

# Photovoltaïque raccordé au réseau

## Choix et optimisation des étages de conversion

Stéphane VIGHETTI, Benjamin VALLET

G2Elab, CNRS UMR 5269 INPG/UJF, BP 46, 38402 Saint Martin d'Hères Cedex, France

Email : [stephane.vighetti@g2elab.inpg.fr](mailto:stephane.vighetti@g2elab.inpg.fr)

**Résumé** — L'intégration au bâti de capteurs photovoltaïques provoque de plus en plus de problèmes d'ombrage qui diminuent fortement l'énergie produite par ces systèmes. De plus la conception des modules photovoltaïques repose sur une conception destinée aux systèmes isolés, qui possèdent des tensions de sortie adaptées aux batteries plomb. Dans cet article, on se propose de concevoir l'électronique de puissance adaptée à un module photovoltaïque destiné à une connexion au réseau et d'utiliser cette électronique de puissance pour diminuer l'impact des ombrages sur l'énergie produite. Ainsi, le rendement énergétique d'une installation photovoltaïque est amélioré. La première partie de cet article vise l'optimisation de la structure « électronique de puissance plus modules photovoltaïques ». Pour réaliser cette optimisation, des modèles de pertes et de volumes des différents composants d'un boost ont été développés. Dans la troisième partie, les structures optimisées sont confrontées à des situations d'ombrages typiques.

### I. INTRODUCTION

Cette étude porte sur l'optimisation de la chaîne de conversion d'une installation photovoltaïque (PV) raccordée au réseau de distribution d'électricité. Cette application connaît un fort développement ces dernières années grâce notamment au tarif de rachat de l'électricité produite très avantageux. L'étude effectuée est destinée à des installations PV de type résidentiel, leur puissance est comprise entre 1 et 5 kWc. Ces installations, de part leurs fortes intégrations aux bâtiments et leurs développements en zones urbaines, sont soumises à de forts ombrages. La solution proposée devra donc diminuer les effets d'ombrage tout en gardant une fiabilité et un coût imposés par le marché. Cette étude fait partie d'un projet qui a pour finalité d'augmenter la productivité de plus de 5% et d'améliorer la disponibilité globale du système en remettant en cause toutes les parties d'une installation PV raccordée au réseau. Cette étude concerne plus particulièrement l'aspect électronique de puissance d'une installation PV. Le but de ces travaux est d'aborder une réflexion sur le choix des étages de conversion en termes de structure, de dimensionnement et de technologie, en vue de déterminer la structure la plus optimale possible en fonction des caractéristiques des cellules photovoltaïques.

### II. LA STRUCTURE DE CHAMPS ETUDIEE

La recherche bibliographique effectuée a révélé le grand intérêt de la mise en série de convertisseurs DC/DC entre les modules PV et l'onduleur pour diminuer les impacts de l'ombrage et ainsi maximiser l'énergie produite. Le convertisseur Boost [1] a montré un grand intérêt au sein de cette structure. En effet, son élévation de tension, son bon rendement, sa fiabilité, la possibilité d'effectuer un Maximum Power Point Tracking (MPPT) et son coût faible sont des avantages déterminants. Ces constats ont porté notre intérêt sur l'étude de la structure ci-dessous.

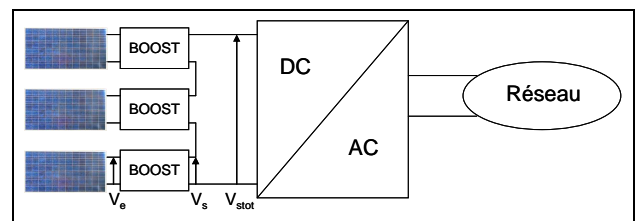


Fig. 1 : Schéma de la structure étudiée

De plus, cette étude bibliographique a montré que très peu de travaux ont remis en cause la conception historique des modules photovoltaïques à des tensions de 12 ou 24V, liée à l'application en site isolé. Aujourd'hui, c'est l'électronique de puissance qui s'adapte aux modules PV existants pour effectuer la connexion au réseau.

