1 – Modules photovoltaïques

# Sunmodule<sup>+</sup>

## SW 250 mono

## COMPORTEMENT LORS DE CONDITIONS DE TEST STANDARD (STC\*)

		SW 250
Puissance au point de puissance maximale	$P_{max}$	250 Wc
Tension à vide	$U_{oc}$	37,8 V
Tension au point de puissance maximale	$U_{mpp}$	31,1 V
Courant de court-circuit	$I_{sc}$	8,28 A
Courant au point de puissance maximale	$I_{mpp}$	8,05 A

\*STC: 1000W/m<sup>2</sup>, 25°C, AM 1.5

COMPORTEMENT À 800W/m<sup>2</sup>, NOCT, AM 1.5

		SW 250
Puissance au point de puissance maximale	$P_{max}$	183,3 Wc
Tension à vide	$U_{oc}$	34,6 V
Tension au point de puissance maximale	$U_{mpp}$	28,5 V
Courant de court-circuit	$I_{sc}$	6,68 A
Courant au point de puissance maximale	$I_{mpp}$	6,44 A

Faible réduction du rendement en conditions de charge partielle à 25 °C: à 200 W/m<sup>2</sup>, la puissance est égale à 95 % (+/- 3 %) de la puissance en condition STC.

## MATÉRIAUX UTILISÉS

Cellules par panneau solaire	60
Type de cellules	monocristallin
Dimensions des cellules	156 mm x 156 mm
Vue de face	verre trempé (EN 12150)

## GRANDEURS CARACTÉRISTIQUES RELATIVES À INTÉGRATION OPTIMALE DANS LE SYSTÈME

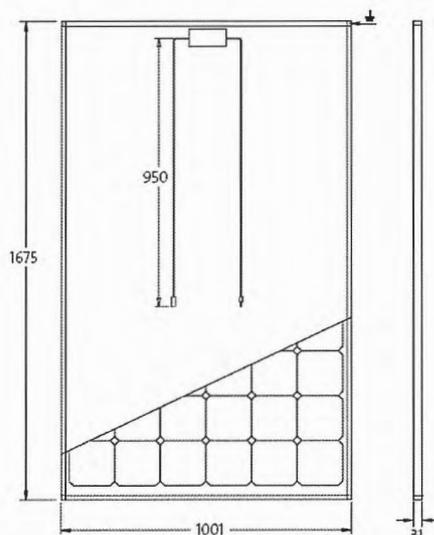
Tension de système maximale classe II	1000 V
Valeurs limites de courant inverse	16 A
Charge neige et vent selon IEC 61215	5,4 kN/m <sup>2</sup>
Nombre de diode bypass	3

## GRANDEURS CARACTÉRISTIQUES THERMIQUES

NOCT	47 °C
$CT I_{sc}$	0,042 %/K
$CT U_{oc}$	-0,33 %/K
$CT P_{mpp}$	-0,45 %/K

## AUTRES DONNÉES

Tolérance de mesure	+/- 3 %
Boîte de jonction	IP65
Connecteur	MC4
SolarWorld: tri Plus <sup>1)</sup>	$P_{Flash} \geq P_{max}$



- Qualified, IEC 61215
- Safety tested, IEC 61730
- Periodic Inspection
- Power Controlled



- 1) La puissance mesurée par SolarWorld ( $P_{Flash}$ ) est toujours supérieure à la puissance nominale ( $P_{max}$ ) du module.
- 2) Selon le marché.  
SolarWorld AG se réserve le droit de modifier des spécifications. Cette fiche technique correspond aux mentions de la norme EN 50380. Cette fiche technique est également disponible en anglais.

## Annexe 2 – Onduleurs photovoltaïques

Onduleurs		SunEzy 600E 3 entrées MPPT indépendantes	combinaison multi-onduleurs
			
références	onduleur	PVSNV1600E	▶ page A6
	extension de garantie 10 ans (1)	PVS10ANS600E@	▶ page A6
entrée (CC)	puissance maximale du générateur photovoltaïque	5,4 kWc	
	plage tension MPP (2)	200 à 700 V	
	tension minimale de connexion réseau	150 V	
	tension maximale à vide	750 V	
	courant maximal	3 x 8,5 A	
	raccordement sur connecteurs MC3 Multi-contact*	3 paires	
sortie (CA)	puissance nominale ( <i>maximale</i> )	4,6 kW ( <i>5,1 kW</i> )	
	tension nominale	230 V	
	courant nominal ( <i>maximal</i> )	20 A ( <i>25 A</i> )	
	fréquence nominale	50 Hz	
normes et réglementations	conformité directive CEM	EN 50081, EN 50082, EN 61000-3-2	
	aux directives européennes (basse tension)	EN 50178	
	marquage	VDE GS	
	raccordement au réseau	VDE 0126-1-1 (2006.02)	
rendement maximal ( <i>euro péen</i> )		> 96 % (> 94,5 %)	
consommation propre en service		0 à 9 W	
paramètres disponibles sur l'écran rétro-éclairé à cristaux liquides		puissance CA instantanée, énergie produite depuis la mise en service, énergie produite durant la journée, courant / tension / fréquence CA, tension / courant CC.	
boîtier		Métallique	
température ambiante de fonctionnement		-20 °C à +55 °C	
humidité relative (HR)		0 % à 95 %	
indice de protection		IP 65	
ports de communication externe		RS232 (en standard)	
dimensions	longueur	430 mm	
	hauteur	530 mm	
	profondeur	130 mm	
masse		27 kg	

(2) MPP : Maximum Power Point, point de puissance maximum du générateur photovoltaïque.



Soft Switching Series

IHW40T120

Low Loss DuoPack : IGBT in TrenchStop® and Fieldstop technology with soft, fast recovery anti-parallel EmCon HE diode




- Short circuit withstand time – 10µs
- Designed for :
  - Soft Switching Applications
  - Induction Heating
- TrenchStop® and Fieldstop technology for 1200 V applications offers :
  - very light parameter distribution
  - high ruggedness, temperature stable behavior
  - easy parallel switching capability due to positive temperature coefficient in  $V_{CE(sat)}$
- Very soft, fast recovery anti-parallel EmCon™ HE diode
- Low EMI
- Qualified according to JEDEC<sup>1</sup> for target applications
- Application specific optimisation of inverse diode
- Pb-free lead plating, RoHS compliant



Soft Switching Series

IHW40T120

Thermal Resistance

Parameter	Symbol	Conditions	Max. Value	Unit
<b>Characteristic</b>				
IGBT thermal resistance, junction – case	$R_{th(jc)}$		0.45	K/W
Diode thermal resistance, junction – case	$R_{th(jcd)}$		1.1	
Thermal resistance, junction – ambient	$R_{th(ja)}$		40	

Electrical Characteristic, at  $T_j = 25^\circ\text{C}$ , unless otherwise specified

Parameter	Symbol	Conditions	Value			Unit
			min.	Typ.	max.	
<b>Static Characteristic</b>						
Collector-emitter breakdown voltage	$V_{CE(BR)}$	$V_{GE}=0\text{V}, I_C=1.5\text{mA}$	1200	-	-	V
Collector-emitter saturation voltage	$V_{CE(sat)}$	$V_{GE}=15\text{V}, I_C=40\text{A}$	-	1.8	2.3	
		$T_j=25^\circ\text{C}$	-	2.1	-	
		$T_j=125^\circ\text{C}$	-	2.3	-	
Diode forward voltage	$V_F$	$V_{GE}=0\text{V}, I_F=18\text{A}$	-	1.65	2.15	
		$T_j=25^\circ\text{C}$	-	1.7	-	
		$T_j=150^\circ\text{C}$	-	1.7	-	
Gate-emitter threshold voltage	$V_{GE(th)}$	$I_C=1.5\text{mA}, V_{CE}=V_{GE}$	5.0	5.8	6.5	
Zero gate voltage collector current	$I_{CES}$	$V_{CE}=1200\text{V}, V_{GE}=0\text{V}$	-	-	-	mA
Gate-emitter leakage current	$I_{GES}$	$T_j=25^\circ\text{C}$	-	-	0.4	
		$T_j=150^\circ\text{C}$	-	-	4.0	
Transconductance	$g_{fs}$	$V_{CE}=20\text{V}, I_C=40\text{A}$	-	21	-	S
Integrated gate resistor	$R_{Gint}$		-	6	-	$\Omega$

