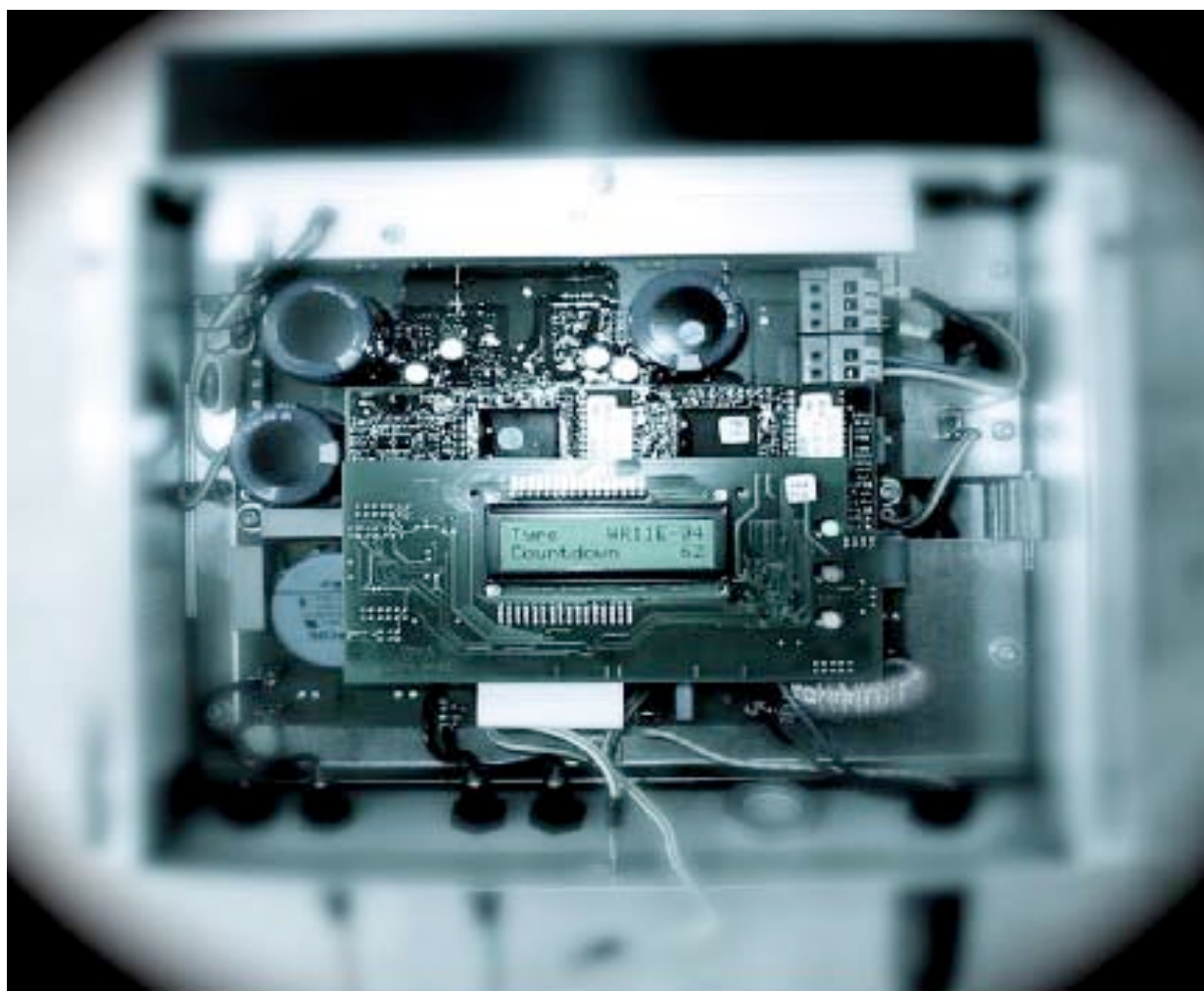




Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques

Fonctionnement, Etat de l'Art et Etude des Performances

- Août 2007 -



Rapport rédigé par Violaine Didier
sous la direction de Bruno Gaidon

HESPUL

114, Boulevard du 11 Novembre 1918 - 69100 VILLEURBANNE

Tel : +33 (0)4 37 47 80 90 - Fax : +33(0)4 37 47 80 99

e-mail : info@hespul.org

site internet : www.hespul.org

Avant-propos

Hespul est une association loi de 1901, dont l'objet social est le développement de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables. Elle est spécialisée depuis 1991 dans la promotion et les opérations de démonstration de la filière photovoltaïque, et plus spécialement dans sa version raccordée au réseau.

Entre 1993 et 2001, Hespul a coordonné plusieurs projets de démonstration financés par la Commission Européenne (DG TREN) visant à l'installation de systèmes photovoltaïques raccordés au réseau de faible puissance.

L'expérience acquise par Hespul au cours de ces projets de démonstration se traduit par une expertise à la fois technique, économique et juridique sur les conditions de mise en œuvre du photovoltaïque en France. Elle permet d'accompagner les maîtres d'ouvrage, les développeurs de projets ainsi que les pouvoirs publics. Par ailleurs, Hespul participe désormais à plusieurs groupes d'experts internationaux comme par exemple la Plate-forme Technologique Européenne du Photovoltaïque et l'Agence Internationale de l'Énergie.

En parallèle de cette activité qui reste principale, Hespul a été intégrée à partir de 2000 dans le réseau des Espaces-Info-Energie mis en place par l'ADEME avec la responsabilité géographique du département du Rhône et une compétence multi-filières, énergies renouvelables et efficacité énergétique comprises. Cela a permis de mettre en pratique une approche territoriale parfaitement complémentaire des aspects purement techniques déjà bien maîtrisés.

Le présent rapport, rédigé par Violaine DIDIER sous la direction de Bruno GAIDDON, constitue un travail de synthèse sur le fonctionnement des onduleurs des systèmes photovoltaïques et les différences des différents types d'appareils présents sur le marché actuel.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	2
SOMMAIRE	3
INTRODUCTION.....	4
A. GENERALITES ET PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT	5
A.1. DEFINITION	5
A.2. CARACTERISTIQUES PROPRES A UN ONDULEUR POUR SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES (PV) 5	
A.3. DETAILS TECHNOLOGIQUES	7
A.3.A PRINCIPAUX TYPES D'ONDULEURS RENCONTRES	7
A.3.B ROLE DU CONDENSATEUR D'ENTREE.....	10
A.3.C METHODES DE RECHERCHE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE	11
B. ETAT DE L'ART DES ONDULEURS MODULAIRES POUR INSTALLATIONS PHOTOVOLTAÏQUES	14
B.1. RENDEMENT MAXIMAL :	14
B.2. GAMME DE TENSIONS D'ENTREE	14
B.3. LA DUREE DE VIE.....	16
B.4. LES PROBLEMES DE VENTILATION	16
B.5. GESTION DU RESEAU	17
B.6. INTERRUPTEUR DC*	18
B.7. MESURES DES COURBES CARACTERISTIQUES IV	18
B.8. MEMOIRE DE STOCKAGE.....	18
B.9. ETHERNET	19
B.10. ORIENTATION DES PANNEAUX EST-OUEST.....	19
B.11. MODULES A COUCHES MINCES	20
C. ETUDE DES PERFORMANCES	21
C.1. AVANT-PROPOS	21
C.2. METHODOLOGIE EMPLOYEE POUR LES TESTS	21
C.2.A CONDITIONS DE TESTS	21
C.2.B ÉQUIPEMENT DE MESURE	22
C.2.C MODELE DE FICHE METHODOLOGIQUE UTILISEE POUR LA SYNTHESE DES TESTS	23
C.3. FICHES RECAPITULATIVES DES DIFFERENTS ONDULEURS TESTES	26
C.3.A FICHE FRONIUS, ONDULEUR IG 30.....	26
C.3.B FICHE SMA, ONDULEUR SUNNY BOY 3800.....	29
C.3.C FICHE SPUTNIK, ONDULEUR SOLARMAX 2000C	32
C.3.D FICHE SIEMENS, ONDULEUR SITOP SOLAR 1100 MASTER.....	35
C.3.E FICHE KACO, ONDULEUR POWADOR 3501XI	38
CONCLUSION	41
REFERENCES	42
LEXIQUE	43

Introduction

Au niveau mondial, le marché des systèmes photovoltaïques connaît, depuis maintenant plus de 10 ans, un taux de croissance très élevé, de l'ordre de 30 à 40% par an.

Cette croissance exceptionnelle, due principalement aux systèmes photovoltaïques raccordés au réseau de distribution d'électricité, se traduit bien évidemment par des innovations technologiques et une baisse de coûts des modules photovoltaïques mais aussi à des efforts importants de recherche et développement dans le domaine de l'électronique de puissance.

En effet, les performances techniques et la fiabilité des onduleurs utilisés pour le raccordement des modules photovoltaïques systèmes au réseau de distribution d'électricité, sont des paramètres qui peuvent très fortement faire varier la production d'énergie électrique annuelle et donc la rentabilité financière d'un système.

L'objectif de ce rapport est de mieux faire connaître ces appareils d'électronique de puissance en présentant leur principe de fonctionnement ainsi que les principaux types de machines rencontrés sur le marché. Une synthèse de l'état de l'art de cette filière industrielle et des principales innovations technologiques est ensuite présentée, suivie de fiches résumant des tests réalisés par un des principaux magazines de la presse spécialisée en photovoltaïque au niveau mondial, Photon International.

*Un lexique est situé en annexe 1. Il donne des explications sur certains dispositifs, abréviations et notations utilisées tout au long du rapport. Les mots référencés sont marqués d'une petite étoile « * ».*

A. GENERALITES ET PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT

A.1. Définition

Un onduleur est un dispositif permettant de transformer en alternatif une énergie électrique de type continue.

Ils sont utilisés en électrotechnique pour :

- Soit fournir des tensions ou courants alternatifs de fréquence et amplitudes variables.

Ex : C'est le cas des onduleurs servant à alimenter des moteurs à courant alternatif devant tourner à vitesse variable par exemple (la vitesse est liée à la fréquence des courants qui traversent la machine).

- Soit fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes.

Ex : C'est le cas en particulier des alimentations de sécurité destinées à se substituer au réseau en cas de défaillance de celui-ci par exemple. L'énergie stockée dans les batteries de secours est restituée sous forme continue, l'onduleur est alors nécessaire pour recréer la forme de tension et fréquence du réseau.

On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue : source de tension ou source de courant. La technologie des onduleurs de tension est la plus maîtrisée et est présente dans la plupart des systèmes industriels, dans toutes les gammes de puissance (quelques Watts à plusieurs MW).

A.2. Caractéristiques propres à un onduleur pour systèmes photovoltaïques (PV)

Les onduleurs destinés aux systèmes photovoltaïques sont quelques peu différents des onduleurs classiques utilisés en électrotechnique, mais l'objectif de conversion AC*/DC* est le même.

La principale caractéristique de l'onduleur PV est la recherche du meilleur point de fonctionnement du système.

En effet, le générateur PV (ensemble de modules PV) a une courbe caractéristique IV non linéaire (figure 1).

Pour un éclairement et une température donnés, la tension en circuit ouvert ou à forte charge est à peu près constante (assimilable à une source de tension), tandis qu'en court-circuit ou à faible charge le courant est pratiquement constant (source de courant). Le générateur n'est alors ni vraiment une source de tension ni vraiment une source de courant non plus.

La tension de circuit ouvert est sensible à la température et diminue quand la température augmente. Le courant de court-circuit est quant à lui proportionnel à l'éclairement : augmente si l'éclairement augmente.

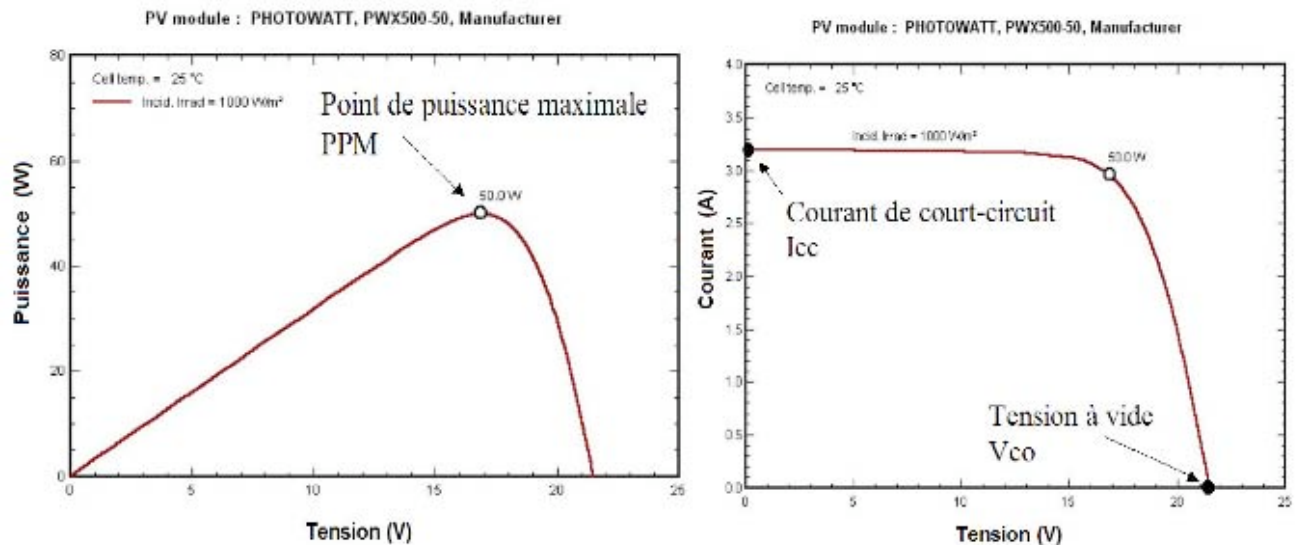


Figure 1 : Courbes caractéristiques d'un module photovoltaïque

Le meilleur point de fonctionnement du système correspond au point de cette courbe où la puissance, produit de la tension et du courant, est maximisée. Il se situe au milieu de la caractéristique. (figure 1)

En régime permanent établi, la tension et le courant du capteur sont considérés comme constants. L'utilisation d'un onduleur de tension plutôt qu'un onduleur de courant est alors essentiellement motivée par des raisons technologiques.

L'onduleur de tension impose à sa sortie un système de tensions sous forme de créneaux modulés en largeur d'impulsions (MLI* ou PWM* en anglais). Ces créneaux ne posent aucun problème pour l'alimentation d'un moteur, mais sont incompatibles avec les tensions sinusoïdales du réseau.