### III. VALIDATION DU FONCTIONNEMENT DE LA STRUCTURE

Pour vérifier le bon fonctionnement de la structure présentée sur la figure 1, nous avons réalisé des simulations PSIM. Les simulations effectuées avaient pour but de montrer que la structure fonctionnait correctement en régime normal, ce qui sous entend que toutes les cellules PV ont le même point de fonctionnement. Ces simulations avaient aussi pour but de montrer que cette structure présentait un intérêt en cas d'ombrage de cellules.

Pour réaliser ces simulations nous nous sommes placés dans le cas simplifié où nous avons :

- 2 convertisseurs en cascade
- Chaque convertisseur possède trois cellules en entrée
- Les interrupteurs et les diodes sont parfaits
- La tension du bus DC est maintenue constante à 7,2V (grâce à l'adaptation de la résistance Rch)
- Les cellules PV délivrent 0,6V et 5A en régime

nominal

- Le rapport cyclique  $\alpha$  nominal des convertisseurs est de 0,5
- Les boost fonctionnent en conduction continue.

Le schéma des simulations est présenté sur la figure 2.

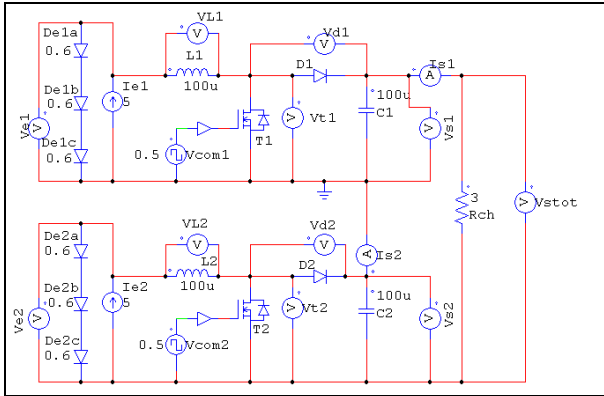


Fig. 2 : Schéma des simulations PSIM

Les simulations effectuées sous PSIM ont permis de valider le fonctionnement de la structure dans tous les cas de fonctionnement. De plus ces simulations ont montré l'intérêt de cette structure en cas d'ombrage. Si ces ombrages ne sont pas trop importants, elle est capable d'équilibrer les courants pour que chaque boost délivre la totalité de la puissance disponible en entrée, et est capable d'assurer une tension de sortie fixe. Si ces ombrages sont trop importants, la structure est capable d'isoler les cellules faibles, grâce à la diode inverse des Mosfet, pour permettre aux cellules fonctionnant normalement de continuer à fournir la totalité de leur énergie.

Les simulations ont démontré le bon fonctionnement de la structure choisie dans les différents scénarios possibles.

IV. OPTIMISATION DE LA STRUCTURE

La volonté de cette étude est d'adapter les modules photovoltaïques à l'électronique de puissance nécessaire au raccordement réseau. Pour cela, une optimisation de la structure présentée sur la Figure 1 a été réalisée. Cette optimisation a pour but de définir le nombre n de cellules à mettre en série à l'entrée de chaque boost et le nombre m de boost à mettre en cascade pour maximiser l'énergie produite. Cette optimisation doit également définir le point optimal de fonctionnement des boost (Fréquence, ondulation du courant d'entrée et tension d'entrée). La figure présentée ci-dessous montre la structure à optimiser.

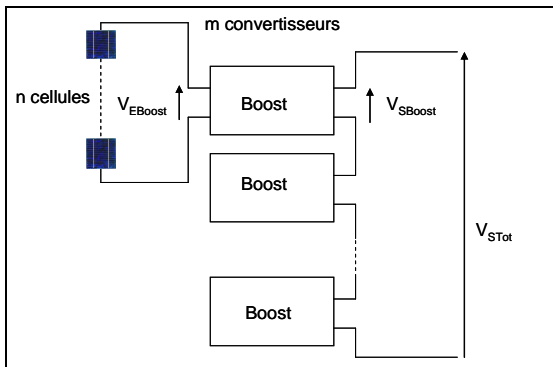


Fig. 3 : Schéma présentant l'optimisation

Le nombre maximal de cellules est fixé à 144, ce qui représente deux modules PV actuels et permet de limiter le rapport d'élévation des convertisseurs à 5 pour limiter les pertes.