**Dynamic Characteristic**

Parameter	Symbol	Conditions	Value	Unit
Input capacitance	$C_{ies}$	$V_{CE}=25\text{V}, V_{GE}=0\text{V}$	2500	pF
Output capacitance	$C_{oss}$	$f=1\text{MHz}$	130	pF
Reverse transfer capacitance	$C_{riss}$	$V_{CE}=960\text{V}, I_C=40\text{A}, V_{GE}=15\text{V}$	110	pF
Gate charge	$Q_{gate}$	$V_{CE}=15\text{V}, I_{scs}=10\text{A}$	203	nC
Internal emitter inductance measured 5mm (0.197 in.) from case	$L_E$		13	nH
Short circuit collector current <sup>1)</sup>	$I_{CS(c)}$	$V_{GE}=15\text{V}, I_{scs}=10\text{A}, V_{CC}=600\text{V}, T_j=25^\circ\text{C}$	210	A

<sup>1)</sup> Allowed number of short circuits: <1000; time between short circuits: >1s.

Type	$V_{CE}$	$I_C$	$V_{CE(sat)}$ @ $T_j=25^\circ\text{C}$	$T_{jmax}$	Marking	Package
IHW40T120	1200V	40A	1.8V	150°C	H40T120	PG-TO247-3

**Maximum Ratings**

Parameter	Symbol	Value	Unit
Collector-emitter voltage	$V_{CE}$	1200	V
DC collector current	$I_C$	75	A
$T_C = 25^\circ\text{C}$		40	
$T_C = 100^\circ\text{C}$		105	
Pulsed collector current, $t_p$ limited by $T_{jmax}$	$I_{C(puls)}$	105	
Turn off safe operating area			
$V_{CE} \leq 1200\text{V}, T_j \leq 150^\circ\text{C}$			
Diode forward current	$I_F$	31	
$T_C = 25^\circ\text{C}$		19.8	
$T_C = 100^\circ\text{C}$		47	
Diode pulsed current, $t_p$ limited by $T_{jmax}$	$I_{F(puls)}$	47	
Diode surge non repetitive current, $t_p$ limited by $T_{jmax}$	$I_{FSM}$	78	A
$T_C = 25^\circ\text{C}, t_p = 10\text{ms}$ , sine halfwave		200	
$T_C = 25^\circ\text{C}, t_p \leq 2.5\mu\text{s}$ , sine halfwave		180	
$T_C = 100^\circ\text{C}, t_p \leq 2.5\mu\text{s}$ , sine halfwave		$\pm 20$	
Gate-emitter voltage	$V_{GE}$	10	V
Short circuit withstand time <sup>2)</sup>	$t_{sc}$	270	$\mu\text{s}$
$V_{GE} = 15\text{V}, V_{CC} \leq 1200\text{V}, T_j \leq 150^\circ\text{C}$			
Power dissipation, $T_C = 25^\circ\text{C}$	$P_{tot}$	270	W
Operating junction temperature	$T_j$	-40...+150	$^\circ\text{C}$
Storage temperature	$T_{stg}$	-55...+150	$^\circ\text{C}$

<sup>1)</sup> JESTD-020 and JESD-022

<sup>2)</sup> Allowed number of short circuits: <1000; time between short circuits: >1s.

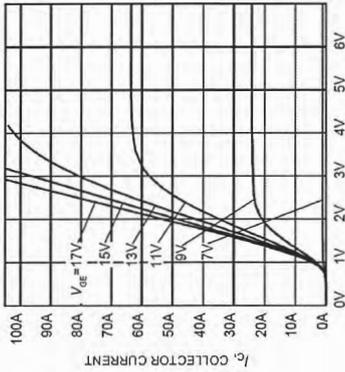
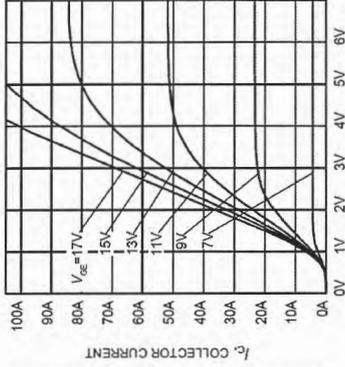
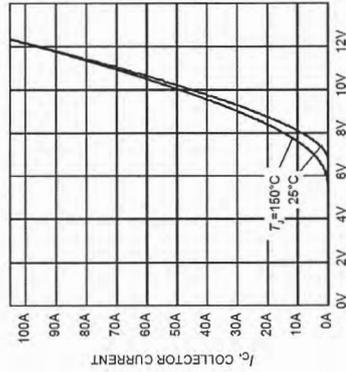
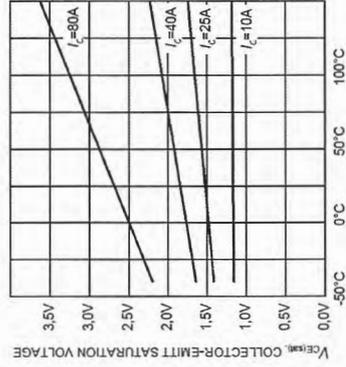
**Switching Characteristic, Inductive Load, at  $T_J=25^\circ\text{C}$** 

Parameter	Symbol	Conditions	Value		Unit
			min.	typ. max.	
<b>IGBT Characteristic</b>					
Turn-on delay time	$t_{d(on)}$	$T_J=25^\circ\text{C}$ , $V_{CC}=600\text{V}$ , $I_C=40\text{A}$ , $V_{GE}=0/15\text{V}$ , $R_{\theta}^j=15\Omega$ , $L_{\sigma}^j=180\text{nH}$ , $C_{\sigma}^j=39\text{pF}$	-	48	ns
Rise time	$t_r$		-	34	-
Turn-off delay time	$t_{d(off)}$		-	480	-
Fall time	$t_f$		-	70	-
Turn-on energy	$E_{on}$	Energy losses include "tail" and diode reverse recovery.	-	3.3	mJ
Turn-off energy	$E_{off}$		-	3.2	-
Total switching energy	$E_{15}$		-	6.5	-
<b>Anti-Parallel Diode Characteristic</b>					
Diode reverse recovery time	$t_{rr}$	$T_J=25^\circ\text{C}$ ,	-	195	ns
Diode reverse recovery charge	$Q_{rr}$	$V_R=800\text{V}$ , $I_F=18\text{A}$ , $di_F/dt=800\text{A}/\mu\text{s}$	-	1880	nC
Diode peak reverse recovery current	$I_{rrm}$		-	20.2	A