On place alors entre chaque sortie de l'onduleur et chaque phase du réseau (onduleur monophasé ou triphasé) une inductance qui joue le rôle de filtre et permet à l'onduleur de fournir au réseau des courants quasi sinusoïdaux : d'un point de vue formel elle transforme l'onduleur de tension en onduleur de courant ! (figure 2)

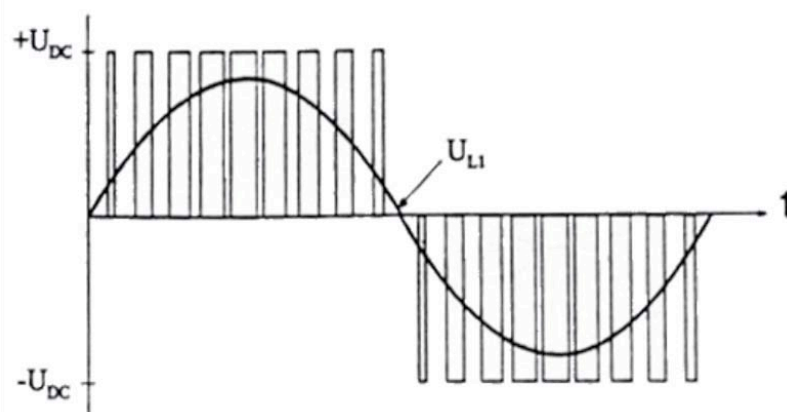


Figure 2 : Filtrage de la tension par l'inductance de sortie (Source [1])

UDC correspond à la tension aux bornes du condensateur d'entrée d'un montage simple (figure 4) et UL1 à la tension injectée au réseau donc de fréquence 50 Hz.

A.3. Détails technologiques

A.3.a Principaux types d'onduleurs rencontrés

Les onduleurs sont des structures en pont constituées le plus souvent d'interrupteurs électroniques comme des IGBT (transistors de puissance).

Dans le cas standard, par un jeu de commutation commandée de manière appropriée, le plus souvent par MLI*, l'énergie électrique continue fournie est modulée afin d'obtenir un signal alternatif à la fréquence du réseau.

Il existe de nombreux circuits électroniques qui permettent de réaliser conversion d'énergie électrique :

- Le montage le plus simple est composé de thyristors. Cette technologie était utilisée dans les premiers onduleurs PV (et est encore disponible en monophasé et triphasé)

Peu cher, il présente cependant un courant de sortie plus ou moins rectangulaire induisant de la puissance réactive et des harmoniques* qui affectent le rendement de l'onduleur et peuvent perturber le réseau.

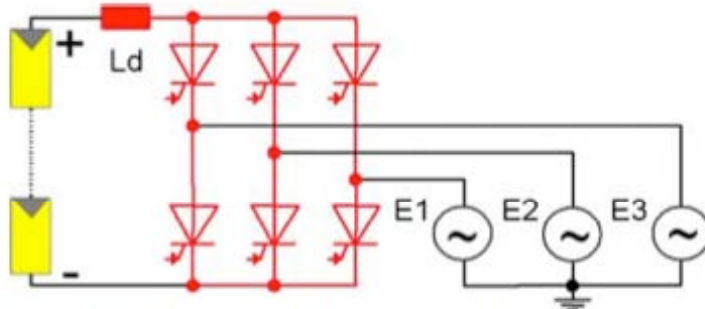


Figure 3 : Circuit utilisant des thyristors (source : ISET [2])

- La figure 4 présente un exemple de circuit simple composé d'un pont de transistors commandé par PWM*. Le signal alternatif obtenu est ensuite filtré par l'inductance Ld située avant le transformateur* (ou Lac sur les autres schémas) afin d'obtenir un signal alternatif **sinusoïdal** à la fréquence du réseau.

Ce dernier signal est ensuite ajusté à la tension du réseau par un transformateur* 50Hz qui apporte en même temps une isolation galvanique* au montage.

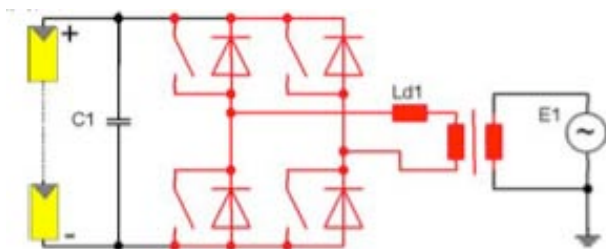


Figure 4 :Circuit simple utilisant un pont de transistors (source : ISET [2])

- Pour travailler sur une gamme de tensions d'entrée plus large, un convertisseur élévateur (« boost ») peut être rajouté (en vert) en entrée du pont (figure 5).

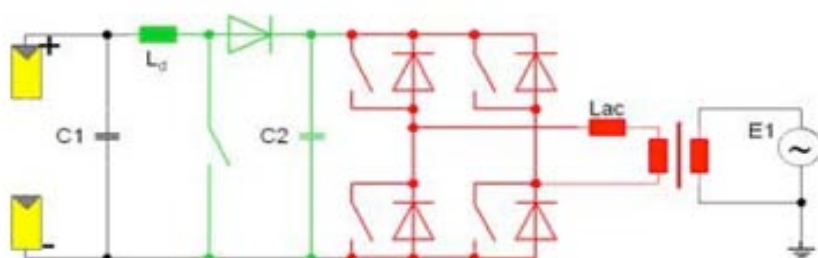


Figure 5 : Circuit à pont de transistors avec convertisseur élévateur (Source : ISET [1])

- Le montage de la figure 6 comprend 3 étages différents. Il est composé d'un transformateur* haute fréquence (en bleu) qui adapte la tension d'entrée tout en réduisant le poids de l'onduleur. À sa sortie, le signal est alternatif. Un redresseur (en vert) permet alors de le convertir en continu. Le pont de sortie (rouge) permet par modulation d'amplitude de transformer ce signal continu en un signal alternatif sinusoïdal adapté à la fréquence du réseau.

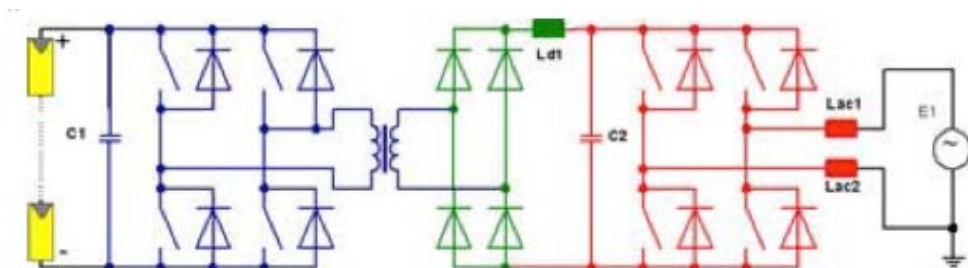


Figure 6 : Circuit à 3 étages avec transformateur* haute fréquence (Source ISET [2])

- Le montage de la figure 7 est constitué de 4 étages. Ce circuit nécessite le contrôle de 7 interrupteurs contre 8 pour celui de la figure 6.

Il est composé d'un convertisseur abaisseur de tension, d'un montage dit « push-pull* » suivi d'un redresseur, et d'un pont de sortie.

La partie « convertisseur abaisseur + transformateur* push pull* » permet d'adapter la tension d'entrée. Elle permet à l'onduleur d'avoir une plus large gamme de tensions d'entrée possible donc une plus grande flexibilité d'association avec les modules PV. Le redresseur « redresse » la tension en sortie du push pull*, et le pont de sortie (rouge) permet par modulation d'amplitude de transformer ce signal continu en un signal alternatif sinusoïdal adapté à la fréquence du réseau.

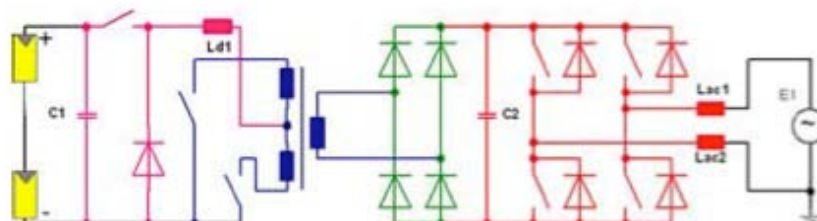


Figure 7 : Circuit à 4 étages avec montage push pull* (Source : ISET [2])

- Enfin, le montage de la figure 8 représente un exemple simple de la technologie des onduleurs sans transformateur*. En éliminant le transformateur*, générateur de pertes importantes dans le circuit lors de la conversion de puissance, on peut augmenter le rendement.

Il faut cependant prendre en compte les problèmes de compatibilité électromagnétique* que le transformateur* permettait d'éliminer par isolation galvanique*.

Dans ce circuit, S1 (pour les courants positifs et négatifs) et S2 (pour les courants positifs) sont commandés en haute fréquence et les autres interrupteurs en 50Hz (fréquence du réseau). Pour des tensions d'entrée plus grandes, S1 peut être contrôlé seul en haute fréquence et les 4 autres en 50Hz pour former un convertisseur abaisseur et un convertisseur push pull*.

Dans les 2 cas, le désavantage de ce montage est la très forte tension appliquée aux bornes des interrupteurs.

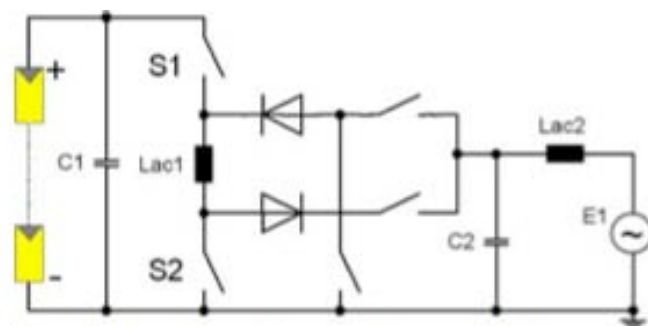


Figure 8 : Onduleur sans transformateur* dit « à Topologie de Karschny » (Source : ISET [2])

A.3.b Rôle du condensateur d'entrée

- Tous les circuits présentés disposent en entrée d'un condensateur référencé C1 de forte capacité, qui a un rôle très important pour les onduleurs photovoltaïques dans le maintien d'un point de fonctionnement stable.

Il a une fonction d'accumulateur d'énergie et une fonction de filtrage des fluctuations de tension dues aux commutations. Il assure ainsi un écoulement homogène du courant du générateur PV vers le réseau en maintenant la tension constante.

- Les condensateurs électrolytiques (électrochimiques) aluminium (figure 9) sont utilisés dans des applications en courant continu ou à très basses fréquences et sont ceux généralement rencontrés dans les systèmes PV. Ils présentent des valeurs de capacités importantes et une faible résistance série.



Figure 9 : Exemples de condensateurs électrolytiques

Principe d'un condensateur électrolytique aluminium :

Si l'on fait circuler un courant entre les 2 électrodes (anode et cathode) en aluminium plongeant dans l'électrolyte, l'électrolyse provoque la formation d'une couche d'alumine (Al_2O_3) à l'anode. L'alumine étant un isolant, on obtient un condensateur dont le diélectrique est la couche d'alumine. Une des armatures du condensateur est ainsi constituée par l'anode et l'autre par l'électrolyte, la cathode servant de connexion avec l'électrolyte.

- Les modèles existants de condensateurs électrolytiques aluminium supportent une gamme de températures allant jusqu'à 85 degrés Celsius, ou 105 degrés Celsius pour les modèles « haute température » (cette température fait référence à la température au cœur du condensateur).

Dans le cas d'une utilisation constante à de telles températures, la durée de vie des condensateurs est limitée de quelques milliers seulement à 15 000h environ.

En effet, les condensateurs électrolytiques sont très sensibles à la chaleur car plusieurs réactions chimiques ou électrochimiques réalisées à l'intérieur du condensateur sont accélérées avec la température : la pression de vapeur d'électrolyte fait s'échapper l'électrolyte à travers les joints du polymère, les composants de l'électrolyte se

décomposent, l'eau de l'électrolyte s'évapore, le diélectrique (isolant constitué ici par l'alumine) devient de plus en plus conducteur. Il se trouve que ces différents effets ont la même énergie d'activation, ce qui à pour conséquence de doubler leur effet tous les 10 degrés Celsius environ (Source [3]).

En réalité, dans un système PV, le condensateur n'est pas constamment sollicité à de telles températures. Cela dépend de la charge reçue et celle-ci est nulle pendant au moins la moitié de la journée (nuit).

On estime que la durée moyenne entre 2 pannes d'onduleurs des systèmes photovoltaïques est de 80 000 à 100 000h environ et celle-ci est généralement due au condensateur d'entrée.

A.3.c Méthodes de recherche du point de puissance maximale

L'unité de régulation de l'onduleur assure un fonctionnement du générateur PV au point de fonctionnement optimal (point de puissance maximale ou MPP*) pour garantir une production de puissance électrique maximale.

Il existe environ une vingtaine de méthodes de recherche du point de puissance maximale d'un champ de modules (Maximum Power Point Tracking), dont l'efficacité et la rapidité varient.

Les deux méthodes les plus couramment rencontrées sont celles dites du Hill-Climbing et du P&O (Perturb and Observe). Ces deux méthodes fonctionnent sur le même principe qui consiste à perturber le fonctionnement du système et à analyser ensuite comment le système réagit à cette perturbation : modification du rapport cyclique de hachage pour la méthode de Hill-Climbing, modification de la tension aux bornes du champ de modules photovoltaïques pour la méthode P&O. Le fait de modifier le rendement de conversion de l'onduleur perturbe le courant continu issu des modules et par conséquent la tension à leurs bornes et la puissance instantanée délivrée.

Ces deux méthodes sont donc basées sur le contrôle de la puissance instantanée délivrée par le champ de modules PV en fonction de variations de la tension continue aux bornes du champ PV (figures 9 et 10).