Le domaine de définition des différents paramètres est défini dans le Tableau 1. Ces valeurs sont directement obtenues des caractéristiques de la structure et des contraintes liées à son fonctionnement.

Paramètre	Domaine de définition
n	1 < n < 144
m	1 < m < 144
n <sub>tot</sub>	144
Fréquence de travail du boost	20 kHz < F < 200 kHz
Ondulation du courant d'entrée du boost	10 % < ΔI < 50 %
Valeur de l'inductance du boost	10 μH < L < 2 600 μH
Tension des SC	0 V < V < 400 V
Courant des SC	5 A < I < 10 A

Tableau 1 : Les paramètres et leur domaine de définition

La définition de ces paramètres fixe les limites de l'optimisation et le domaine de validité des modèles de pertes et de volumes que nous allons développer ci-dessous.

V. LES MODELES DE PERTES ET DE VOLUME

A. Modèles des pertes

Un boost comporte quatre composants source de pertes : une inductance, un mosfet, une diode, et un condensateur. Le modèle de pertes de ce dernier a été négligé compte tenu de sa faible influence devant les autres composants.

Concernant les semi-conducteurs, des pertes par conduction, par commutation mais aussi par effet miller [3] ont été modélisées en se basant sur les équations suivantes [3].

$$\begin{aligned}
 Pertes_{MOS} = & R_{ds(on)} \times I_{eff}^2 + \frac{1}{2} E(I_{Ton} + I_{RM}) \times (t_{on} + t_{RM}) \times F \\
 & + \frac{1}{2} I_{Toff} \times t_{off} \times E \times F + \frac{1}{2} (C_{oss} + C_d) \times E^2 \times F
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$Pertes_D = V_F(I) \times I_{dmoy} + E \times Q_{RR} \times F
 \tag{2}$$

Un travail de modélisation et de normalisation des différents paramètres nécessaires ( $R_{ds(on)}$ ,  $C_{oss}$ ,  $C_d$ ,  $Q_{RR}$ ...) pour exprimer les pertes dans les semi conducteurs a été conduit à partir des différentes documentations techniques de différents fabricants. Le cahier des charges étant fixé, figeant le courant circulant dans les semi-conducteurs, ces paramètres sont simplement dépendants de la tension aux bornes du semi-conducteur et peuvent être mis en équation. On a donc obtenu l'évolution de chaque paramètre influant sur les pertes des semi-conducteurs en fonction de la tension aux bornes de ces derniers. Les équations obtenues sont répertoriées dans le Tableau 2.

hal-00348607, version 1 - 19 Dec 2008

	Equations
Pertes dans le Mosfet	$R_{dson} = 1.51 \times 10^{-2} \times V_m - 0.1143$ (3)
	$C_{oss} = 5.33 \times V_m^4 - 8.24 \times 10^{-18} \times V_m^3 + 4.11 \times 10^{-15} \times V_m^2 - 7.71 \times 10^{-13} \times V_m + 5.56 \times 10^{-11}$ (4)
	$I_{RM} = 5.60 \times 10^{-4} \times V_d^{1.59}$ (5)
Pertes induites par la diode	$C_d = 9.92 \times 10^{-10} \times V_d^{-1.08}$ (6)
Pertes dans la diode	$Q_{RR} = 1.30 \times 10^{-11} \times V_d^{1.42}$ (7)
	$V_F = 2.35 \times 10^{-3} \times V_d + 0.421$ (8)

Tableau 2 : Equations des paramètres influant les pertes dans les semi-conducteurs

A propos des pertes dans l'inductance, il a fallu les pré-calculer de manière à obtenir un tableau (4D) de valeurs en fonction de la fréquence (F), de l'ondulation de courant ( $\Delta I$ ) ainsi que de la valeur inductive (L). L'optimisation nécessitant une fonction dérivable, le tableau a été linéarisé à l'aide du logiciel FGOT (développé au laboratoire, [4]) de manière à obtenir une équation décrivant l'évolution des pertes selon les 3 paramètres (9).