**Switching Characteristic, Inductive Load, at  $T_J=150^\circ\text{C}$** 

Parameter	Symbol	Conditions	Value		Unit
			min.	typ. max.	
<b>IGBT Characteristic</b>					
Turn-on delay time	$t_{d(on)}$	$T_J=150^\circ\text{C}$ , $V_{CC}=600\text{V}$ , $I_C=40\text{A}$ , $V_{GE}=0/15\text{V}$ , $R_{\theta}^j=15\Omega$ , $L_{\sigma}^j=180\text{nH}$ , $C_{\sigma}^j=39\text{pF}$	-	52	ns
Rise time	$t_r$		-	40	-
Turn-off delay time	$t_{d(off)}$		-	580	-
Fall time	$t_f$		-	120	-
Turn-on energy	$E_{on}$	Energy losses include "tail" and diode reverse recovery.	-	5.0	mJ
Turn-off energy	$E_{off}$		-	5.4	-
Total switching energy	$E_{15}$		-	10.4	-
<b>Anti-Parallel Diode Characteristic</b>					
Diode reverse recovery time	$t_{rr}$	$T_J=150^\circ\text{C}$ ,	-	300	ns
Diode reverse recovery charge	$Q_{rr}$	$V_R=800\text{V}$ , $I_F=18\text{A}$ , $di_F/dt=800\text{A}/\mu\text{s}$	-	3540	nC
Diode peak reverse recovery current	$I_{rrm}$		-	25.3	A

 2) Leakage inductance  $L_{\sigma}$  and Stray capacity  $C_{\sigma}$  due to dynamic test circuit in Figure E.

 1) Leakage inductance  $L_{\sigma}$  and Stray capacity  $C_{\sigma}$  due to dynamic test circuit in Figure E.

**Figure 5. Typical output characteristic ( $T_J = 25^\circ\text{C}$ )**

**Figure 6. Typical output characteristic ( $T_J = 150^\circ\text{C}$ )**

**Figure 7. Typical transfer characteristic ( $V_{CE}=20\text{V}$ )**

**Figure 8. Typical collector-emitter saturation voltage as a function of junction temperature ( $V_{GE} = 15\text{V}$ )**

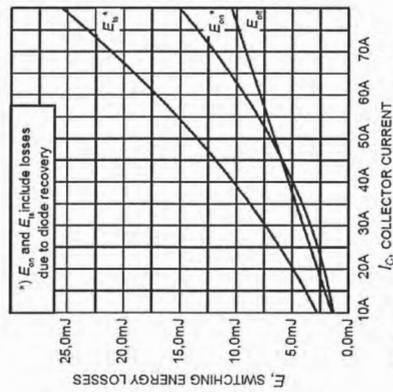


Figure 13. Typical switching energy losses as a function of collector current (inductive load,  $T_j=150^\circ\text{C}$ ,  $V_{CE}=600\text{V}$ ,  $V_{GE}=0/15\text{V}$ ,  $R_G=15\Omega$ ,  $I_C=40\text{A}$ ,  $V_{CE}=0/15\text{V}$ ,  $I_C=40\text{A}$ ,  $R_G=15\Omega$ , Dynamic test circuit in Figure E)

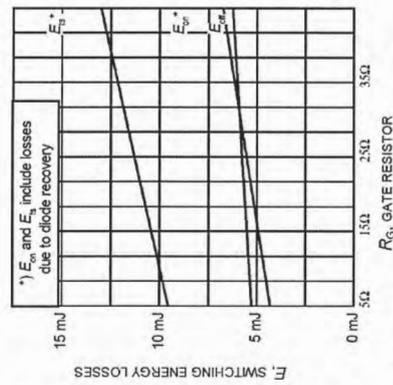


Figure 14. Typical switching energy losses as a function of gate resistor (inductive load,  $T_j=150^\circ\text{C}$ ,  $V_{CE}=600\text{V}$ ,  $V_{GE}=0/15\text{V}$ ,  $I_C=40\text{A}$ ,  $V_{CE}=0/15\text{V}$ ,  $I_C=40\text{A}$ ,  $R_G=15\Omega$ , Dynamic test circuit in Figure E)

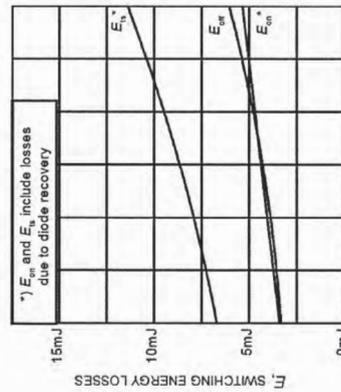


Figure 15. Typical switching energy losses as a function of junction temperature (inductive load,  $V_{CE}=600\text{V}$ ,  $V_{GE}=0/15\text{V}$ ,  $I_C=40\text{A}$ ,  $R_G=15\Omega$ , Dynamic test circuit in Figure E)

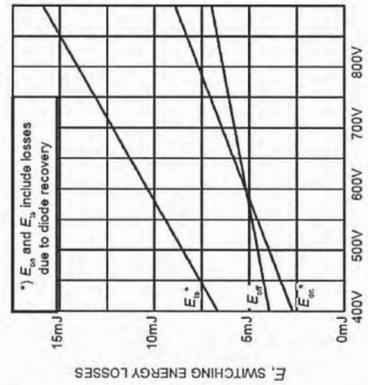


Figure 16. Typical switching energy losses as a function of collector-emitter voltage (inductive load,  $T_j=150^\circ\text{C}$ ,  $V_{GE}=0/15\text{V}$ ,  $I_C=40\text{A}$ ,  $R_G=15\Omega$ , Dynamic test circuit in Figure E)

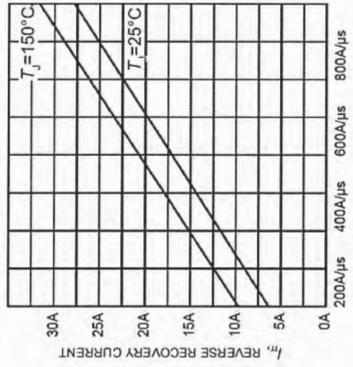


Figure 25. Typical reverse recovery current as a function of diode current slope ( $V_G=600\text{V}$ ,  $I_C=15\text{A}$ , Dynamic test circuit in Figure E)

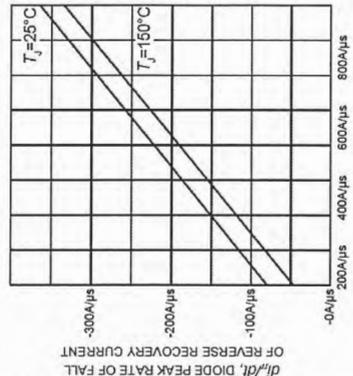


Figure 26. Typical diode peak rate of fall of reverse recovery current as a function of diode current slope ( $V_G=600\text{V}$ ,  $I_C=15\text{A}$ , Dynamic test circuit in Figure E)