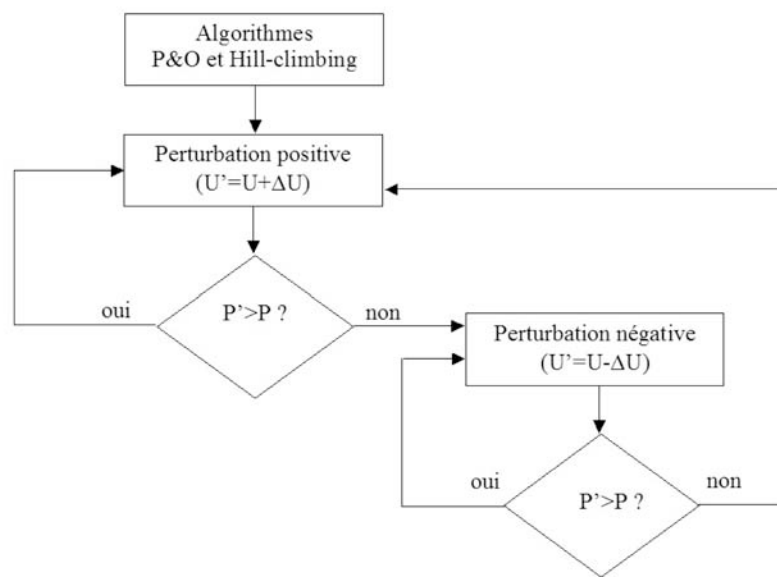


Figure 10 : Principe de l'algorithme des méthodes de Hill-Climbing et P&O

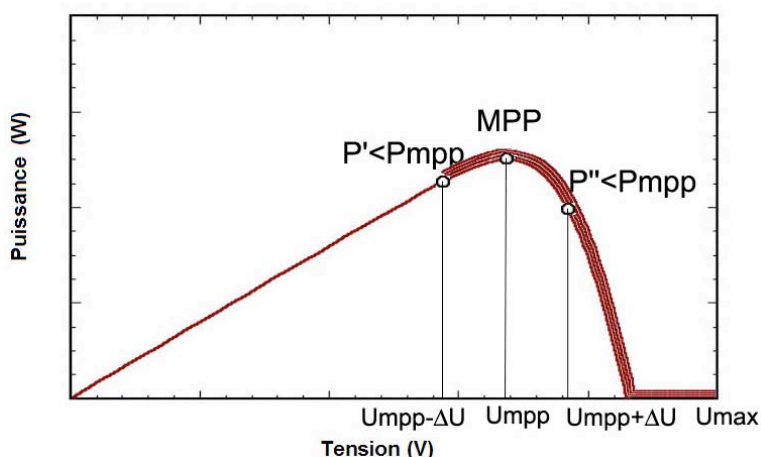


Figure 11 : Illustration de l'algorithme des méthodes de Hill-Climbing et P&O

Parmi les autres méthodes de recherche du point de puissance maximale, on retiendra (Source [4]) :

- La méthode IncCond (Incremental Conductance) qui consiste à comparer la conductance incrémentale $\Delta I/\Delta U$ et de la comparer au rapport $-I/U$: $\Delta I/\Delta U = -I/U$ au MPP*, $> -I/U$ à gauche du MPP* et $< -I/U$ à droite du MPP*.
- La méthode dite de la tension de circuit ouvert fractionnaire (Fractional Open-Circuit Voltage), basée sur la proportionnalité entre la tension de circuit ouvert (V_{co}) et la tension au point de puissance maximale (V_{mpp})
- La méthode dite du courant de court-circuit fractionnaire (Fractional Short-Circuit Current) basée sur la proportionnalité entre le courant de court-circuit (I_{cc}) et le courant au point de puissance maximale (I_{mpp})

- Le contrôle du MPP* à base de logique floue (Fuzzy Logic Control)
- Le contrôle du MPP* à base de réseaux neuronaux (Neural Network)
- La méthode RCC (Ripple Correlation Control) qui consiste en l'analyse des interférences causées par l'onduleur sur la tension et le courant du champ de modules PV
- La méthode de balayage du courant (Current Sweep) qui permet de calculer périodiquement la caractéristique tension-courant du champ de modules PV et d'en déterminer le MPP*
- La méthode de contrôle de la tension aux bornes du condensateur d'entrée de l'onduleur (DC Link Capacitor Droop Control)
- La méthode d'optimisation de la puissance de sortie de l'onduleur (Load Current or Load Voltage Maximization) basée sur le fait que si la puissance de sortie de l'onduleur est maximale, alors le champ de modules PV fonctionne à son MPP*
- La méthode du contrôle dP/dV ou dP/dI (dP/dV or dP/dI Feedback Control) qui consiste à analyser la pente de la courbe Puissance-Tension du champ de modules PV (nulle au point de puissance maximale, positive avant le MPP* et négative après)

B. ÉTAT DE L'ART DES ONDULEURS MODULAIRES POUR INSTALLATIONS PHOTOVOLTAÏQUES

B.1. Rendement maximal :

L'efficacité des onduleurs ne cesse d'augmenter depuis ces dernières années. Cette amélioration participe, bien entendu, à la constante diminution des coûts de l'électricité générée par le PV.

Il y a 15 ans, 90% était considéré comme un très bon rendement des systèmes PV. Aujourd'hui, les meilleurs onduleurs atteignent des pics de rendement de 98% et la moyenne est à 95,2% (Source [5]).

L'autre amélioration frappante est celle du « rendement européen* », qui prend en compte l'efficacité à charge partielle de l'onduleur. À cause d'un mauvais rendement à charge partielle, la valeur du Rendement européen* est plus faible que celle du rendement maximal. Il y a 15 ans, elle pouvait atteindre jusqu'à 5% de moins que le rendement maximal alors qu'aujourd'hui la différence est comprise entre 1 et 2%, pour les meilleurs modèles.

Le Rendement européen* moyen des onduleurs présents sur le marché en 2007 est de 94,4 % (Source [5]).

D'un point de vue technique, il devrait être possible de réduire à 0,5% cet écart en optimisant l'efficacité à charge partielle.

Le rendement maximal est aussi amené à augmenter jusqu'à 99% dans les prochaines années. Une augmentation de 1% (de 98% à 99%) de l'efficacité signifie des pertes thermiques divisées par 2, ce qui est extrêmement important pour l'amélioration de la durée de vie des composants et donc des onduleurs.

Moins de pertes thermiques signifie également que les systèmes de refroidissements ne sont plus nécessaires et que les dimensions des boîtiers des onduleurs peuvent être réduites.

Cette amélioration du rendement peut être obtenue en optimisant les composants utilisés afin d'avoir le moins de pertes de chaleur possible.

Les recherches sur les premiers transistors de puissance en nanotubes continuent. Ils pourraient remplacer les transistors IGBT et diminuer considérablement les pertes, déjà faibles avec les IGBT.

Un moyen de réduire les pertes dans les transistors est d'en monter plusieurs en parallèle plutôt qu'un seul, afin de diminuer les pertes lors du fonctionnement à charge partielle.

B.2. Gamme de tensions d'entrée

Certains constructeurs ont choisi l'élargissement de la gamme de tensions d'entrée de l'onduleur comme axe d'amélioration de leurs nouveaux produits.

Une large gamme d'entrée facilite le choix de l'onduleur lors du dimensionnement du système et facilite la gestion des stocks pour le constructeur.

Un module PV de plus ou de moins dans le système ne remet plus forcément en cause le choix de l'onduleur.

En revanche, il n'est pas suffisant d'avoir une tension de sortie du générateur comprise dans la gamme de tensions d'entrée de l'onduleur pour avoir un rendement maximal. Il y a la possibilité d'optimiser la relation, comme en démontre les graphiques de la figure 12.

Cependant il n'est pas possible d'affirmer qu'une grande tension est plus adaptée qu'une tension plus faible, car la réponse ne dépend que trop de la topologie du circuit de l'onduleur comme on peut le voir sur la figure 12.

Par exemple, pour le modèle Sunny Boy 5000TL de SMA, le rendement maximal est obtenu pour une tension élevée de la gamme. Pour le modèle 2100TL, il est obtenu pour une tension située en milieu de gamme, tandis que pour les modèles 3000 et 850 il est préférable d'avoir une tension de sortie du générateur en bas de la gamme de tensions d'entrée de l'onduleur.

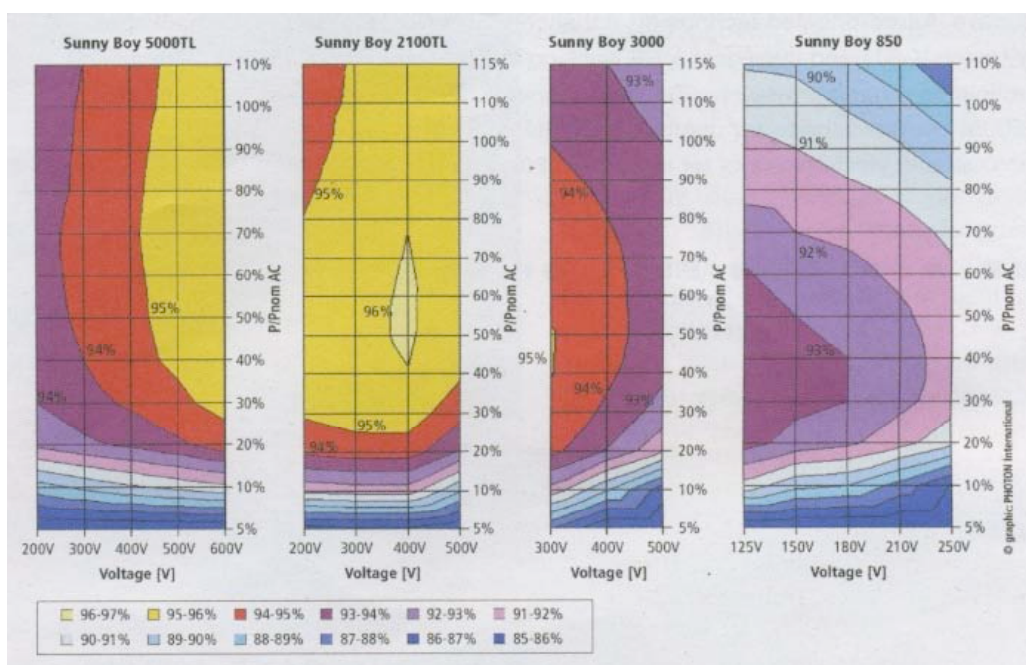


Figure 12 : Influence de la tension du générateur PV sur la gamme de tensions d'entrée de l'onduleur (Source [6])

Certains constructeurs ont choisi d'utiliser des convertisseurs élévateurs (« boost ») pour élargir cette gamme d'entrée. Ils permettent de convertir de petites tensions d'entrée avec des courants importants en grandes tensions et faibles courants. L'onduleur ne nécessite alors pas de puissant transformateur*. Il est plus aisé d'améliorer l'efficacité en travaillant avec des courants faibles car les pertes sont moins importantes, même si le convertisseur lui-même provoque quelques pertes.

L'engouement des constructeurs est cependant freiné par le rendement. En effet, il apparaît que les onduleurs PV ont tendance à fonctionner avec de forts rendements dans une gamme de tensions d'entrée plutôt étroite (cf figure 12) .

Ainsi le développement d'une tendance contraire serait donc probable : le développement d'onduleurs optimisés pour travailler dans une gamme de tensions d'entrée réduite mais parfaitement adaptée au système.

Large gamme de tensions d'entrée ou gamme réduite et onduleurs adaptés ? Le débat continue....

B.3. La durée de vie

Une garantie de 5 ans sur les produits est devenue la norme chez les constructeurs, alors qu'elle n'était que de 2 ans, il y a quelques années.

Il est possible d'étendre la garantie à 10 ans, voir à 20 ans suivant les constructeurs.

Cette étendue de la durée de vie est le résultat de l'utilisation de composants de meilleure qualité, surdimensionnés ou plus résistants aux hausses de températures.

B.4. Les problèmes de ventilation

Avec l'apparition sur le marché en 2005 du système de refroidissement SMA's Opticool sur l'onduleur Sunny Boy 3500 [7], le problème de la ventilation des circuits des onduleurs a été relancé. En effet, une température élevée à l'intérieur du boîtier de l'onduleur peut conduire à un vieillissement prématuré des composants électroniques.

Dans le cas d'un système de refroidissement dit « passif », les composants électroniques sont scellés hermétiquement au boîtier de l'onduleur. En montant les transistors sur un élément refroidissant qui évacue la chaleur à l'extérieur, on est capable de diminuer la chaleur dégagée par cet élément à l'intérieur de l'onduleur. Le cas est différent pour les éléments inductifs comme les transformateurs* ou les inductances de puissance qui ont des surfaces chaudes plus grandes et sont plus difficiles à connecter au boîtier.

Ce type de refroidissement est limité par la surface du boîtier, spécialement dans les boîtiers particulièrement compacts.

Le refroidissement « actif » comme celui qui est proposé par SMA ne met pas tous les constructeurs d'accord : certains y sont opposés et préfèrent construire des onduleurs moins compacts mais sans ventilateur, qu'il considère comme un point de faiblesse mécanique possible du produit.

Le refroidissement par convection, souvent avec un ventilateur, est un autre moyen utilisé par les fabricants d'onduleurs. Cependant, ce système nécessite des ouvertures dans le boîtier qui empêche ou réduit l'utilisation du produits à l'extérieur ou dans un environnement poussiéreux. De plus, le ventilateur est un élément mécanique en mouvement et donc sujet à l'usure et à la casse.

La solution finale au problème de surchauffe serait l'augmentation de l'efficacité de l'onduleur car ce sont les pertes qui sont génératrices de chaleur.

B.5. Gestion du réseau

À l'heure actuelle, le contrôle et la gestion de l'électricité photovoltaïque dans le réseau est relativement simple. Par exemple, en Allemagne, si un incident survient sur le réseau tous les systèmes PV sont déconnectés du réseau. Le réseau est ensuite stabilisé avec les centrales de production traditionnelles puis les systèmes PV sont reconnectés.

Ces déconnexions automatiques posent 2 types de problèmes :

- Un problème de gestion du réseau dans le futur si le PV prend une place conséquente dans le mix électrique.
- Un problème d'efficacité d'utilisation de l'onduleur.

Si la proportion de PV dans le mix électrique continue à augmenter, cette méthode ne sera plus valable, notamment en milieu de journée au moment du pic de production des systèmes PV. En effet, une partie conséquente de la production électrique ne peut pas être séparée du réseau, au risque de voir le réseau s'écrouler.

Dans les prochaines années, les gestionnaires de réseau vont donc devoir apprendre à considérer le photovoltaïque comme un moyen de production à part entière et à l'intégrer dans leur protocole de gestion du réseau.

Les systèmes PV ne devraient plus être déconnectés automatiquement, mais différents cas de défaillance devront être distingués : les cas où des travaux de maintenance sont effectués au niveau local et où l'onduleur doit être éteint, et les cas où le réseau entier connaît un déficit. Dans ce dernier cas, le système PV doit rester connecté le plus longtemps possible au réseau afin de participer à la tension du réseau.

Depuis longtemps en Allemagne, la mesure d'impédance est la méthode la plus utilisée pour vérifier l'état du réseau et éviter l'« islanding » (îlotage*) qui peut provoquer des surtensions et des problèmes de sécurité.

L'inconvénient de cette méthode (et la raison pour laquelle certains pays ne l'utilisent pas) est que les onduleurs ont tendance à se déconnecter du réseau plus vite que nécessaire ce qui influe sur la production d'énergie et pourra à terme poser des problèmes de gestion du réseau.

La compagnie danoise PowerLynx A/S [8] essaye de garantir un temps de déconnexion minimal grâce à un algorithme de contrôle (Ride Through) programmé dans leurs onduleurs, qui analyse les défaillances du réseau avec précision pour empêcher l'onduleur de se déconnecter trop tôt et lui permettre de rester connecté si la faille du réseau est bénigne, comme, par exemple un creux de tension.

D'après le constructeur, cet algorithme utilise le temps d'attente maximal de 110ms qui s'applique pour les creux de tension du réseau avant de se déconnecter.

Que le système PV reste connecté le plus longtemps au réseau est aussi dans l'intérêt du propriétaire du système PV qui continue à produire avec le meilleur rendement possible et à vendre son électricité sans voir sa production interrompue sans raison.

B.6. Interrupteur DC*

Les exigences en matière de sécurité incendie imposent un système capable d'éteindre le générateur PV en cas d'incendie. La nouvelle norme internationale IEC 60364-7-712 exige qu'il soit possible de séparer le générateur de l'onduleur. La version allemande de cette norme, appelée DIN VDE 01000-712, est appliquée en Allemagne depuis juin 2006.