$$\begin{aligned}
 \text{Pertes}_L = & -2.77655435 \times 10^{-1} + 1040.912614 \times L \\
 & + 3.136132503 \times 10^{-2} \times \Delta I + 13.4766738 \times \Delta I \times L \\
 & - 4.25 \times 10^{-4} \times \Delta I^2 + 1.709015082 \times 10^{-6} \times F \\
 & + 1.283492743 \times 10^{-3} \times F \times L - 5.0 \times 10^{-8} \times \Delta I \times L
 \end{aligned} \quad (9)$$

**B. Modèles des volumes**

Le volume des semi-conducteurs se résume à modéliser le radiateur à associer. En prospectant les documentations techniques, nous avons pu ainsi obtenir une équation du volume en fonction de la résistance thermique du radiateur nécessaire (10).

$$\text{Vol}_{rad} = 5.68 \times 10^{-4} \times R_{thrad} - 1.480 \quad (10)$$

Le volume de l'inductance est fonction des dimensions du noyau et des spires nécessaires. Ces dimensions sont directement liées à la valeur de l'inductance (11).

$$\text{Vol}_L = 5.912 \times 10^{-5} \times \arctan(4.192 \times 10^{-3} \times L) \quad (11)$$

Enfin nous avons également pris en compte le volume des condensateurs en se référant aux documentations techniques des condensateurs de technologie électrolytique. Le volume du condensateur évolue linéairement en fonction de la tension appliquée (12).

$$\text{Vol}_{condo} = 1.17 \times 10^{-8} \times V + 3.13 \times 10^{-7} \quad (12)$$

**VI. VALIDATION DES MODELES DE PERTES**

Avant de procéder à l'optimisation de la structure, nous avons validé les modèles de pertes obtenues. Pour cela nous avons confronté les résultats obtenus avec ces modèles à ceux obtenus en dimensionnant réellement deux convertisseurs et en calculant leurs pertes. Les résultats sont présentés dans le

Tableau 3.

	1 convertisseur (F = 20 kHz, $\Delta I = 50\%$ et L = 1 313 $\mu\text{H}$ )		8 convertisseurs (F = 37 kHz, $\Delta I = 17\%$ et L = 225 $\mu\text{H}$ )	
	Valeurs issues du calcul	Valeurs issues de l'optimisation	Valeurs issues du calcul	Valeurs issues de l'optimisation
Pertes Mosfet	20,98 W	23,08 W	38,78 W	38,07W
Pertes diode	1,81 W	2,1 W	4,8 W	5,15 W
Pertes inductance	3,44 W	2,5 W	3,3 W	4,02 W
Pertes totales au point nominal	26.24 W	27,69 W	46,89 W	47,25 W

Tableau 3 : pertes obtenues par les modèles et les celles calculées lors d'un dimensionnement réel

Les résultats trouvés par les deux méthodes sont très proches, la différence est inférieure à 5%. On peut donc considérer que nos modèles sont donc cohérents et suffisamment précis pour une première approche d'optimisation.

**VII. RESULTATS D'OPTIMISATION SANS OMBRAGE**

Deux optimisations ont été réalisées, l'une avec comme fonction objectif la minimisation du volume et l'autre avec la maximisation du rendement européen. Ce rendement européen prend en compte la répartition solaire. Il se rapproche donc d'un rendement énergétique. Son expression est la suivante :

$$\eta_{euro} = 0.03\eta_5 + 0.06\eta_{10} + 0.13\eta_{20} + 0.17\eta_{30} + 0.48\eta_{50} + 0.27\eta_{100} \quad (13)$$

où  $\eta_x$  est le rendement à x% de la puissance nominale [2].

Les optimisations ont été effectuées sous CADES [3], un logiciel développé au G2Elab, utilisant un algorithme déterministe. Les résultats obtenus sont les suivants :

Paramètres	Optimisation maximisant $\eta$ européen	Optimisation minimisant le volume
m	2.02	9.63
n	71.3	14.96
F	31 511 Hz	122 302 Hz
$\Delta I$	12 %	50 %
L	1 700 $\mu\text{H}$	223 $\mu\text{H}$
Volume	0.408 L	0.235 L
$\eta$ européen	94.8 %	87.1 %

Tableau 4 : Résultats des deux optimisations

**A. Maximisation du  $\eta$  européen**

Dans cette optimisation, tous les paramètres sont des paramètres continus, or m et n sont en réalité des paramètres entiers. Le point obtenu de 2.02 convertisseurs n'est pas réaliste. Néanmoins, il se rapproche très fortement de la

structure avec 2 convertisseurs. Après vérification, la variation des paramètres entre les deux cas est négligeable.