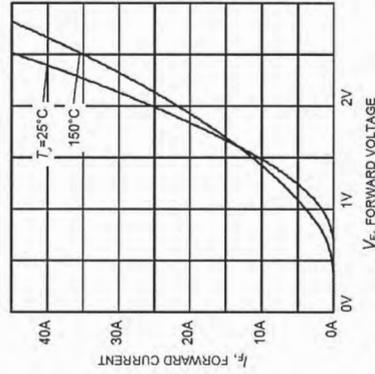


Figure 27. Typical diode forward current as a function of forward voltage

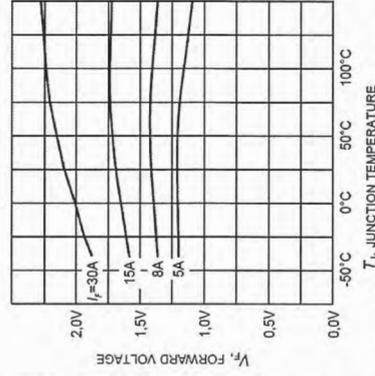


Figure 28. Typical diode forward voltage as a function of junction temperature

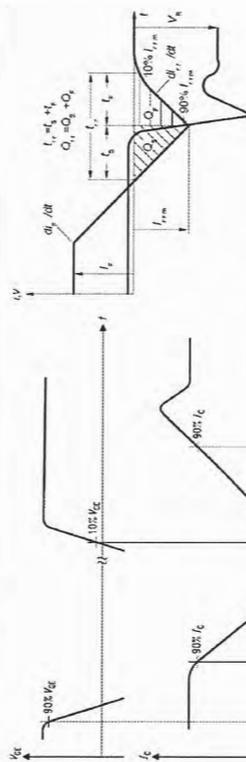


Figure A. Definition of switching times

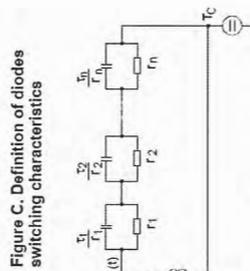


Figure B. Definition of switching losses

Figure C. Definition of diodes switching characteristics

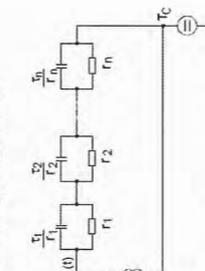


Figure D. Thermal equivalent circuit

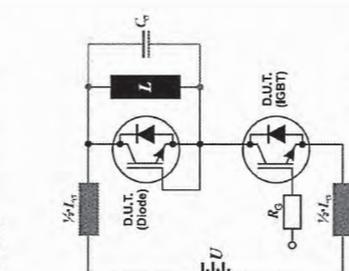
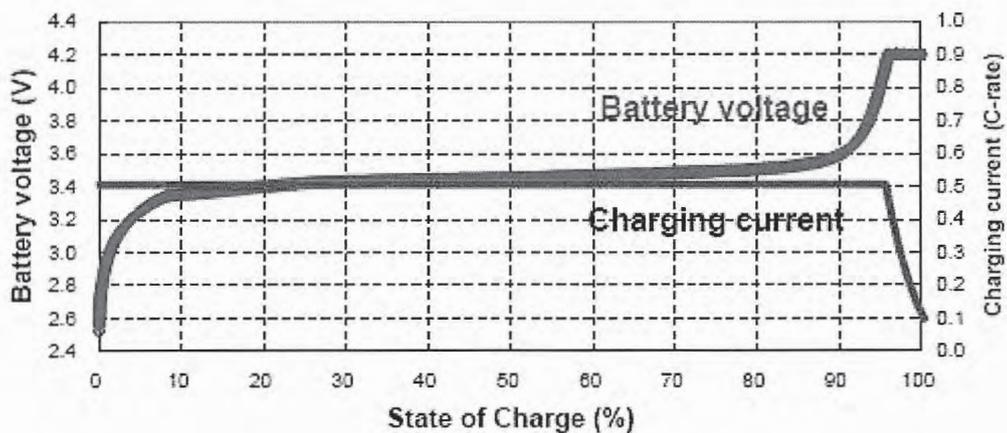


Figure E. Dynamic test circuit


 Figure E. Dynamic test circuit  
Leakage inductance  $L_r = 180\text{nH}$   
and Stray capacity  $C_n = 39\text{pF}$ .

Annexe 4 : Caractéristiques de éléments LiFePo4

Model : SE100AHA		
Nominal Capacity (Ah)	100	
Nominal Voltage(v)	3.2	
Internal Impedance(1khz AC ,mΩ)	≤0.9	
Charging Cut-off Voltage(CCCV Model,V)	3.6	
Discharging Cut-off Voltage(v)	2.5	
Recommend Charging-Discharging Current(0.3C,A)	30	
Maximum short-time Discharging Current (period≤10s,A)	800	
Life Cycle(0.3C Charging-discharging,80%DDC)	2000	
Operating Thermal Ambient	Charging	0°C~45°C
	Discharging	-20°C~55°C
Storage Thermal Ambient	-20°C~45°C	
Weight(kg)	3.2±0.1kg	
Shell Material	Plastic	



Caractéristique de charge d'un élément LiFePo4 sous un courant de 0,5C

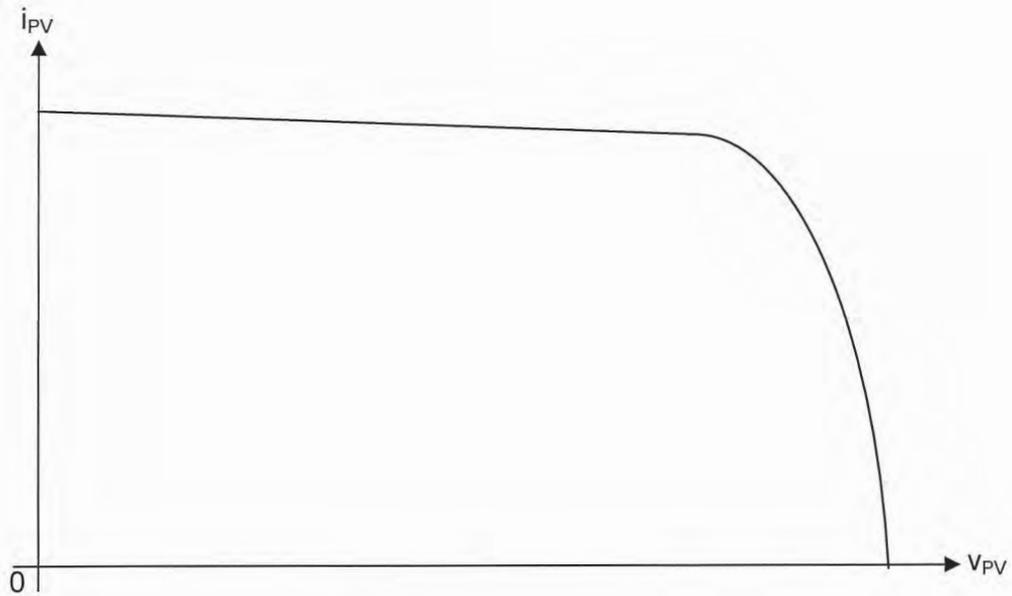
Nota : On considèrera que le State of Charge évolue proportionnellement avec le temps.