Les interrupteurs DC* qui sont obligatoires depuis quelque temps risquent de bientôt disparaître. En effet, ces interrupteurs, bien que s'assurant de la déconnexion du générateur PV en cas d'incendie, ne sont pas en mesure de contrôler la tension de circuit ouvert du générateur en cas d'ensoleillement. Il peut donc être encore dangereux d'intervenir sur ces systèmes même lorsque l'interrupteur DC* est ouvert (figure 13)

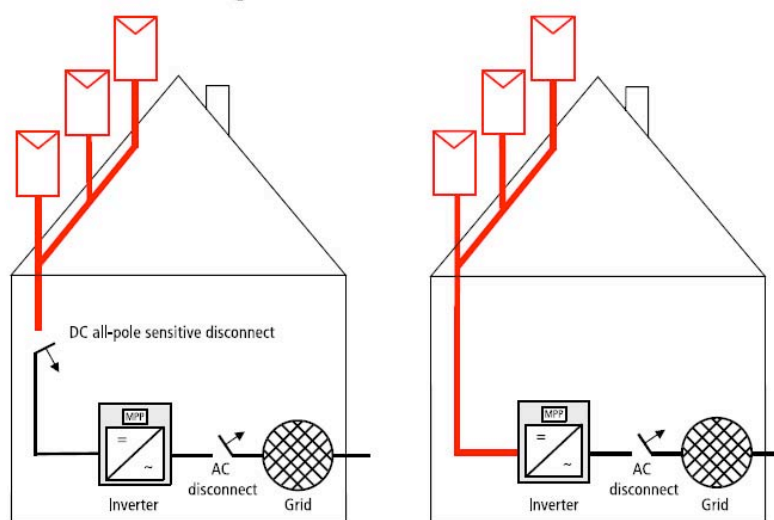


Figure 13 : Schéma de systèmes PV avec (à gauche) et sans (à droite) interrupteur DC* (Source [9])

Ce problème pourrait être résolu en utilisant un petit mécanisme d'interruption muni d'un transistor de puissance qui court-circuite un instant le module solaire, et ne repasse en mode puissance seulement quand il reçoit le signal de l'onduleur.

B.7. Mesures des courbes caractéristiques IV

Certains constructeurs développent des onduleurs avec un appareil d'enregistrement de la courbe IV intégré. Jusqu'à présent, l'achat d'un module indépendant était nécessaire.

Ces mesures, après analyse via un PC, permettent d'identifier les erreurs potentielles de fonctionnement : ombrage, cellules endommagées, diodes bypass défectueuses, ...

B.8. Mémoire de stockage

Une grande capacité de mémoire permet de stocker des informations sur le fonctionnement de l'onduleur au fil des années: données de rendement, rapports d'erreurs, ...

Les données collectées peuvent se révéler utiles pour trouver plus facilement la cause d'une défaillance si l'onduleur connaît des problèmes de fonctionnement.

On s'attend à une augmentation de la mémoire interne des onduleurs par les constructeurs dans les prochaines années, suivant l'augmentation de leur durée de vie.

B.9. Ethernet

Les données sauvegardées peuvent être transférées à différents dispositifs (PC, Data logger (enregistreur), systèmes de surveillance et écrans d'affichage) au moyen d'interfaces.

Les interfaces Ethernet devraient se généraliser d'ici 10 ans car elles offrent des avantages conséquents.

En effet, les infrastructures nécessaires à l'installation d'Ethernet sont déjà présentes dans de nombreuses maisons : connexion DSL avec un routeur et un switch, des câbles Cat5, ou encore des ordinateurs avec une connexion réseau.

Un onduleur avec une connexion Ethernet peut simplement être rattaché au réseau interne de la maison avec un simple câble et ensuite connecté à Internet, pouvant ainsi recevoir les nouveaux logiciels du constructeur.

B.10. Orientation des panneaux est-ouest

L'orientation plein Sud des modules permet de capter un maximum de lumière au cours de la journée et résulte en un pic de production autour de midi, qui, en envisageant un développement important du PV pourrait dépasser la demande.

La pose de panneaux sur des façades orientée est-ouest permet d'avoir 2 pics de production (1 en tout début de journée, l'autre tard dans l'après-midi) et de répartir la production PV sur toute la journée.

Ce type de système peut fonctionner avec 2 onduleurs, mais il serait logique de n'en utiliser qu'un seul. En effet, les pics de production survenant à différents moments de la journée, un seul onduleur de puissance inférieure à la puissance totale du générateur PV serait suffisant.

Selon l'orientation des panneaux, un onduleur sous-dimensionné pourrait être utilisé sans que le rendement ne soit affecté.

Seuls les MPP* des générateurs partiels auraient besoin d'une gestion séparée, avec 2 entrées distinctes, chacune avec sa propre recherche de MPP* devant être capable de prendre en compte plus de la moitié de la puissance de l'onduleur.

Cette topologie d'onduleur est communément appelée « Multi-string » (Figure 14).

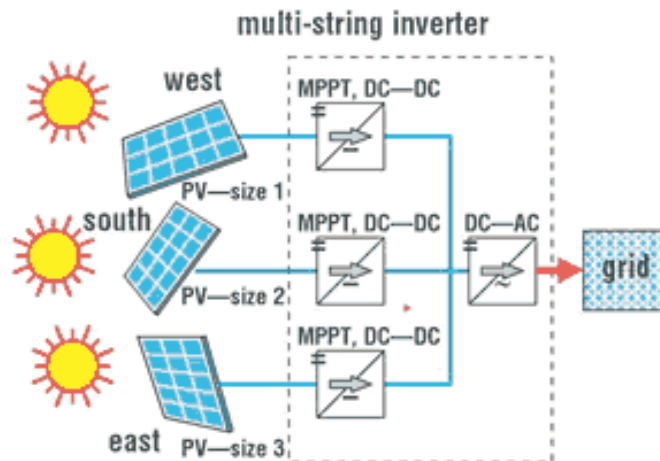


Figure 14 : Schéma de raccordement des modules PV à un onduleur multi-string (source [10])

B.11. Modules à couches minces

Les recherches pour une meilleure adaptation des onduleurs aux modules solaires à couches minces sont toujours en cours.

Les tests en laboratoires et expériences sur des systèmes montrent, chez certains modules à couches minces, une dégradation accrue dépendante de la topologie de l'onduleur (Source [11]).

Le phénomène connu depuis quelque temps, n'avait pu être expliqué jusqu'à présent. Les théories commencent à se développer, mais certaines questions sont toujours sans réponse et le débat qui dure depuis 2 ans maintenant continue.

Cela n'empêche pas les constructeurs d'onduleurs d'introduire sur le marché de nouveaux concepts censés fonctionner de façon plus « harmonieuse » avec les modules à couches minces.

Les onduleurs sans transformateur*, bien que considérés comme la technologie de l'avenir, ne sont pour l'instant pas considérés comme le meilleur choix d'onduleur pour des systèmes à couches minces. En effet, les modules non isolés du réseau seraient soumis, entre autres, à des tensions négatives.

C. ÉTUDE DES PERFORMANCES

C.1. Avant-propos

L'objectif des tests entrepris par le magazine Photon International dans son laboratoire est de vérifier si les performances des produits sont à la hauteur des dires des constructeurs.

L'objectif est de donner une approche compréhensible du fonctionnement d'un onduleur, dans l'ensemble de sa gamme de tensions d'entrée et de sa puissance nominale.

Les fiches techniques donnent des informations spécifiques précises mais sans explication des conditions d'obtentions de ces données et donc du comportement de l'onduleur.

C'est pourquoi des utilisateurs se demandent parfois pourquoi leur onduleur n'atteint pas le rendement maximum indiqué par le constructeur, même si le système est configuré correctement.

Les résultats de ces tests ont pour but d'aider les producteurs à configurer leur système PV et à tirer le meilleur profit de la puissance délivrée par les panneaux solaires.

Chaque mois, les résultats des tests d'un onduleur sont publiés dans le magazine depuis janvier 2007 (Sources [12-17]).

C.2. Méthodologie employée pour les tests

C.2.a Conditions de tests

- Les onduleurs testés sont des appareils pouvant injecter leur puissance sur une seule phase du réseau et convenant à une fréquence du réseau de 50Hz, ou des appareils pouvant injecter sur les 3 phases du réseau avec des puissances inférieures à 25Kw.
- Chaque onduleur est testé pour observer son comportement jusqu'à une surcharge de 120% de la puissance d'entrée nominale et jusqu'à une température ambiante maximale acceptable pour tester les pires conditions de fonctionnement.

Dans toute la gamme de tensions d'entrée définie par le constructeur, la capacité de recherche du point de puissance maximum (MPP*) de l'onduleur est testée et le rendement est mesuré. La consommation propre de l'onduleur n'est pas oubliée pour les calculs de rendement.

La précision de l'affichage est aussi vérifiée car elle peut être source de mécompréhension pour les propriétaires.

Enfin, des aspects non techniques sont examinés, comme la qualité des composants, la simplicité d'utilisation et de compréhension du système ou encore la robustesse du boîtier. Ces détails peuvent peser sur le choix d'un onduleur et sont donc à prendre en compte.

C.2.b Équipement de mesure

L'équipement utilisé pour les tests se compose :

- D'une alimentation continue : Regatron AG, Tocon quadro 20 kW, type 1153-208, avec un amplificateur de puissance pour 32kW.
- D'un analyseur de puissance Yogogawa Electric corporation, WT3000, fréquence d'échantillonnage : 200kHz, précision de mesure : +/- 0,02%.
- Transformateur* variable : Möller- Preussler Transformatoren GmbH, personnalisé selon les spécifications de Photon, basé sur la série 832, taille 2912. La tension peut être ajustée manuellement.
- Oscilloscope : Tektronix Inc. TDS 3014B
- Sonde de température : Dostmann Electronic GmbH, P600, gamme de mesure : - 200...+850°C.
- Appareil photo thermographique : Fluke Deutschland GmbH, Ti20.

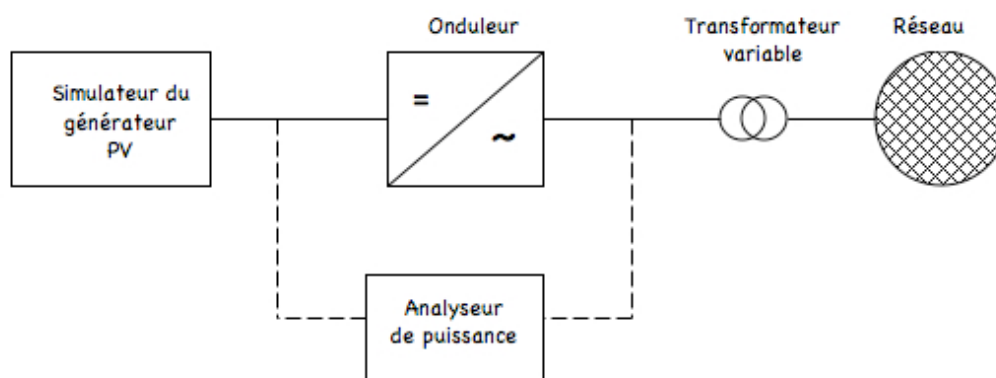


Figure 15 : Schéma du banc de mesure [13]

La source de courant continu simule un générateur solaire avec l'aide d'un microprocesseur. Un analyseur de puissance très précis surveille et mesure l'entrée et la sortie de l'onduleur. Le transformateur* permet d'ajuster (en vue de test) le niveau de tension du réseau au point où l'onduleur injecte sa puissance.

Un oscilloscope effectue des mesures de contrôle en temps réel.

Cet équipement est capable de fournir en entrée une tension de 0 à 1000V (tension maximale autorisée pour les modules solaires) et des courants jusqu'à 25A.

La gamme de tensions d'entrée de chaque onduleur est divisée en 24 pas et la charge par tranches de 5% de la puissance nominale, soit $24 \times 20 = 480$ points de mesures.

246 mesures sont prises à chacun de ces 480 points de mesures, pour moyennner les écarts de précision potentiels.

C.2.c Modèle de fiche méthodologique utilisée pour la synthèse des tests

<h2 style="text-align: center; margin: 0;">Marque + Modèle</h2> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Caractéristiques principales du modèle</i> • ... • ... • ... 	<div style="border: 1px solid black; height: 100px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <p><i>Photo de l'onduleur</i></p> </div>
DESIGN DU CIRCUIT	
<p>Description du circuit électronique, avec explication du principe de conversion DC/AC de l'énergie provenant du système PV en puissance électrique injectable dans le réseau.</p>	<div style="border: 1px solid black; height: 100px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <p><i>Schéma simplifié du circuit électronique</i></p> </div>
MESURES EFFECTUEES ET RESULTATS	
<p>Rendement maximal</p> <p>Cf. graphiques 1 et 2</p>	<p>Le meilleur rendement que l'onduleur puisse atteindre et ses conditions d'obtention.</p>
<div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin: 10px 0;"> <p style="text-align: center;"><i>Graphique n°1</i></p> <p style="text-align: center;"><i>Permet de repérer facilement les plages de tension d'entrée et de charge pour lesquelles l'onduleur fonctionne avec un fort rendement.</i></p> </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin: 10px 0;"> <p style="text-align: center;"><i>Graphique n°2</i></p> <p style="text-align: center;"><i>Permet d'observer le comportement du rendement l'onduleur pour différentes charges à une tension d'entrée fixe.</i></p> </div>
<p><u>Graphique 1 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Au centre : Graphique 3D du rendement en fonction de la tension d'entrée et de la charge.</i> • <i>En haut : Coupe pour une $V_{mpp} = ?V$</i> • <i>À droite : Coupe pour une charge de ?% environ.</i> <p>Remarque : Une charge de 100% représente une puissance nominale en entrée de ?W.</p> <p>La gamme de puissance a été divisée en pas de 5% (de 0 à 120%) soit 24 pas, et les mesures ont été prises pour 20 tensions d'entrée différentes : soit 480 points de</p>	<p><u>Graphique 2 :</u></p> <p><i>Tracé du rendement de l'onduleur à différentes tensions d'entrée (? à ?V) en fonction de la puissance nominale d'entrée. Les courbes passent par les maxima et minima de rendement.</i></p>

mesures.

L'effet 3 dimensions est dû à l'échelle de couleur utilisée.
Les zones de même couleur représentent des zones de même rendement.

Rendement euro Comme l'onduleur ne fonctionne pas à puissance maximale toute l'année, la notion de Rendement européen* permet de prendre en compte la fréquence et les variations d'ensoleillement (qui influe sur la puissance d'entrée)

Il se calcule avec la formule :

$$\eta_{\text{Euro}} = 0,03\eta_{5\%} + 0,06\eta_{10\%} + 0,13\eta_{20\%} + 0,1\eta_{30\%} + 0,48\eta_{50\%} + 0,2\eta_{100}$$

(les $\eta_{x\%}$ correspondent aux rendements de l'onduleur pour $x\%$ de la puissance nominale)

Gamme de MPP La gamme de tensions d'entrée dans laquelle le MPP* peut se situer.

Recherche du MPP Le temps mis par l'onduleur pour retrouver le point de puissance maximale sur la caractéristique IV quand on change la tension d'entrée.