On peut noter (Fig. 4) que le rendement est maximum pour deux convertisseurs, puis il diminue lorsque le nombre de convertisseur augmente.

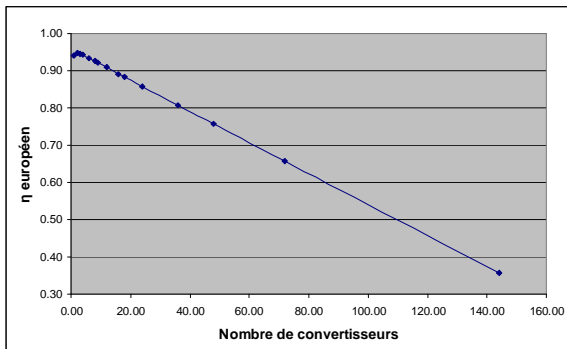


Fig. 4 : Evolution du rendement européen en fonction du nombre de convertisseurs

L'optimisation sur le rendement européen tend donc vers une structure comptant deux convertisseurs ayant chacun 72 cellules PV en entrée et fonctionnant à 30 kHz et à un  $\Delta I$  de 12%. Cette optimisation montre aussi que si l'on veut conserver un rendement convenable, la structure ne doit pas compter plus de 10 convertisseurs.

#### B. Minimisation du volume

Lorsque nous minimisons le volume, on trouve une solution optimale proche de 10 convertisseurs. La fréquence (122 kHz) et le  $\Delta I$  (50 %) sont beaucoup plus importants par rapport à la structure optimisant le rendement européen.

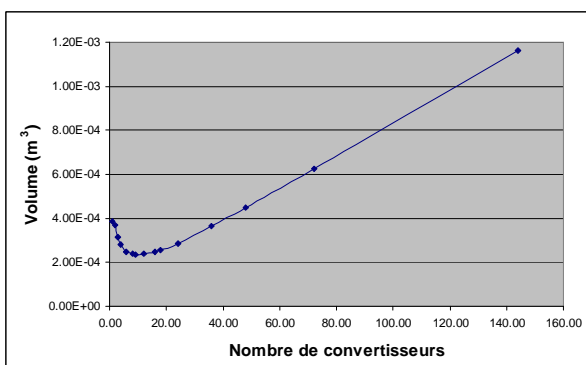


Fig. 5 : Evolution du volume en fonction du nombre de convertisseurs

Le volume minimum obtenu est de 0,235 L soit deux fois moins que pour la structure optimisant le rendement. Cette diminution du volume se fait aux dépend du rendement qui chute à 87,1%.

Cette optimisation sur le volume montre également que le nombre de convertisseurs doit être inférieur à 20 si l'on veut conserver un volume raisonnable pour l'ensemble des convertisseurs.

Ces résultats ont tendance à limiter le nombre de convertisseurs vers un nombre assez faible.

### VIII. INTEGRATION DU PROBLEME DE L'OMBRAGE

L'optimisation effectuée ne prend pas en compte les problèmes d'ombrages. Lorsqu'une cellule est ombrée elle

impact l'ensemble des cellules qui sont mises en série avec elle [6]. Si des diodes by-pass sont mises en anti-parallèle alors l'ombrage d'une cellule peut suffire à by-passer toutes les cellules connectées à cette même diode by-pass. L'impact des cellules ombrées sur le productible peut donc être très différent selon leur disposition.

#### A. Influence de la disposition de l'ombrage

Pour prendre en compte ces différences nous avons simulé les deux cas extrêmes, le cas où l'impact de l'ombrage est maximisé et celui où il est minimisé. En effet, les cellules ombrées peuvent être toutes situées sur le même groupe (sur la même diode by-pass); dans ce cas, seul ce groupe est touché par l'ombrage. Ce cas est par la suite appelé « groupées » et correspond à l'impact minimum possible. Le second cas pris en compte ici répartit les cellules ombrées sur des groupes différents. Dans ce cas l'ombrage a un impact maximum sur la puissance de sortie. Dans la suite de l'étude ce cas sera dénommé « dispatchées ».