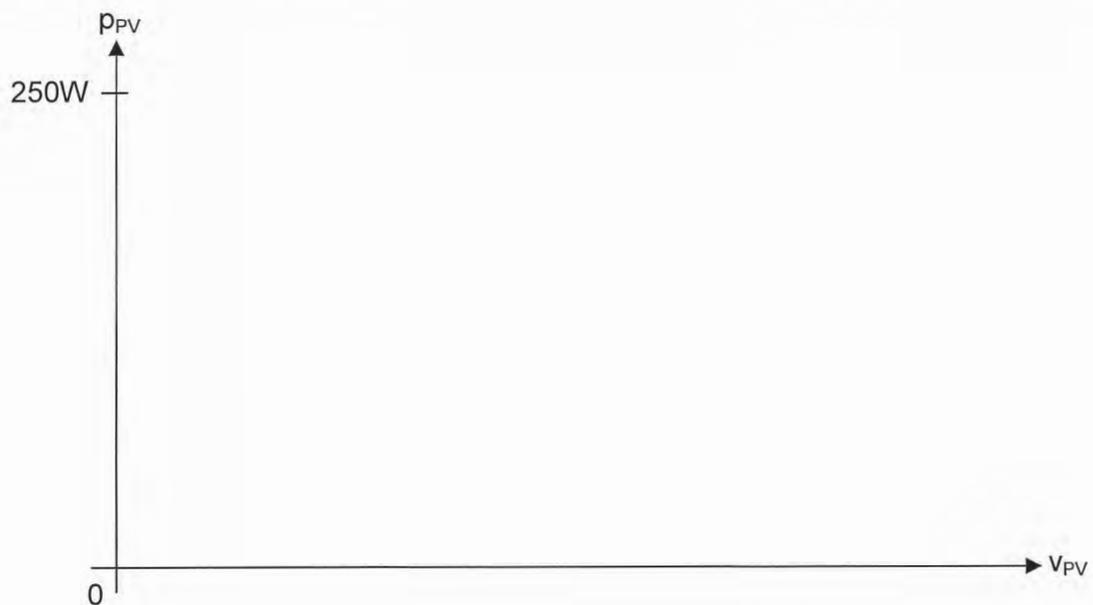
## Documents réponses

**DR1** Caractéristique d'un panneau photovoltaïque SW 250 mono

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



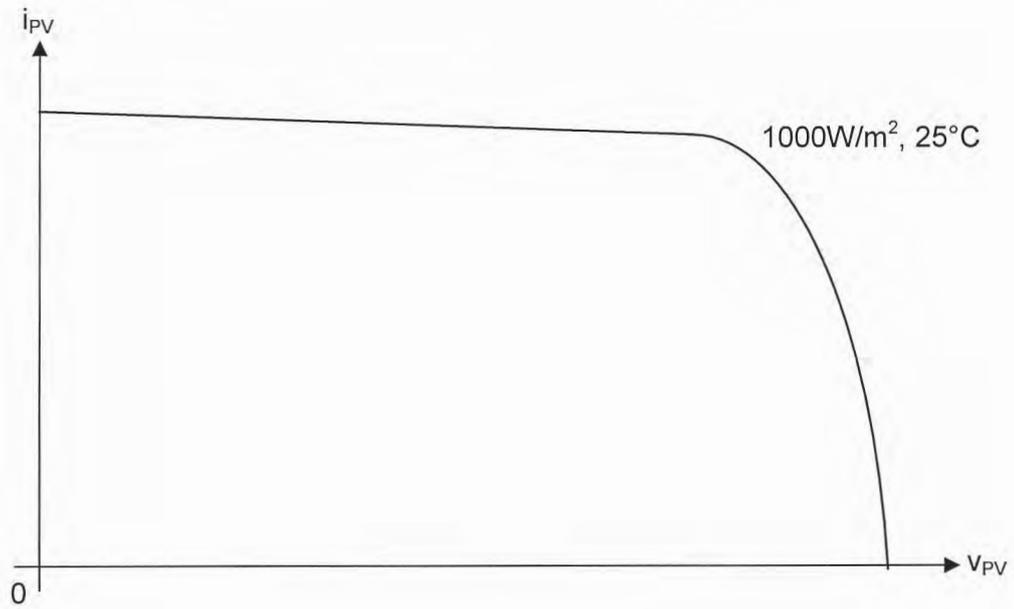
**Q5** : Caractéristique nominale  $p_{PV}(v_{PV})$  d'un panneau photovoltaïque SW 250 mono



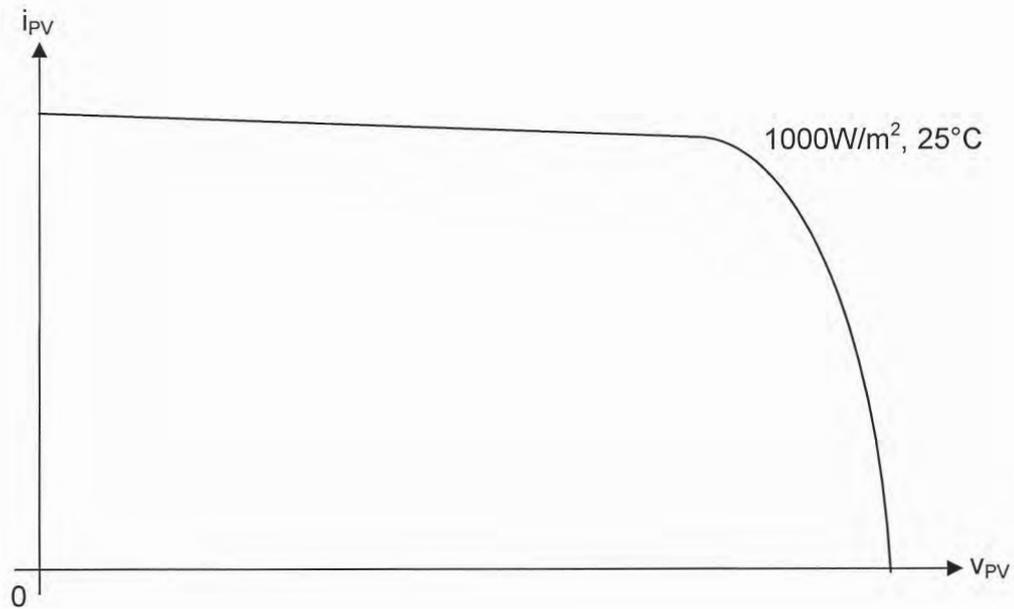
**DR2 Page 1/2** Caractéristique d'un panneau photovoltaïque SW 250 mono