Efficacité de réglage du MPPT Le pourcentage de la puissance fournie acceptée par l'onduleur dans sa gamme de tensions d'entrée. Ce pourcentage est acceptable s'il est supérieur à 96% , mais plus il est proche de 100% mieux c'est.

Cf. graphique 3

Affichage de la tension de sortie Comparaison entre les valeurs de tension affichées par l'onduleur et celles mesurées par l'analyseur pour une tension constante prise au milieu de la gamme et pour une charge variable, afin de vérifier la précision de l'afficheur.

Cf. graphique 2

Graphique n°3

Montre le pourcentage de la puissance fournie par le générateur PV qui est traité par l'onduleur.

Graphique n°4

Illustre l'erreur d'affichage de l'onduleur par rapport à la réalité.

Graphique 3 :

Courbe 3D montrant l'efficacité de réglage du MPP en fonction de la tension d'entrée et de la charge en entrée :

La gamme de puissance a été divisée en pas de 5% (de 0 à 120%) soit 24 pas, et les mesures ont été prises pour 20 tensions d'entrée différentes: soit 480 points de mesures.

L'effet 3 dimensions est dû à l'échelle de couleur utilisée.
Les zones de même couleur représentent des zones de même rendement.

Graphique 4 :

Courbe définissant l'erreur d'affichage de l'onduleur en fonction de la puissance d'entrée pour un V_{mpp} situé dans le milieu de la gamme.

Puissance nominale injectée dans le réseau Tensions d'entrée à partir desquelles l'onduleur est capable d'alimenter le réseau avec sa puissance nominale dans le réseau.

Fonctionnement à températures plus élevées En augmentant la température ambiante (jusqu'à une limite raisonnable) on teste la capacité de l'onduleur à fournir sa puissance nominale par temps chaud.

Fonctionnement en surcharge Observation du comportement et des limites de l'onduleur en surcharge.
Le test est effectué en injectant 1,3 fois la puissance nominale maximale en entrée

	(DC) et en observant la puissance délivrée par l'onduleur.
Consommation propre (jour / nuit)	Comparaison de la consommation mesurée pendant le test à celle qui est donnée par le constructeur. Ces mesures sont importantes pour les calculs de rendement.
Thermographie	La thermographie permet d'identifier les zones de plus fortes températures au sein du circuit électronique, et donc les zones de faiblesse possible.
Commentaires du constructeur	Accord, désaccord, commentaires du constructeur par rapport aux résultats des tests qui leur sont présentés.

CONCLUSION

+ Avantages +

- Informations diverses et détails qui constituent des atouts pour le modèle.
- ...
- ...

- Inconvénients -

- Informations diverses et détails qui s'avèrent être des inconvénients du modèle.
- ...
- ...

Remarques spéciales

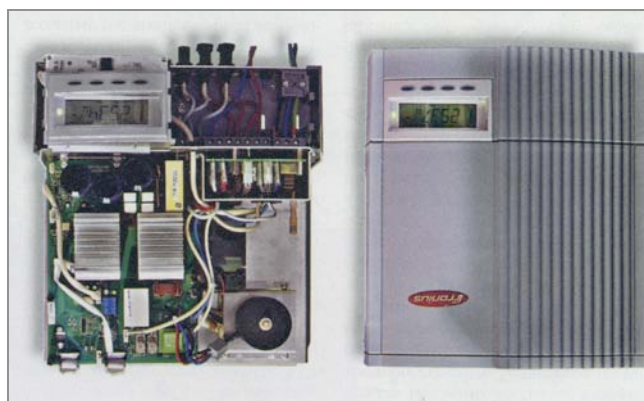
C.3. Fiches récapitulatives des différents onduleurs testés

C.3.a Fiche FRONIUS, onduleur IG 30

Constructeur Autrichien, leader du marché européen des équipements de soudage, qui a créée en 1995 une division pour onduleurs solaires.

FRONIUS IG 30

- Conçu pour des forts courants d'entrée
- 2,5 < Puissance de sortie < 2,65 kW
- Norme IP21 : installation en intérieur (espace propre)
- Temps de connexion au réseau : 50s
- Possède un ENS*
- Rendement maximal=94,5%(données constructeur)
- Rendement européen*=92,7%

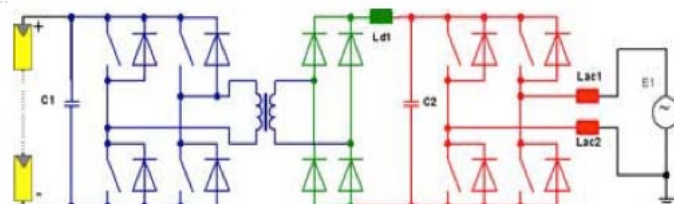


DESIGN DU CIRCUIT

L'énergie produite par le système PV passe dans un **filtre EMI*** puis dans un **montage élévateur (bleu)** dont le transformateur* HF qui le compose permet une isolation galvanique* du montage.

Après quelques filtrages, la tension continue (redressée après le transformateur) atteint le pont de sortie (en rouge) de l'onduleur qui hache la tension et crée une tension de sortie sinusoïdale de fréquence 50Hz avec l'aide d'un **PWM*** et d'un filtre adapté.

Pendant ce temps, l'**ENS*** surveille la tension du réseau, son impédance et sa fréquence éteint l'onduleur en cas de défaillance. Les interférences radio sont filtrées en sortie juste avant la borne du réseau.

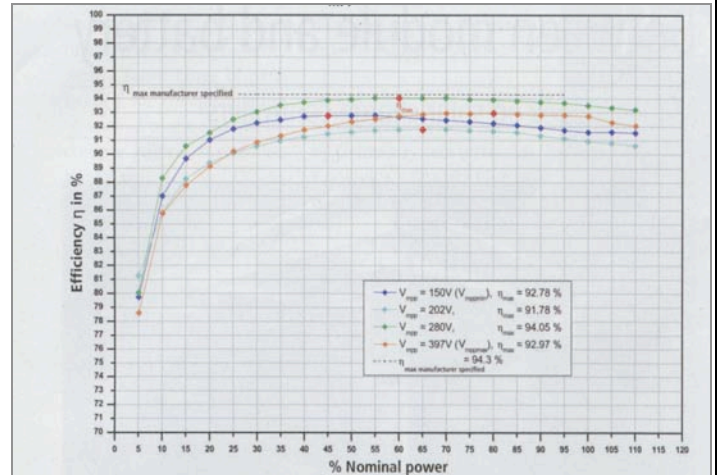
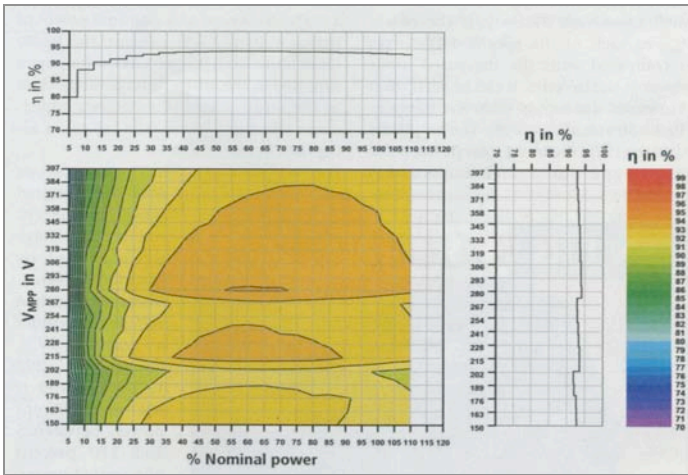


MESURES EFFECTUEES ET RESULTATS

Rendement maximal

Cf. graphiques 1 et 2

- Max : 94,5% ne peut être atteint que pour des valeurs de tension d'entrée autour de 280V ; Min : 91,78%.
- Des rendements de 93% et 94% sont présents dans une plus large gamme.
- 3 pics d'efficacité : 92,7% à 150V, 93,5% à 203V, 94,05% à 280V ; dus à une particularité technique du transformateur* : il s'ajuste en fonction de la tension d'entrée car la bobine du côté primaire est divisée en sections et a 3 connexions.



Graphique 1 :

- Au centre : Graphique 3D de l'efficacité en fonction de la tension d'entrée et de la charge.
- En haut : Coupe pour une $V_{mpp}=208V$
- À droite : Coupe pour une charge de 60% environ.
- Remarque : Une charge de 100% représente une puissance nominale en entrée de 2700W.

Graphique 2 :

Tracé de l'efficacité de l'onduleur à différentes tensions d'entrée (150, 202, 208, 280, et 397V) en fonction de la puissance nominale d'entrée, dont les courbes passant par les maxima et minima d'efficacité.

Rendement euro

Le produit n'atteint le rendement spécifié (92,7%) que pour $V_{mpp}=280V$.

Efficacité de réglage du MPPT
Cf. graphique 3

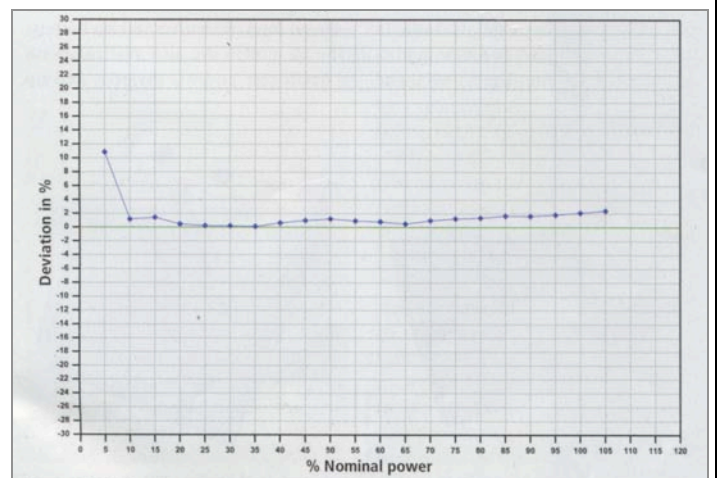
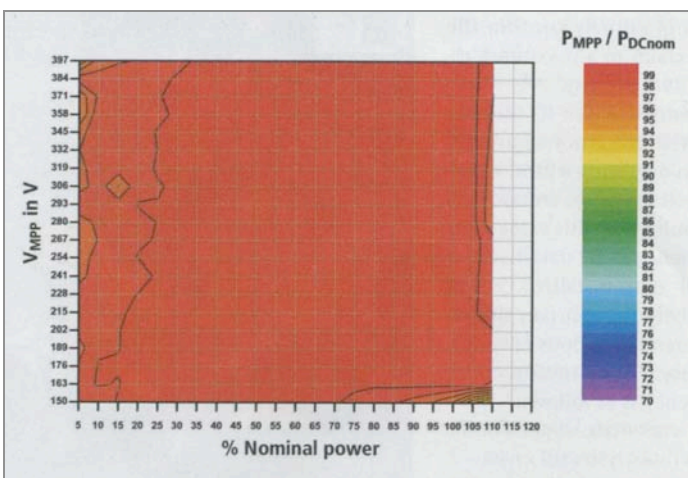
Pour une charge de 30 à 105%, l'onduleur accepte plus de 99% de la puissance fournie pour toute la gamme de tensions. Pour d'autres charges, l'efficacité de réglage garde des valeurs très acceptable (>96%)

Affichage de la tension de sortie
Cf. graphique 4

Pour $V_{mpp}=293V$, charge entre 5 et 110%

Les valeurs affichées sont légèrement supérieures à celles qui sont données par l'analyseur.

L'erreur est la plus faible à 35% de la puissance nominale. La plus grande est de 5%, mais cette erreur a peu de sens car pour des valeurs si faibles du courant les signaux de l'ENS* viennent recouvrir les mesures.



Graphique 3 :

Courbe 3D montrant l'efficacité de réglage du MPP en fonction de la tension d'entrée et de la charge en entrée

Graphique 4 :

Courbe définissant l'erreur d'affichage de l'onduleur en fonction de la puissance d'entrée pour $V_{mpp}=293V$.

Puissance nominale injectée dans le réseau	L'onduleur est capable de fournir au réseau sa puissance nominale quelle que soit la tension comprise dans la gamme d'entrée définie par le constructeur.
Fonctionnement à températures plus élevées	L'onduleur peut fournir sa puissance nominale jusqu'à 50°C. Au-delà, il réajuste son point de travail sur la courbe IV de manière à réduire la puissance d'entrée et donc les pertes thermiques internes.
Fonctionnement en surcharge	Avec une surcharge de 1,3 fois la puissance d'entrée nominale (3500W à 163V à 23°C), l'onduleur limite sa puissance à 2938W soit à une surcharge de 10%.
Consommation propre	Jour : Test PI = 2W Fronius = 7W Nuit : Test PI = 0,25W Fronius = 0,15W (Cette valeur se réfère probablement à un onduleur équipé de performances additionnelles)
Thermographie	Pas de composants visibles dont la température n'excède 73,8°C.
Commentaires du constructeur	En accord avec les résultats des mesures effectuées.

CONCLUSION

+ Avantages +

- Compact
- Léger : 9kg
- Fourni la puissance nominale jusqu'à une température extérieure de 50°C
- Facile à utiliser
- Bonne efficacité
- Fiche technique précise.

- Inconvénients -

- Ventilateur à vitesse réglée : requiert un espace non-poussiéreux pour son installation et n'est remplaçable que par une personne qualifiée.
- Plusieurs câbles simples ou multiples : risques accrus de pannes
- Difficulté d'installation due aux bords coupants et à la compacité
- Pas de possibilité d'affichage de la tension d'entrée.

Les caractéristiques les plus frappantes de cet onduleur sont ses 3 pics d'efficacité, dont le plus haut est à 94,5% mais dans une gamme très réduite.

Comme le générateur solaire peut délivrer des tensions différentes au cours de l'année, un programme de simulation serait nécessaire pour éviter que le système ne fonctionne dans les creux d'efficacité entre 2 pics plutôt qu'à l'efficacité maximale. Aucun programme de ce type n'est intégré, mais le développeur de l'onduleur suppose que l'effet de ces 3 pics sur le rendement sera limité.

C.3.b Fiche SMA, onduleur Sunny Boy 3800

Entreprise allemande créée en 1981 pour développer et produire des systèmes de contrôle intelligents pour la production d'énergie décentralisée.

SMA SUNNY BOY 3800

- Système de refroidissement « Opticool® »
- Norme IP 65 : convient pour un usage en extérieur ou en intérieur
- Temps de connexion au réseau : 75s
- Protection de découplage « Grid guard® »
- 3 LEDs affichent le statut
- Accepte jusqu'à 3 séries panneaux avec une recherche de MPP* centrale.



DESIGN DU CIRCUIT

L'énergie produite par le système PV passe dans un filtre EMI* puis directement dans le pont de sortie. Il hache la tension et crée une tension de sortie sinusoïdale de fréquence 50Hz avec l'aide d'un PWM* et d'un filtre adapté. Un transformateur* 50Hz booste ensuite cette tension pour l'harmoniser à la tension du réseau.