En étudiant le cas particulier où 8 cellules sur les 144 sont ombrées (Fig. 6) on s'aperçoit que la répartition des cellules ombrées peut multiplier par 2 la puissance de sortie. Le graphique montre que le maximum de puissance se situe pour une structure à 8 convertisseurs et qu'une structure de plus de 20 convertisseurs n'est pas viable.

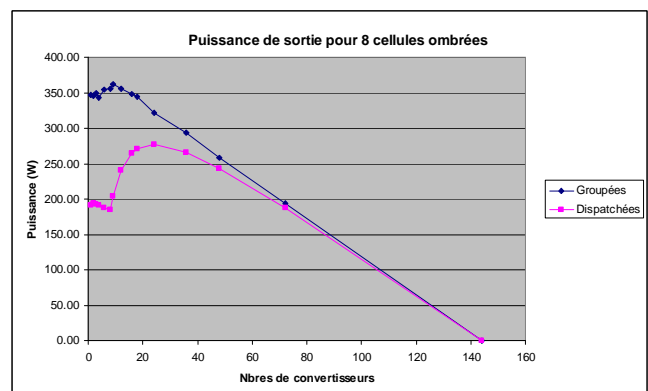


Fig. 6 : Impact de 8 cellules ombrées sur la puissance en fonction du nombre de convertisseurs

Ces résultats sont fortement dépendants du nombre de cellules ombrées, de la répartition des cellules ombrées et de l'opacité de l'ombre.

#### B. Le programme Matlab

Devant la dépendance des résultats précédents au nombre de cellules ombrées, à leur disposition sur le module, au nombre de convertisseurs et à la puissance du soleil, un programme a été établi pour prendre en compte toutes ces données. Le programme est capable de calculer le productible d'une installation PV disposée sur un toit en prenant en compte l'ombrage créé par une cheminée et les données solaire du site étudié. Le programme utilise les données issues de l'optimisation pour définir les convertisseurs utilisés.

#### C. Etude à puissance fixe

Avant d'étudier un cas réel, une étude à puissance fixe a été réalisée. Dans ce test nous allons comparer la solution

classique avec les structures possédant 2, 3, 4, 6 et 8 boosts pour différents cas d'ombrage en termes de puissance disponible en sortie. Ici, la puissance solaire est de 1000W/m<sup>2</sup> et l'ombrage a une opacité de 50 %. L'étude de la solution classique prend en compte les effets des diodes by-pass.

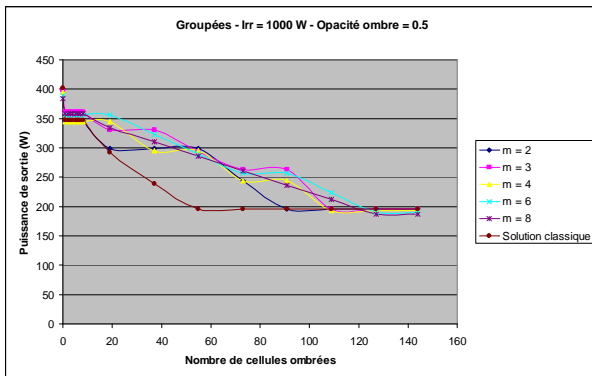


Fig. 7 : Comparaison des différentes structures en fonction du nombre de cellules ombrées

Comme l'a montré l'optimisation, la structure possédant 2 boosts est la structure la plus performante lorsqu'il n'y a aucun ombrage et lorsque la totalité du champ est ombré. Les structures possédant les boosts en série sont plus performantes que la solution classique entre 20 et 90 cellules ombrées. Dans ces conditions les structures avec boosts évoluent toutes de la même manière. Lorsque l'ombrage est faible (inférieur à 20) ou quasi constant (supérieur à 90) toutes les structures ont des puissances de sortie proches avec un léger avantage pour la structure à 2 boosts. Les résultats sont similaires si l'on dispatche les cellules ombrées.