**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%

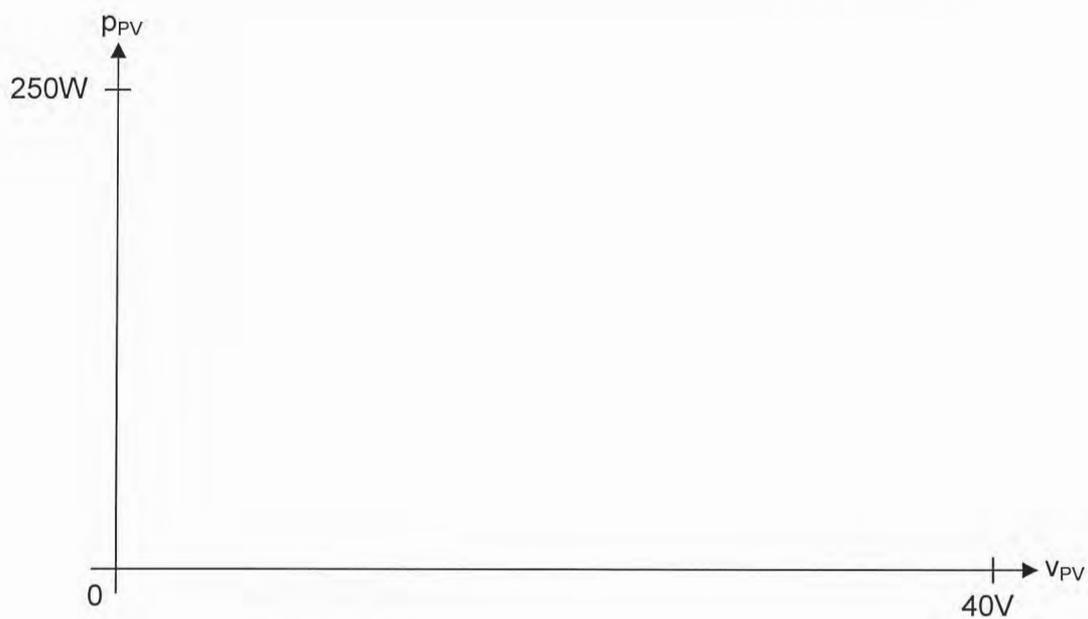


Courbe b : Température augmente à 70°C



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

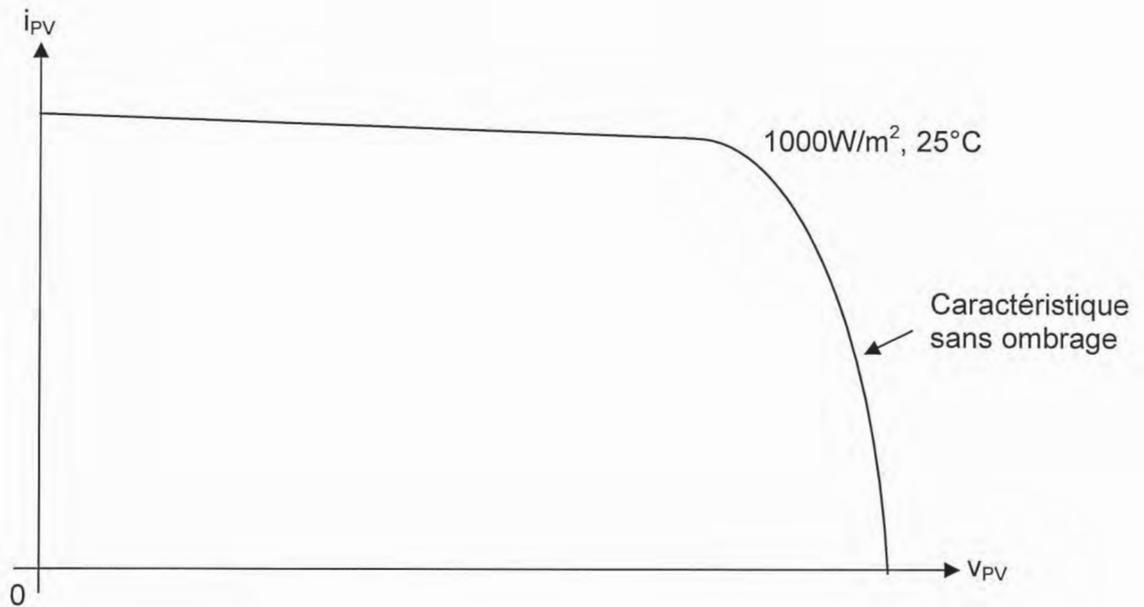




**DR3** Effet des ombrages

**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 40 %



**Q13** : Caractéristique  $p_{PV}(V_{PV})$  d'un panneau photovoltaïque avec une cellule masquée à 40%



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

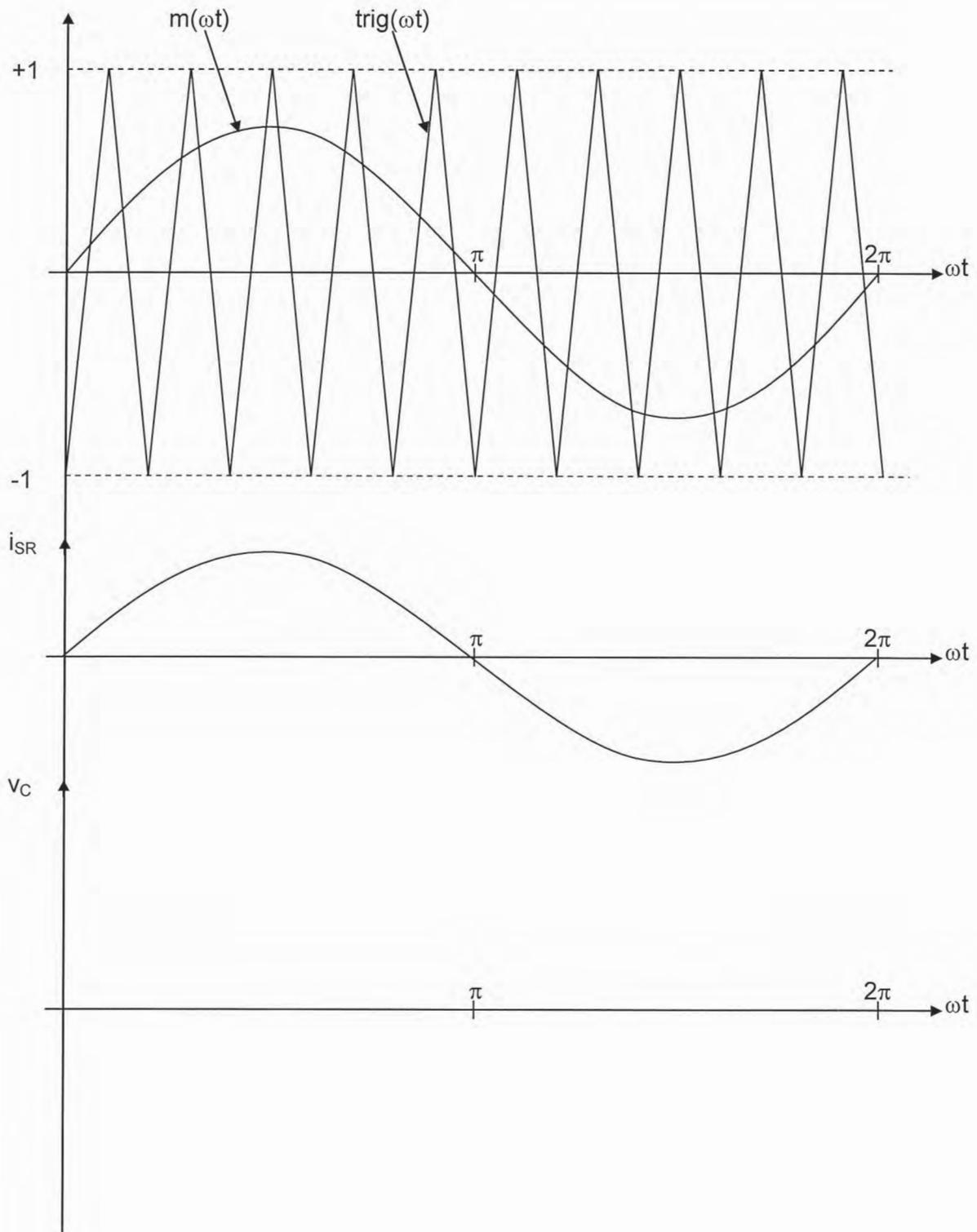
**Q15** : Tensions et courants traversant les cellules en présence d'ombrage lorsque la branche est court-circuitée.

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

	<b>Cellule ombrée à 40%</b>	<b>Cellule éclairée à 100%</b>
<b>V<sub>cell</sub></b>		
<b>I<sub>Cell</sub></b>		
<b>P<sub>cell</sub></b>		