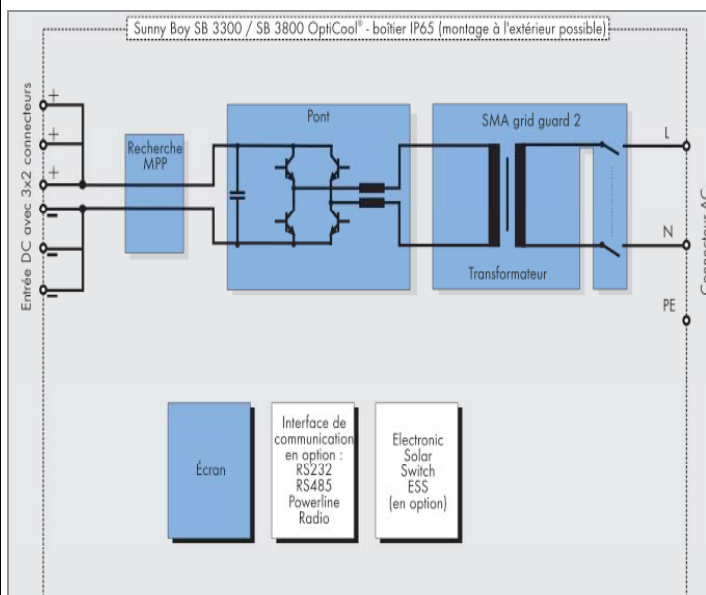
En cas de défauts sur le réseau, le système « Grid Guard » de SMA, intégré dans un ENS*, s'occupe de la déconnexion automatique du système par rapport au réseau selon la norme DIN VDE 0126.

Les interférences radio sont filtrées en sortie juste avant la borne du réseau.

Remarques :

Pour des tensions MPP plus grandes, l'onduleur réduit le degré de modulation de son pont de sortie afin de pouvoir s'harmoniser avec la tension du réseau.*

A cause du rapport de conversion du transformateur de 1,72, un minimum de 200V en entrée est nécessaire pour pouvoir alimenter le réseau en 230V. La valeur minimale de 174V de la tension MPP ne peut donc être utilisée que dans le cas où la tension du réseau chute à 198V (très rare).*

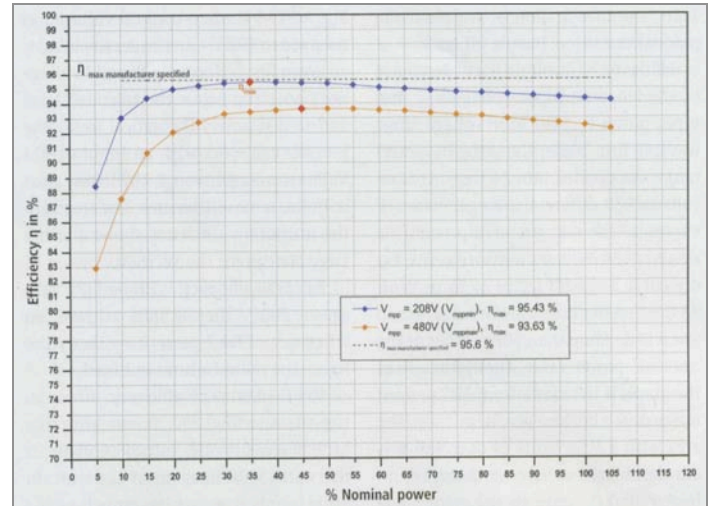
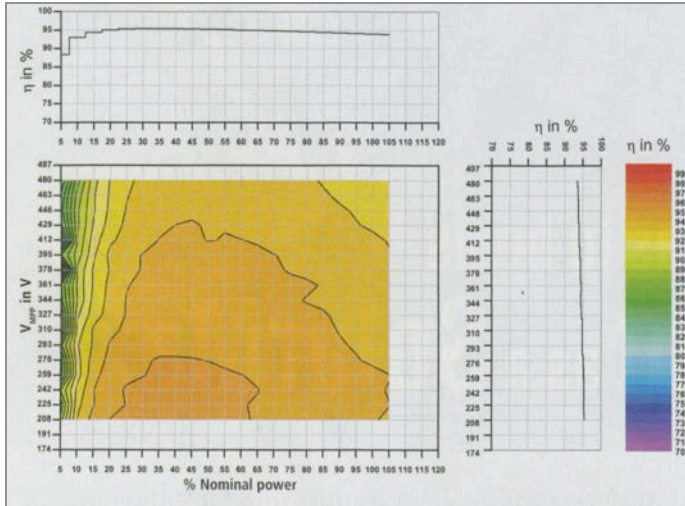


(Équivalent au schéma de la figure 4)

MESURES EFFECTUEES ET RESULTATS

Rendement maximal Cf. graphiques 1 et 2

Max : 95,43%. Le rendement maximal est atteint pour la tension d'entrée la plus basse 208V, et s'étend de 25% à 60% de la puissance nominale.



Graphique 1 :

- Au centre : Graphique 3D de l'efficacité en fonction de la tension d'entrée et de la charge.
- En haut : Coupe pour une $V_{mpp} = 208V$
- À droite : Coupe pour une charge de 42% environ.
- Remarque : Une charge de 100% représente une puissance nominale en entrée de 4000W.

Graphique 2 :

Tracé de l'efficacité de l'onduleur à différentes tensions d'entrée (208 et 480V) en fonction de la puissance nominale d'entrée, dont les courbes passant par les maxima et minima d'efficacité.

Efficacité euro

Le produit atteint l'efficacité spécifiée (94,7%) pour $V_{mpp} = 208V$.

Recherche du MPP

En cas de variation de la tension MPP*, l'onduleur a besoin de quelques minutes pour retrouver le bon point de fonctionnement (ex : 344V->361V à P=1000W constant = 2 mn)

Gamme de MPP

L'onduleur se met en marche pour une tension d'entrée supérieure à 220V.

La Gamme MPP* annoncée par l'onduleur est de 174V à 500V mais en pratique il n'est pas possible d'atteindre cette valeur max car la valeur max de la tension d'entrée est de 500V. De même si le MPP* de la courbe IV est à 174V, l'onduleur emploiera dans tous les cas une tension d'entrée de 200V pour être capable d'alimenter le réseau en 230V.

La gamme « utile » semble être une tension d'entrée comprise entre 200 et 420V.

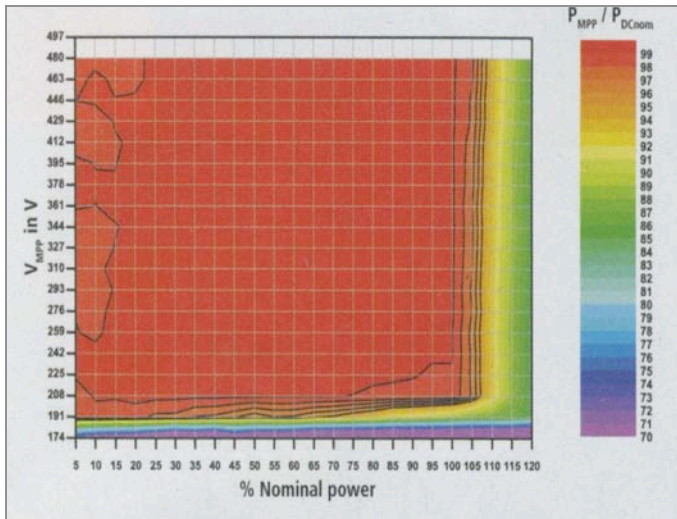
Efficacité de réglage du MPPT Cf. graphique 3

Pour une charge de 20 à 100%, l'onduleur accepte plus de 99% de la puissance fournie pour $V_{mpp} > 208V$.

Affichage de la tension de sortie Cf. graphique 4

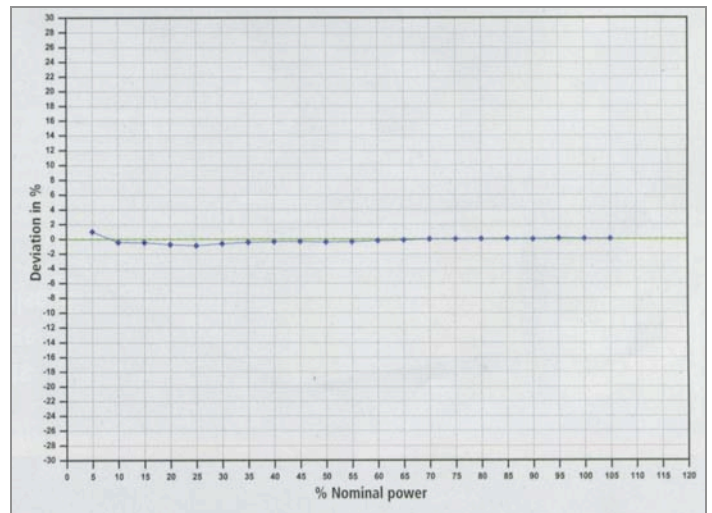
Pour $V_{mpp} = 344V$, charge entre 5 et 105%

Les valeurs affichées par l'onduleur diffèrent de +/- 1% par rapport à celles qui sont affichées par l'analyseur.



Graphique 3 :

Courbe 3D montrant l'efficacité de réglage du MPP en fonction de la tension d'entrée et de la charge en entrée*



Graphique 4 :

Courbe définissant l'erreur d'affichage de l'onduleur en fonction de la puissance d'entrée pour $V_{mpp}=344V$.

Puissance nominale injectée dans le réseau	L'onduleur est capable de fournir au réseau sa puissance nominale pour une tension comprise entre 208V et 480V (test effectué à 25°C).
Fonctionnement à températures plus élevées	L'onduleur peut fournir sa puissance nominale jusqu'à 45°C. Au-delà, il réajuste son point de travail sur la courbe IV de manière à réduire la puissance d'entrée et donc les pertes thermiques internes.
Fonctionnement en surcharge	Avec une surcharge de 1,3 fois la puissance d'entrée nominale (5200W à 344V à 25,2°C), l'onduleur limite sa puissance à 4088W soit une surcharge de 2,2 %.
Consommation propre	Jour : Test PI = 5,5W SMA = 7W Nuit : Test PI = 0,05W SMA = 0,1W
Thermographie	Pas de composants visibles dont la température n'excède 67,2°C.
Commentaires du constructeur	Le constructeur a approuvé les résultats. La tension MPP* minimale a été changée depuis le test dans la data sheet et le catalogue de produits.

CONCLUSION

+ Avantages +

- Onduleur bien pensé qui fait bonne impression
- Simple à utiliser
- Affichage en marche même si le système est déconnecté du réseau.
- Ventilateur à vitesse régulée et contrôle de la température : remplaçable facilement et rapidement

- Inconvénients -

- Lourd (41kg)
- 2 personnes sont nécessaires pour l'installation
- Changement du ventilateur : 2 des 4 clips qui tenaient la grille du ventilateur ont cassé lors du test.
- Faible capacité de surcharge (parfois nécessaire pour endurer les pics de puissance)

C.3.c Fiche SPUTNIK, onduleur Solarmax 2000C

SPUTNIK Engineering AG est un constructeur suisse d'onduleurs créée en 1991. Elle a mis en vente le 1^{er} onduleur sans transformateur* au monde.

SPUTNIK SOLARMAX 2000C

- Puissance Max de 1980W
- Sans transformateur
- Norme IP 54 : protégé contre les poussières grossières et les gouttelettes d'eau : montage possible en intérieur ou en extérieur
- Possède un ENS*
- Temps de connexion au réseau : 30s
- Coupe-circuit de protection contre les courants résiduels



DESIGN DU CIRCUIT

C'est un circuit à 2 étages sans transformateur* d'isolement.

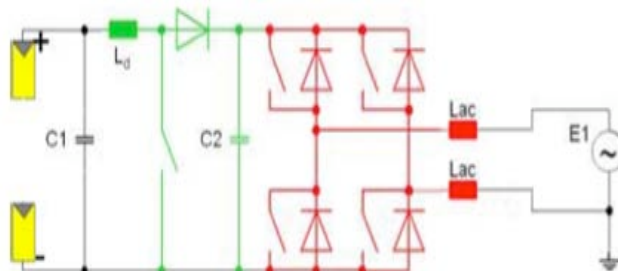
L'énergie produite par le système PV accède au premier étage, constitué du convertisseur élévateur, à travers un filtre EMI*. Il élève la tension d'entrée et alimente un circuit intermédiaire auquel est relié le pont de sortie qui hache la tension et crée une tension de sortie sinusoïdale de fréquence 50Hz avec l'aide d'un PWM* et d'un filtre adapté. Un ENS* sépare l'onduleur du réseau quand l'impédance, la tension ou la fréquence du réseau s'écartent des valeurs limites ou quand des erreurs de courant apparaissent.

Les interférences radio sont filtrées en sortie juste avant la borne du réseau.

L'utilisation d'un convertisseur élévateur élargit la gamme de tensions MPP* entre 90V et 560V.

Dans le circuit intermédiaire, la tension est telle que l'onduleur peut toujours alimenter la tension du réseau.

Si la tension d'entrée est supérieure à 380V le convertisseur élévateur s'éteint.



MESURES EFFECTUEES ET RESULTATS

(Utilisation pour ce test d'un « Simulateur Programmable PVAS2 de cellules photovoltaïques » car la source de tension DC initiale interagissait avec l'onduleur et provoquait des harmoniques HF interférant avec l'analyseur)

Rendement maximal

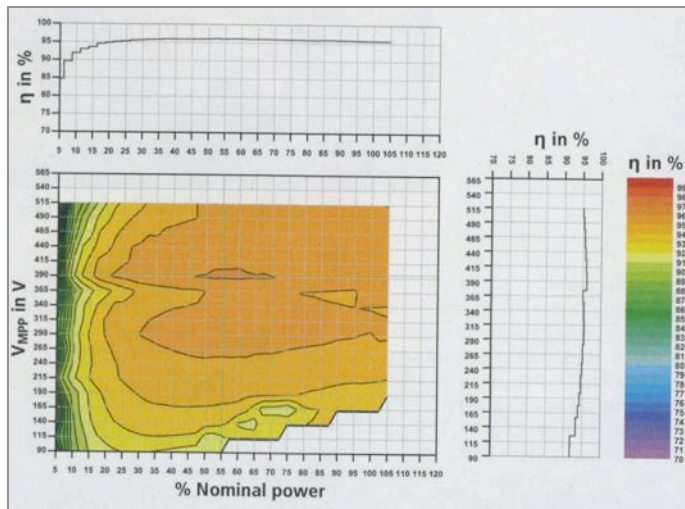
Cf. graphiques 1 et 2

Max : 96,12% < 97% annoncé par le constructeur.

La zone de rendement Max est réduite, cependant celle de 95 à 96% est beaucoup plus large et s'étend de 40 à 105% de la puissance nominale sur 265 à 515V de la tension d'entrée.