*D. L'étude d'un cas réel*

Dans la partie précédente, nous avons considéré un ombrage constitué d'un nombre de cellules constant au cours de la journée. Pour se rapprocher d'un cas réel nous allons dans cette partie étudier l'impact d'un ombrage typique sur l'énergie produite au cours d'une année. L'ombrage typique considéré ici est l'ombrage d'une cheminée située au sud-ouest des modules PV.

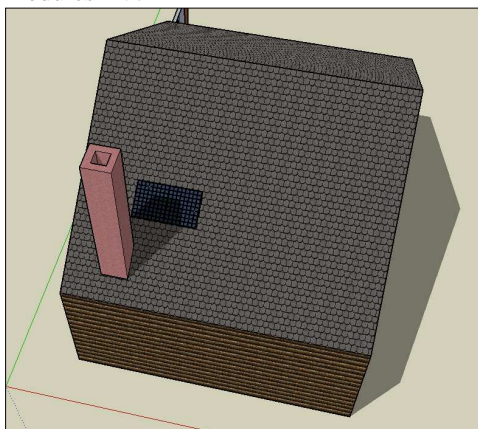


Fig. 8 : représentation graphique du cas étudié

Pour pouvoir comparer les structures entre elles, les diodes by-pass sont disposées toutes les 12 cellules et non toutes les 18 cellules comme c'est actuellement le cas dans les modules industriels.

La solution classique est capable de produire entre 380 et 410 kWh selon que l'on dispatche ou que l'on groupe les cellules ombrées (Fig. 9 et Fig. 10). Le générateur photovoltaïque a une puissance de 340 W. Les valeurs d'énergie obtenues sont donc cohérentes avec les valeurs moyennes pour la région de Grenoble (entre 1 200 et 1 300 Wh/Wc installé). Cette observation permet de confirmer la validité et la précision du modèle et du programme Matlab.

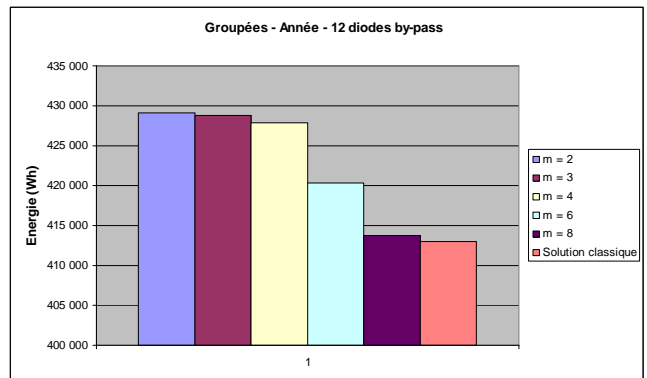


Fig. 9 : Energie annuelle selon le nombre de convertisseurs, en groupant les cellules ombrées

Lorsque l'on groupe les cellules ombrées, la solution avec 2 boosts est la plus performante.

Les structures avec 3 et 4 boosts ont toutes une énergie produite sur une année relativement proche. Ces structures produisent environ 10 % d'énergie en plus que la structure classique.

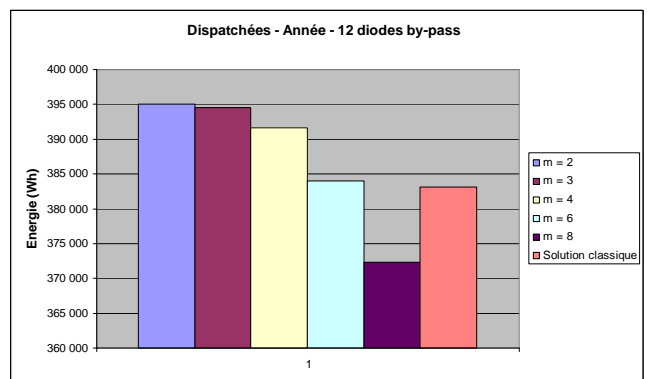


Fig. 10 : Energie annuelle selon le nombre de convertisseurs, en dispatchant les cellules ombrées

Lorsque les cellules ombrées sont dispatchées on trouve des résultats similaires, seul le niveau d'énergie change.

On retrouve une décroissance de productivité lorsque le nombre de convertisseurs augmente comme on pouvait s'y attendre au vu des résultats de l'optimisation.