DR5 Onduleur MLI

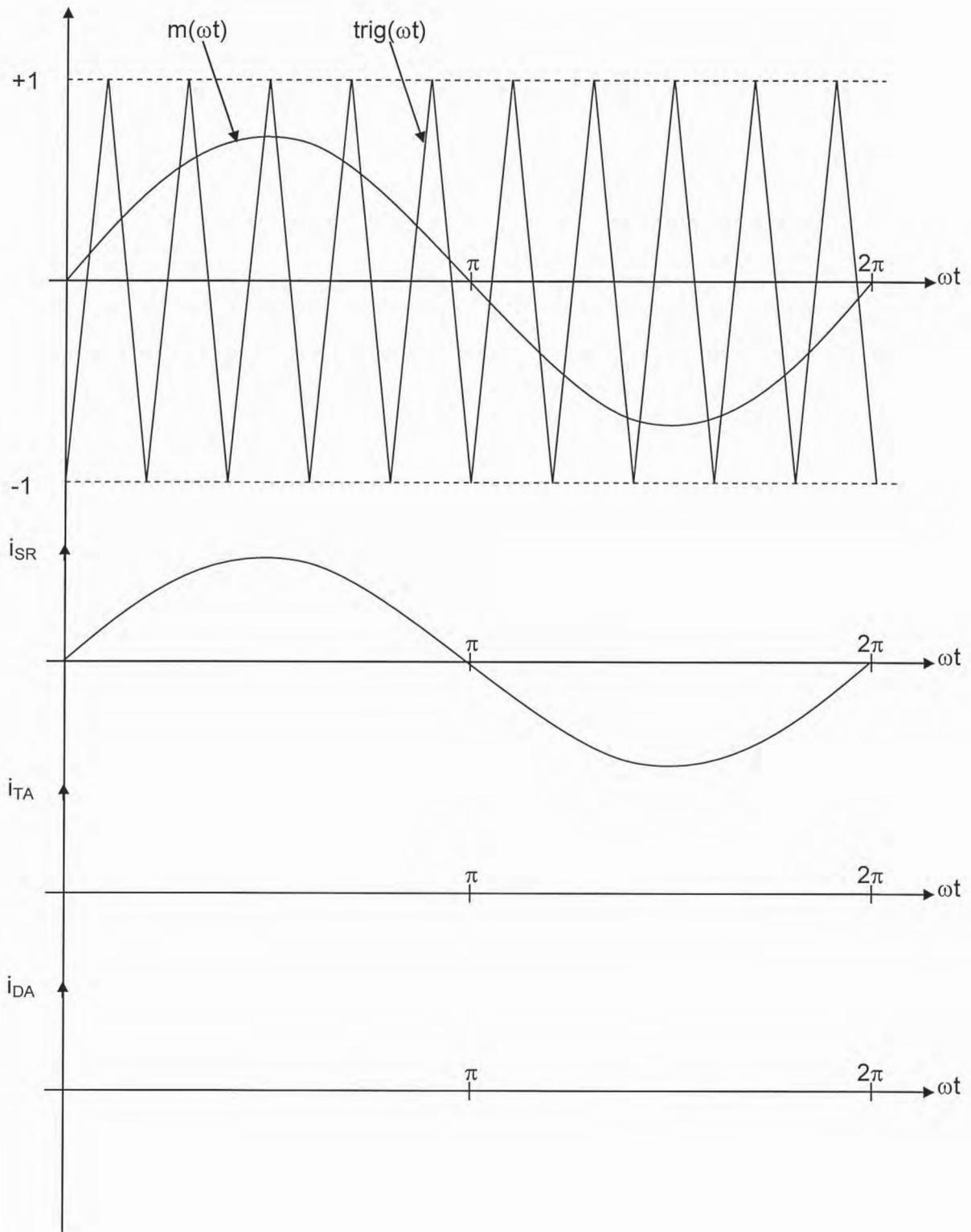
Q18 : tracé de  $v_C(\omega t)$





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

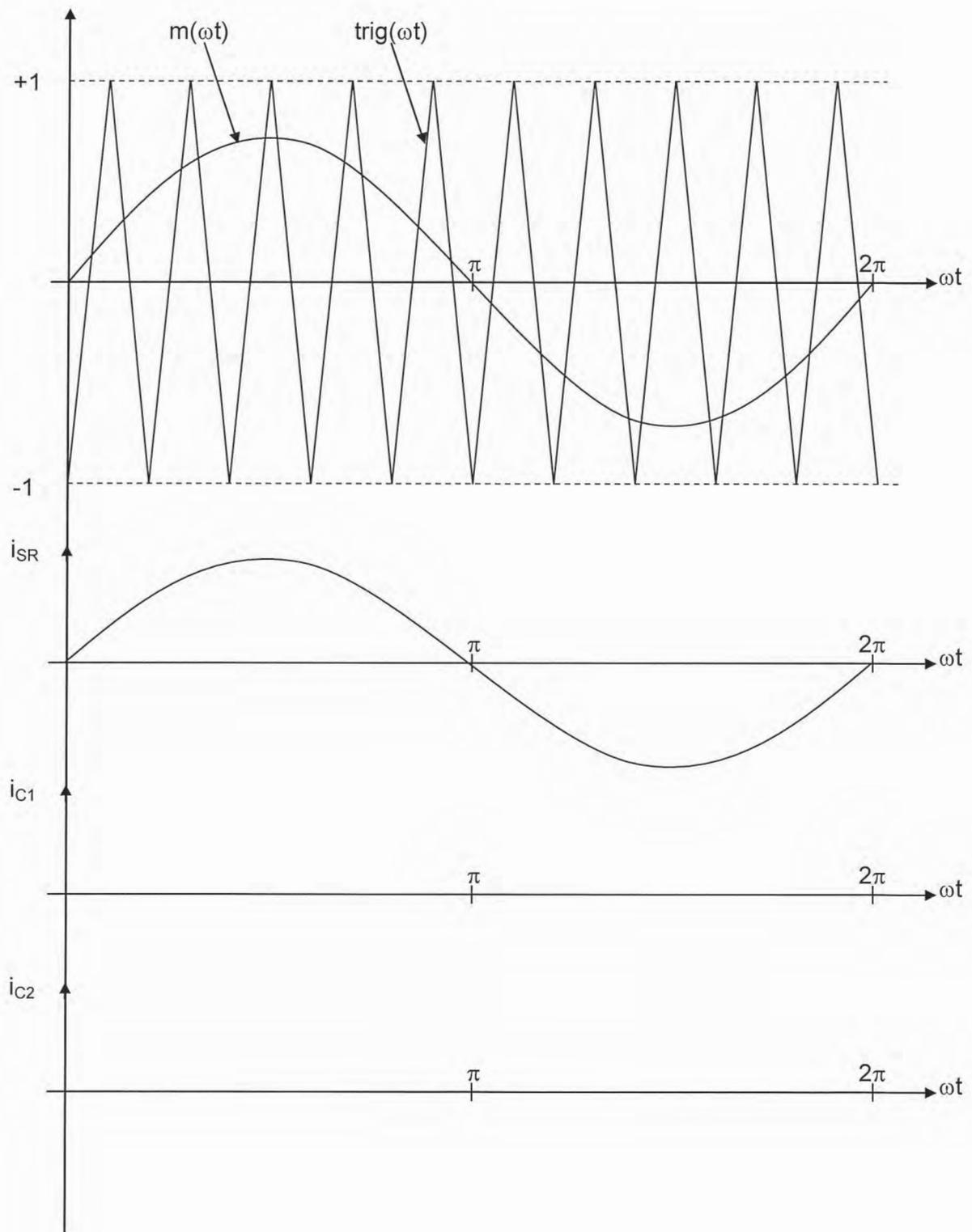
**Q33** : Pertes par commutation

**Q34** : Pertes totales

<b>Interrupteur</b>	<b>Tension crête</b>	<b>Courant moyen</b>	<b>Courant efficace</b>	<b>Pertes par conduction</b>	<b>Pertes par commutation</b>
<b>IGBT <math>T_A, T_B</math></b>					
<b>Diodes <math>D_A, D_B</math></b>					
<b>Pertes totales onduleur</b>					