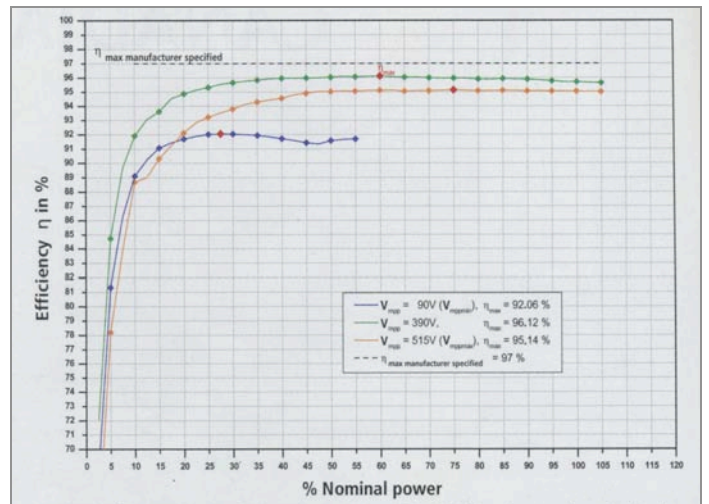
Dans la zone « % Pnom : 55%->105%, Tension entrée : 90V->165V » (on l'appellera « zone A »), la puissance est limitée due à la limitation du courant d'entrée (10,15A).

Au-dessus de 380V, le convertisseur élévateur se relâche et l'efficacité augmente ce qui se traduit par un « saut » de la courbe dans le graphique de droite.



Graphique 1 :

- Au centre : Graphique 3D de l'efficacité en fonction de la tension d'entrée et de la charge.
- En haut : Coupe pour une V_{mpp}= 390V
- À droite : Coupe pour une charge de 55% environ.
- Remarque : Une charge de 100% représente une puissance nominale en entrée de 1980W.



Graphique 2 :

- Tracé de l'efficacité de l'onduleur à différentes tensions d'entrée (90, 390, 515V) en fonction de la puissance nominale d'entrée, dont les courbes passent par les maxima et minima d'efficacité.

Efficacité euro

Le produit atteint l'efficacité spécifiée (95,19%) pour V_{mpp}=390V.

Recherche du MPP

En cas de variation de la tension MPP* de 265V à 290V par exemple, l'onduleur a besoin de 5 minutes pour retrouver le bon point de fonctionnement.

Gamme de MPP

La Gamme MPP* annoncée par l'onduleur est de 90 à 560V mais en pratique il n'est pas possible d'atteindre cette valeur Max car elle est beaucoup trop proche de la valeur Max de la tension d'entrée qui est de 600V. La valeur Max de la tension MPP serait de 515V.

Efficacité de réglage du MPPT

Cf. graphique 3

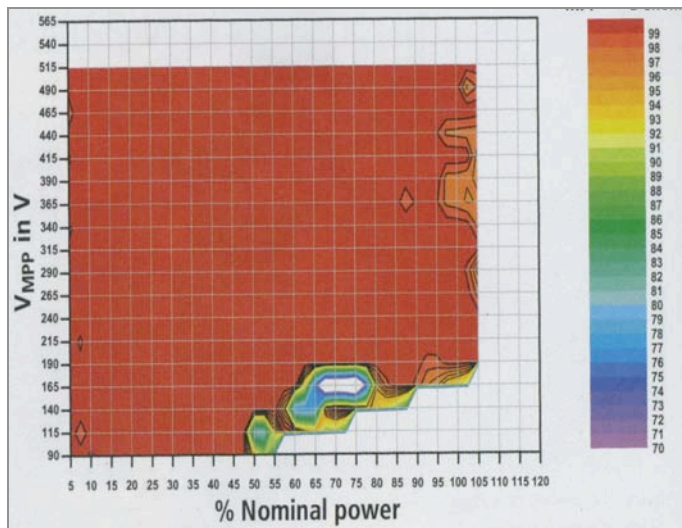
L'onduleur accepte entre 99% et 100% de la puissance fournie excepté dans la zone A.

Affichage de la tension de sortie

Cf. graphique 4

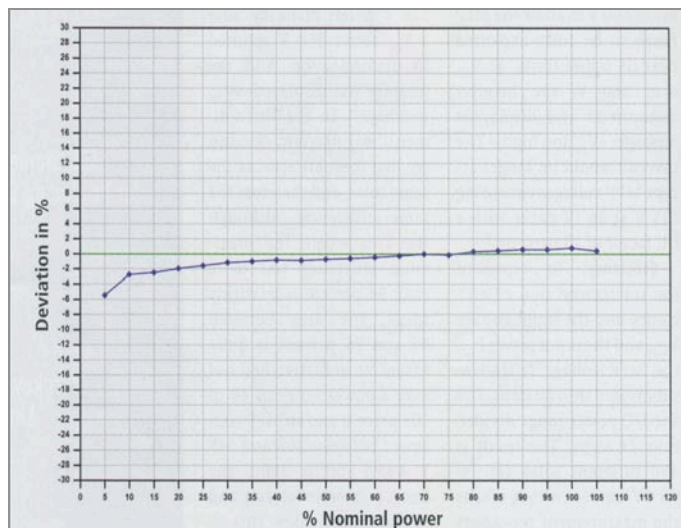
Pour V_{mpp}=290V, charge entre 5 et 120%

Les valeurs affichées par l'onduleur diffèrent de 4 à 5% de celles qui sont obtenues avec l'analyseur pour les petites puissances.



Graphique 3 :

Courbe 3D montrant l'efficacité de réglage du MPP en fonction de la tension d'entrée et de la charge en entrée*



Graphique 4 :

Courbe définissant l'erreur d'affichage de l'onduleur en fonction de la puissance d'entrée pour $V_{mpp}=290V$.

Puissance nominale injectée dans le réseau	L'onduleur est capable de fournir au réseau 105% de sa puissance nominale pour une tension comprise entre 190V et 515V (test effectué à 25°C).
Fonctionnement à températures plus élevées	L'onduleur peut fournir 105% de sa puissance nominale jusqu'à 55°C. Au-delà, il réajuste son point de travail (vers une tension plus élevée) sur la courbe IV de manière à réduire la puissance d'entrée et donc les pertes thermiques internes. À 55°C l'onduleur est plus efficace de 0,2% par rapport à l'efficacité à 25°C.
Fonctionnement en surcharge	Avec une surcharge de 1,3 fois la puissance d'entrée nominale (2600W à 365V à 24,4°C), l'onduleur limite sa puissance à 2120W soit une surcharge de 5 %.
Consommation propre	Jour : Test PI = 9W Sputnik = (donnée non disponible)
	Nuit : Test PI = 0,36W SMA = 0W
Thermographie	Pas de composants visibles dont la température n'excède 82°C.
Commentaires du constructeur	Le constructeur a approuvé les résultats.

CONCLUSION

+ Avantages +

- Peu affecté par la température : fonctionne sans pertes entre -20°C et 55°C.
- Bien conçu
- Technologie sans transformateur* donc avec une meilleure efficacité
- Différence entre efficacité européenne et efficacité max de moins de 1%.
- Léger : 12,7kg
- Un nombre exhaustif de valeurs mesurées sont affichables
- Large gamme de tensions et de puissance d'entrée: dimensionnement simplifié du système PV

- Inconvénients -

- Beaucoup de fils : gênant, et défaillances possibles aux points de connections.
- Une plus grande marge de surcharge serait un avantage certain.

C.3.d Fiche SIEMENS, onduleur Sitop Solar 1100 master

SIEMENS (Allemand) est l'une des plus grandes entreprises en ingénierie de l'électricité et en électronique. C'est la filière Automation&Control qui développe des onduleurs solaires.

SIEMENS SITOP SOLAR 1100M

- Norme IP21
- Temps de connexion au réseau : 70s (d'après le test)
- Onduleur maître avec connections pour 2 esclaves (max 1500W chacun)
- Technologie sans transformateur
- Puissance de sortie: 1100W
- Possède un ENS* et un RCB*

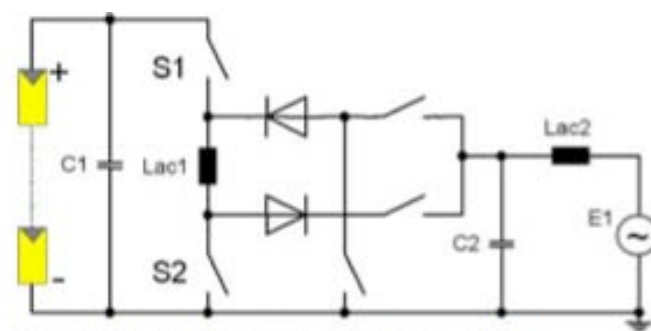


DESIGN DU CIRCUIT

Ce circuit diffère des topologies classiques par sa méthode de transformation de l'électricité continue en onde sinusoïdale.

L'énergie produite par le système PV passe dans un **filtre EMI***, pour atteindre l'étage de puissance. L'inducteur est connecté de telle manière avec les transistors, et les diodes que, selon le courant demandé, un convertisseur élévateur, abaisseur, ou abaisseur-élévateur de tension à modulation sinusoïdale est créé. Cela permet d'avoir une large gamme de tensions d'entrée, avec des valeurs supérieures ou inférieures à la tension crête du réseau. Dans cette configuration, la borne négative du générateur solaire est connectée au neutre du réseau, ce qui évite les sauts de tension.

Pendant ce temps, l'**ENS*** surveille la tension du réseau, son impédance et sa fréquence ainsi que le courant et sépare l'onduleur du réseau en cas de défaillance. Du côté DC, la résistance d'isolement est mesurée avant la connexion du système au réseau. Les interférences radio sont filtrées en sortie juste avant la borne du réseau.



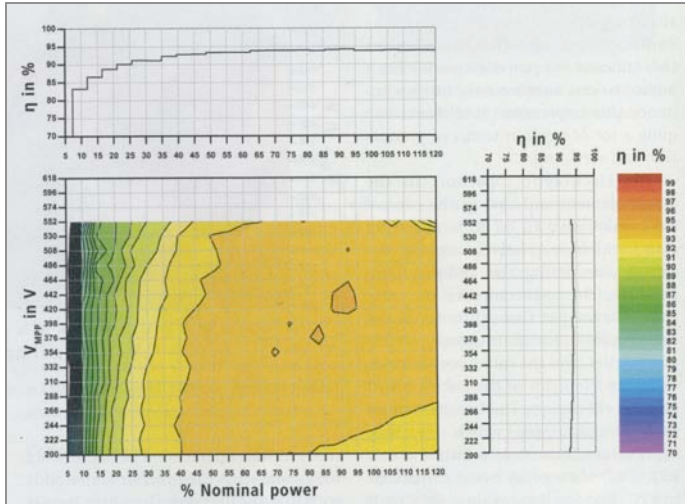
MESURES EFFECTUEES ET RESULTATS

(Utilisation pour ce test d'un « Simulateur Programmable PVAS2 de cellules photovoltaïques » car la source de tension DC initiale interagissait avec l'onduleur et provoquait des harmoniques HF interférant avec l'analyseur)

Rendement maximal

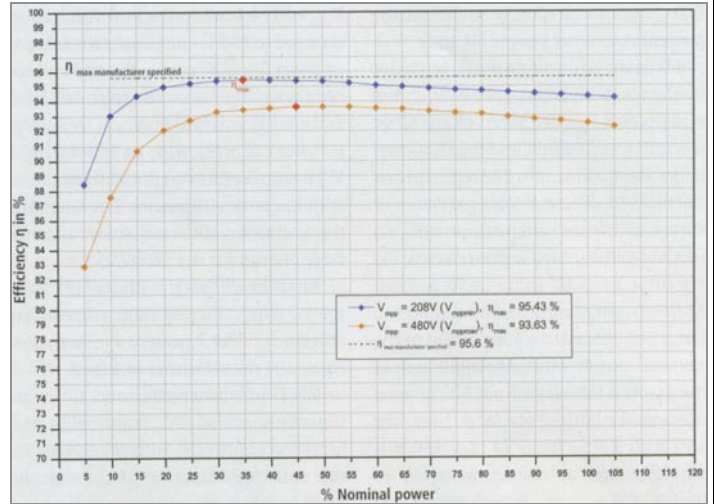
Cf. graphiques 1 et 2

- L'aire de rendement maximal se situe dans une zone de 200 à 552V pour plus de 40% de la puissance nominale, et l'efficacité atteint un maximum de 94,16%.
- En zone de surcharge, l'efficacité est maximale : Il semblerait que l'on ait sous-estimé la puissance de l'onduleur.
- À des niveaux de puissance plus faibles, l'efficacité tombe à 86%
- Remarque : à la puissance nominale : le $\cos \varphi$ est de 0,96 (loin de : 1 la valeur optimale)



Graphique 1 :

- Au centre : Graphique 3D de l'efficacité en fonction de la tension d'entrée et de la charge.
- En haut : Coupe pour une $V_{mpp} = 422V$
- À droite : Coupe pour une charge de 92% environ.
- Remarque : Une charge de 100% représente une puissance nominale en entrée de 1100W.



Graphique 2 :

Tracé de l'efficacité de l'onduleur à différentes tensions d'entrée (200, 442 et 552V) en fonction de la puissance nominale d'entrée, dont les courbes passent par les maxima et minima d'efficacité.

Rendement euro

Le produit atteint 91,69% pour $244 < V_{mpp} < 266V$, mais on est loin des 92,7% annoncés par le constructeur. De plus, il y a une différence assez importante (2,47%) entre le rendement maximal et le Rendement européen*.

Recherche du MPP

L'onduleur a besoin de 2'30" pour se connecter au réseau (1') et trouver le MPP*.

Pas de données concernant le temps d'adaptation lorsque V_{mpp} varie.

Gamme de MPP

Le constructeur promet une gamme d'entrée en tension entre 200 et 630V. Pour plus de sécurité, la différence entre la tension V_{mpp} max et la tension d'entrée max devrait être de 20% de V_{max} . Ici, $V_{max} = 675V$, la tension V_{mpp} max annoncée est donc trop grande.

Efficacité de réglage du MPPT

Cf. graphique 3

Pour une charge de 40 à 120%, l'onduleur accepte plus de 99% de la puissance fournie pour une tension entre 200 et 464V. Au-delà de 464V et avec une plus faible charge, le réglage devient de plus en plus mauvais. Au-delà de 552V l'onduleur ne sait stabiliser le MPP*.