IX. IMPACT D'UN MISMATCH IMPORTANT

Les études précédentes ont montré que la solution possédant 2 boosts était la plus productive dans la majorité des cas. Pour confirmer l'intérêt de cette structure par rapport à la solution classique nous avons réalisé une étude avec un éclairage fortement non homogène du champ PV.

Pour réaliser un éclairage non homogène, nous avons appliqué un niveau d'éclairage différent aux cellules. La

répartition de l'éclairement des cellules s'est faite selon le schéma suivant :

- 75 % des cellules fonctionnent à 100 % de Irr, soit 108 cellules,
- 15 % des cellules fonctionnent à 50 % de Irr, soit 22 cellules,
- 5 % des cellules fonctionnent à 25 % de Irr, soit 7 cellules,
- 5 % des cellules fonctionnent à 0 % de Irr, soit 7 cellules.

Ces conditions d'éclairement non homogène simulent les conditions que l'on peut rencontrer en milieu urbain sur une installation intégrée au bâti. Dans ces installations les modules peuvent avoir des orientations et inclinaisons différentes, des niveaux de salissure différents et des salissures ponctuelles (fiente d'oiseaux, feuilles...). Irr représente ici l'irradiation solaire et s'exprime en W/m<sup>2</sup>.

La première comparaison réalisée a été faite pour une journée du mois de juin. Dans ces conditions, la structure avec 2 boosts est capable de fournir 1 523 kWh alors que la solution classique ne fournit que 963 kWh. Le gain de productible est de près de 60 %.

La seconde comparaison réalisée a été faite pour une journée du mois de décembre. Dans ces conditions, la structure avec 2 boosts est capable de fournir 369 kWh alors que la solution classique ne fournit que 261 kWh. Le gain de productible est de 40 %.

Nous avons vu que dans des conditions difficiles (typiquement intégré au bâti) la structure avec 2 boosts est capable de fournir beaucoup plus d'énergie que la solution classique.

## X. CONCLUSION

La structure ayant 2 boosts est, comme l'a montrée l'optimisation, la structure la plus performante sans ombrage ou lorsque l'ombrage est important et homogène.

Cette structure est également plus performante que la structure classique en présence d'un ombrage. Sur un cas typique (ombrage d'une cheminée) elle permet de produire 4 % d'énergie en plus, soit près de 20 000 Wh sur une année.

Ces structures sont également grandement plus performantes que la solution classique en cas de mismatch important sur le champ PV. Le gain obtenu peut approcher les 60% d'énergie supplémentaire.

Les propriétés des structures de champ PV distribuées sont donc très intéressantes lorsque le système présente un fort mismatch. Ces conditions se retrouvent dans le photovoltaïque intégré au bâti (Inclinaison et orientation différentes des modules). Ces inconvénients majeurs de l'intégré bâti disparaissent avec cette structure distribuée de convertisseur.

## XI. REFERENCES

[1] Geoffrey R. Walker and Paul C. Sernia – *Cascaded DC-DC Converter Connection of Photovoltaic Modules* IEEE transactions on power electronics, vol. 19, no. 4, July 2004.

[2] J. M. A. Myrzik, and M. Calais – *String and Module Integrated Inverters for Single-phase Grid Connected Photovoltaic Systems - A Review* - IEEE Bologna Power Tech Conference, Italy, 23-26 June 2003.

[3] [3] DANG Bang Viet – *Conception d'une interface d'électronique de puissance pour pile à combustible* - Thèse de doctorat UJF, G2Elab 2006.

[4] B. Delinchant, D. Duret, L. Estrabaut, L. Gerbaud, H. Nguyen Huu, B. Du Peloux, H.L. Rakotoarison, F. Verdiere, F. Wurtz - *An optimizer using the software component paradigm for the optimization of engineering systems* - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. 2007, Volume: 26, Issue: 2, Page: 368 – 379.

[5] Toshihisa Shimizu, Masaki Hirakata, Tomoya Kamezawa, and Hisao Watanabe - *Generation Control Circuit for Photovoltaic Modules* - IEEE transactions on power electronics, vol. 16, n°3, may 2001.

[6] S. Vighetti – *Photovoltaïque raccordé au réseau : choix et optimisation des étages de conversion* – Master 2 recherche EEATS, G2Elab 2008.