DR8 Onduleur MLI

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

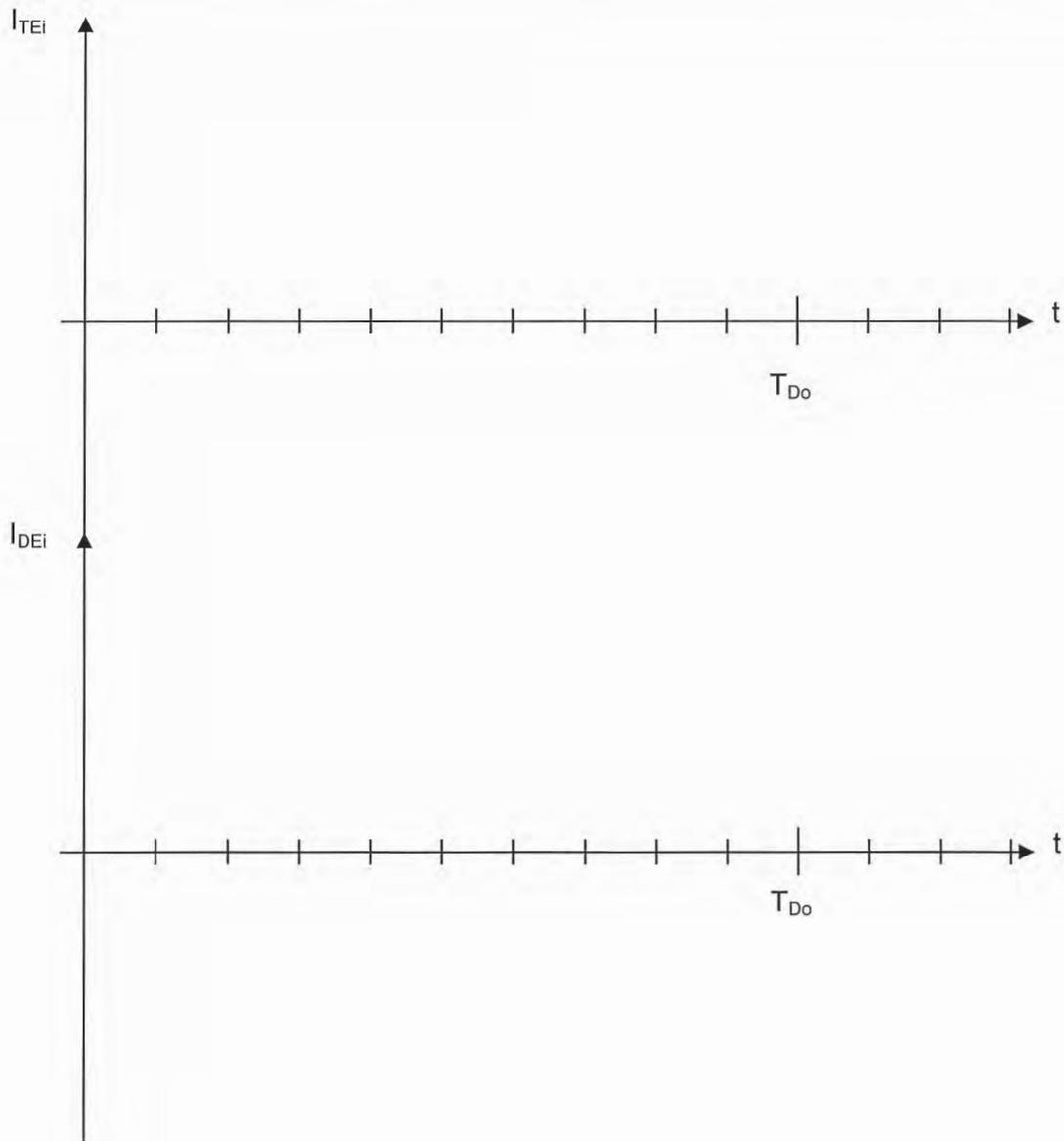




**DR9** Etage MPPT

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

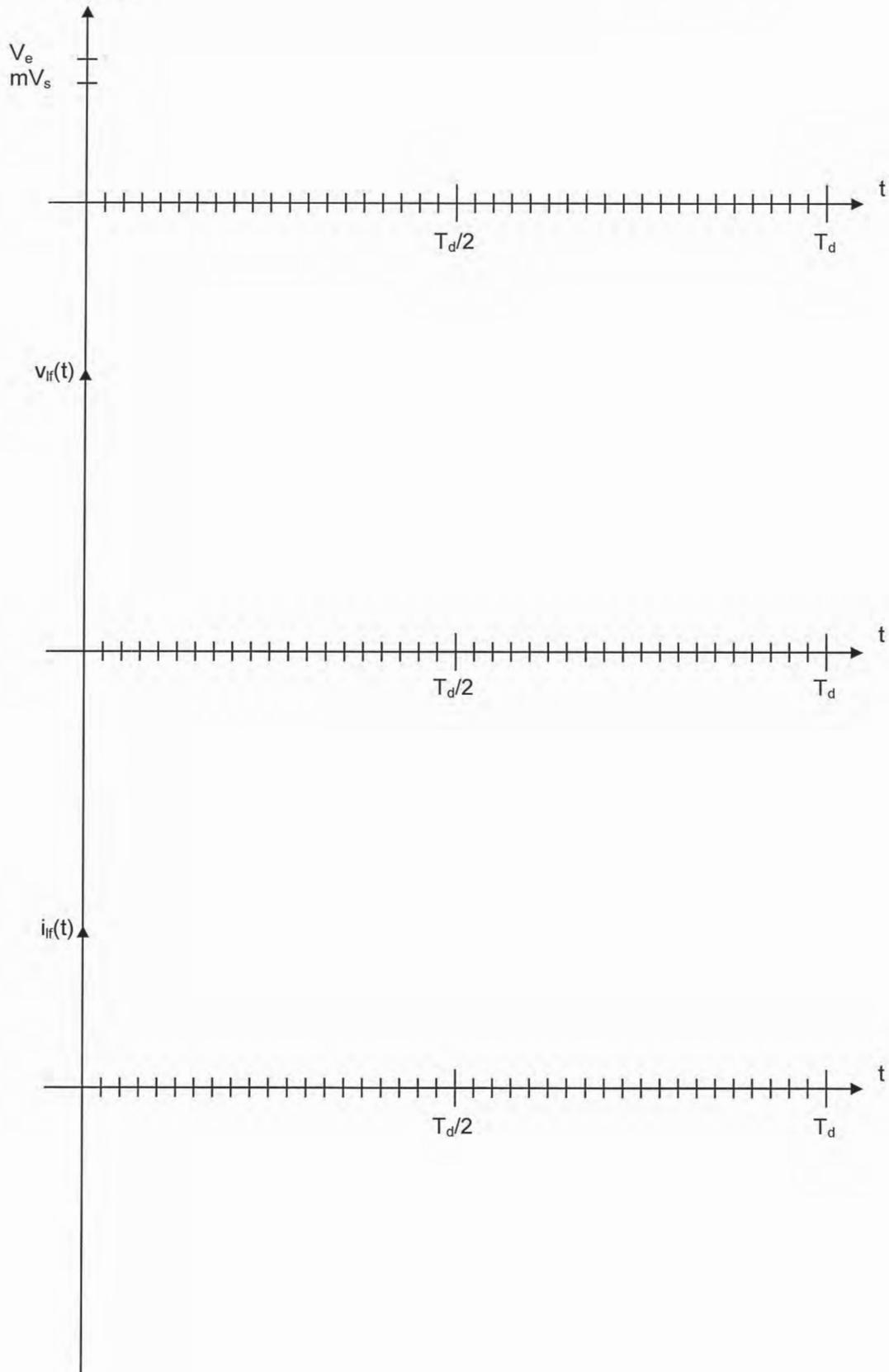
$\langle i_{MPPi} \rangle = \dots\dots\dots$
$\alpha_{MPPi} = \dots\dots\dots$
$\Delta i_{MPPi} = \dots\dots\dots$



**DR10** Structure DAB

**Q52** : Formes d'ondes dans le transformateur de la structure DAB

$v_1(t), v_2(t)$



**DR11** Structure DAB

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