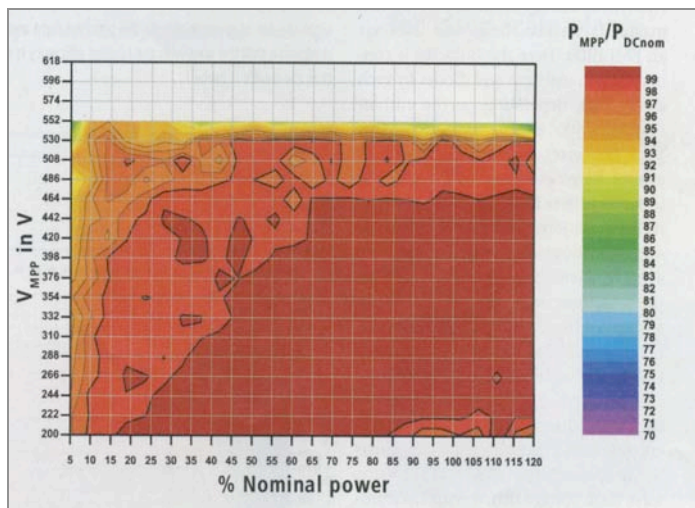
Affichage de la tension de sortie

Cf. graphique 4

Pour $V_{mpp} = 376V$, charge entre 5 et 120%

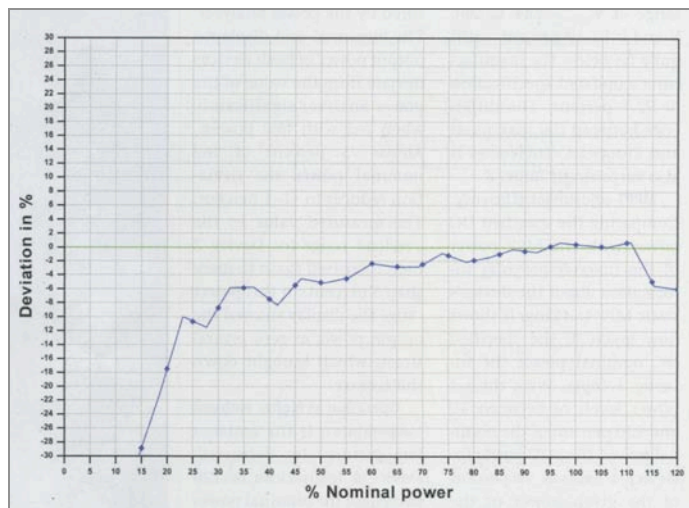
Pour de basses puissances, les valeurs affichées sont très différentes de celles qui sont données par l'analyseur.

Au-delà de 75% de la puissance nominale, la différence se réduit à +/- 1%, en sachant que plusieurs passages par zéro viennent faire baisser la moyenne.



Graphique 3 :

Courbe 3D montrant l'efficacité de réglage du MPP en fonction de la tension d'entrée et de la charge en entrée.*



Graphique 4 :

Courbe définissant l'erreur d'affichage de l'onduleur en fonction de la puissance d'entrée pour $V_{mpp}=376V$.

Puissance nominale injectée dans le réseau	L'onduleur est capable de fournir au réseau jusqu'à 120% de sa puissance nominale dans la gamme de tensions 200 à 552V (à 25°C)
Fonctionnement à températures plus élevées	L'onduleur peut fournir jusqu'à 120% de sa puissance nominale jusqu'à 52°C.
Fonctionnement en surcharge	Avec une surcharge de 1,3 fois la puissance d'entrée nominale (1560W à 376V à 24°C), l'onduleur limite sa puissance à 1460W soit à une surcharge de 21,7% (l'onduleur ajuste son point de fonctionnement à une tension plus haute).
Consommation propre	Jour : Test PI = 8,3W Siemens < 7,5W Nuit : Test PI = 0,8W Siemens = 1W
Thermographie	Pas de composants visibles dont la température n'excède 55,9°C (à T=24°C)
Commentaires du constructeur	En accord avec les résultats des mesures effectuées. A mis à jour les données techniques de l'onduleur concernant l'efficacité européenne et la puissance AC (maintenant noté 1400W au lieu de 1100W).

CONCLUSION

+ Avantages +

- Léger : 5,7kg
- Une température ambiante > 50°C n'affecte pas le fonctionnement
- Très compact
- Supporte une surcharge de 20%

- Inconvénients -

- Écart important entre l'efficacité maximale et européenne.
- Le design rend la maintenance et l'accès au ventilateur difficiles.
- Les valeurs affichées sont très différentes de la réalité

Lors de ce test, 2 onduleurs ont été testés en raison d'une trop grande différence de mesures entre le test et les données du constructeur sur le premier onduleur. Le premier onduleur comportait un inducteur, appelé C922-06, dont les caractéristiques réduisaient l'efficacité. Cet inducteur a été utilisé dans les onduleurs construits entre Janvier et juin 2005, et a depuis été changé. Seuls les résultats obtenus avec le 2^e onduleur sont exposés ici.

Une chose est claire : des onduleurs comme le premier testé, ne devraient pas être en mesure de valider les contrôles de qualité de l'entreprise et être mis sur le marché.

C.3.e Fiche KACO, onduleur Powador 3501xi

KACO (« Kupfer-Asbest-Company Gustav Bach »), entreprise allemande, fabrique des onduleurs sinusoïdaux depuis 60 ans pour l'industrie ferroviaire et maintenant pour les systèmes photovoltaïques.

KACO POWADOR 3501xi

- Norme IP54 (protection contre les poussières grossières et les gouttes de pluie) : convient pour une utilisation limitée en extérieur.
- Puissance de sortie: 3500W
- Successeur de la série Blue Planet
- Refroidissement passif
- Protection de découplage : BISI

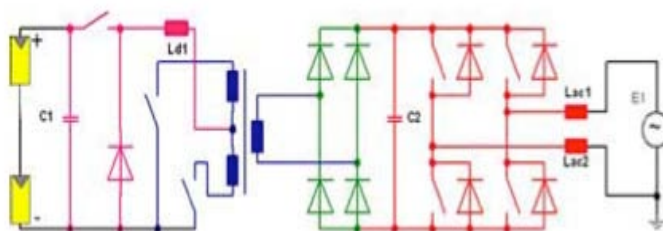


DESIGN DU CIRCUIT

L'énergie produite par le système PV passe dans un **filtre EMI*** puis dans un **convertisseur abaisseur** puis un **transformateur* push pull***.

La tension continue (redressée après le transformateur*) après quelques filtrages atteint le pont de sortie de l'onduleur qui hache la tension et crée une tension de sortie sinusoïdale de fréquence 50Hz avec l'aide d'un **PWM*** et d'un filtre adapté.

En cas de déviations de la tension, l'impédance ou la fréquence du réseau, un interrupteur automatique BISI s'occupe de la déconnexion de l'onduleur (protection de découplage). Les interférences radio sont filtrées en sortie juste avant la borne du réseau.

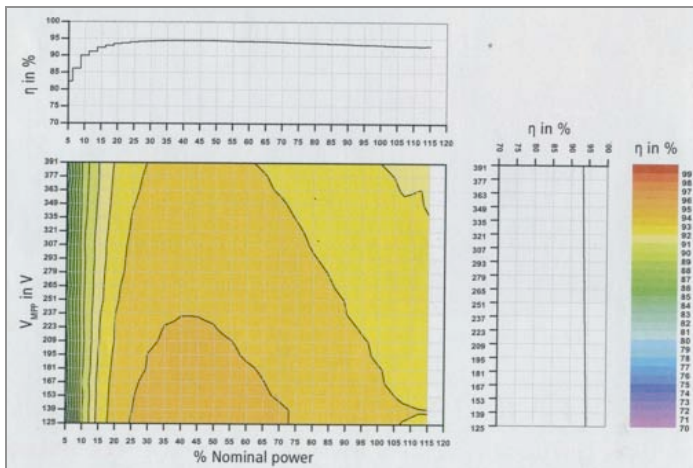


MESURES EFFECTUEES ET RESULTATS

Rendement maximal

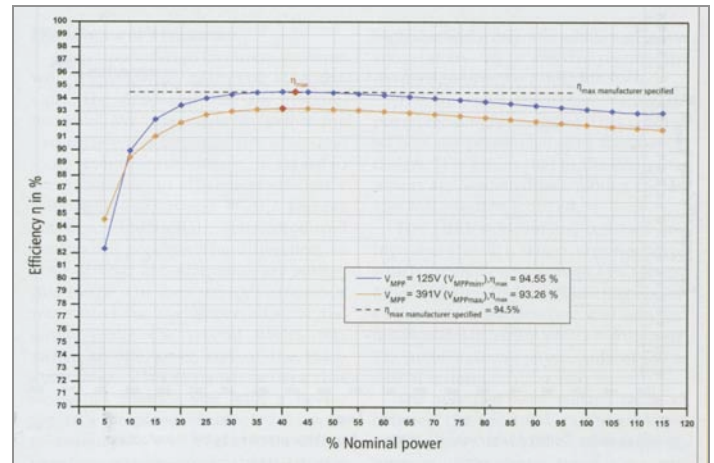
Cf. graphiques 1 et 2

- Le rendement maximum est de 94,55% pour $V_{mpp}=125V$, à 42% de la puissance nominale d'entrée.
- La zone d'efficacité maximale est très large. Elle commence à la tension d'entrée la plus basse (125V) et s'étend de 25 à 70% de la puissance nominale d'entrée.
- Le rendement devient plus faible quand on augmente la tension d'entrée. Il est par ailleurs plutôt bon pour de faibles puissances.



Graphique 1 :

- Au centre : Graphique 3D de l'efficacité en fonction de la tension d'entrée et de la charge.
- En haut : Coupe pour une $V_{mpp}=125V$
- À droite : Coupe pour une charge de 42% environ.
- Remarque : Une charge de 100% représente une puissance nominale en entrée de 3500W.



Graphique 2 :

Tracé de l'efficacité de l'onduleur à différentes tensions d'entrée (125 et 391V) en fonction de la puissance nominale d'entrée, dont les courbes passant par les maxima et minima d'efficacité.

Rendement euro

Il atteint un maximum de 94,46% à $V_{mpp}=139V$, ce qui est légèrement plus haut que celui qui est annoncé par le constructeur de 93,3%.

Recherche du MPP

Une fois connecté au réseau, 20 secondes sont nécessaires à l'onduleur pour atteindre le MPP*. Si on fait varier la tension d'entrée de 251 à 265V, la recherche du MPP* prend 8s.

Gamme de MPP

125V à 400V (bonnes marges entre les tensions d'entrée min et max)

Efficacité de réglage du MPPT

Cf. graphique 3

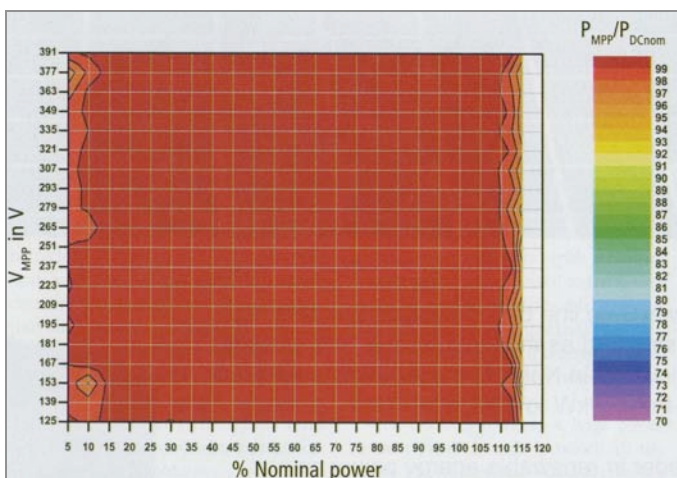
Pour une puissance comprise entre 5% et 105% de la puissance nominale, l'onduleur accepte plus de 99% de la puissance disponible dans la gamme complète de tension d'entrée. La part de puissance acceptée diminue pour des charges inférieures à 10% et supérieures 113% (pour des raisons de puissance limitée)

Affichage de la tension de sortie

Cf. graphique 4

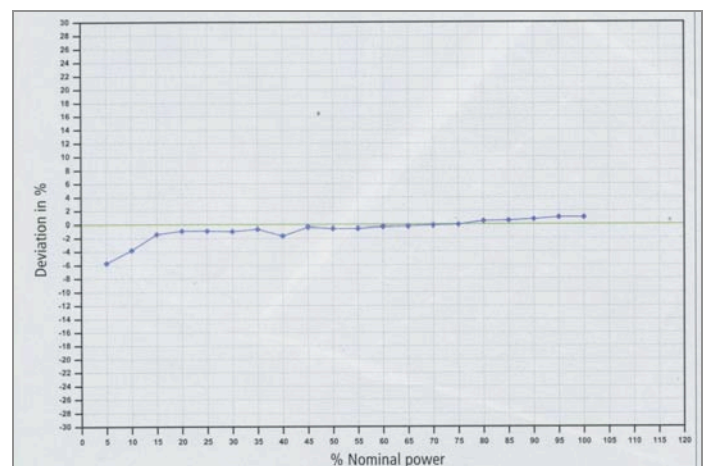
Pour $V_{mpp}=251V$, charge entre 5 et 100%

L'erreur d'affichage est d'environ +/- 1% au-delà de 20% de charge. En deçà de 20%, l'erreur est de plus en plus grande.



Graphique 3 :

Courbe 3D montrant l'efficacité de réglage du MPP* en fonction de la tension d'entrée et de la charge en entrée



Graphique 4 :

Courbe définissant l'erreur d'affichage de l'onduleur en fonction de la puissance d'entrée pour $V_{mpp}=251V$.

Puissance nominale injectée dans le réseau	L'onduleur fournit sa puissance nominale au réseau dans toute la gamme de tensions d'entrée, pour une charge pouvant aller jusqu'à 113% de la puissance nominale DC.	
Fonctionnement à températures plus élevées	L'onduleur peut fournir jusqu'à 113% de sa puissance nominale jusqu'à 43°C. Au-delà il est contraint de modifier le point de fonctionnement pour réduire les pertes thermiques.	
Fonctionnement en surcharge	Avec une surcharge de 1,3 fois la puissance d'entrée nominale (4550W à 251V à 23,6°C), l'onduleur limite sa puissance à 3940W soit à une surcharge de 12,9% (l'onduleur ajuste alors son point de fonctionnement à une tension plus haute)	
Consommation propre	Jour : Test PI = 2,9W Kaco < 5W	Nuit : Test PI = 0,34W Kaco = 0W
Thermographie	Impossible d'obtenir une thermographie cohérente à cause de la manière dont le circuit est monté.	
Commentaires du constructeur	Le constructeur a approuvé les résultats.	

CONCLUSION

+ Avantages +

- Bon rendement pour un modèle avec transformateur*.
- Rendement européen* à peine 1% en dessous du rendement maximal.
- Rendement constant dans une large gamme de tensions et de puissance = dimensionnement facile des systèmes PV

- Inconvénients -

- Câblage complexe = réparations difficiles

Lors de ce test, 2 onduleurs ont été testés en raison d'une grande différence de mesures entre le test et les données du constructeur avec le premier onduleur.

Le constructeur s'est défendu en affirmant que des fluctuations du rendement de l'ordre de +/-0,2% sont possibles pour des produits de séries différentes, et que les résultats des 2 séries de mesures (une pour chaque onduleur) sont compris dans la marge d'erreur tolérée.

Les résultats de mesures du 1^{er} onduleur sont situés dans la partie minimale de la tolérance ce qui pourrait aussi s'expliquer par une erreur de calibrage des chaînes de mesures dans la chaîne de construction.

Seuls les résultats obtenus avec le 2^e onduleur sont exposés ici.

Conclusion

La technologie des onduleurs repose sur un principe électronique simple de conversion de l'énergie électrique. Cette technologie devient, en réalité, de plus en plus complexe au fur et à mesure des avancées technologiques et des innovations qui lui sont apportées, et des exigences des systèmes PV.

Ces tests donnent une meilleure compréhension du comportement de l'onduleur et des conditions de son fonctionnement optimal, au-delà des chiffres théoriques exposés dans les fiches techniques des appareils.

Les 5 onduleurs testés sont représentatifs de la diversité qui existe au sein du marché des onduleurs PV. Les tests révèlent leurs particularités : le Fronius IG 30 et ses 3 pics de rendement ; Sputnik Solarmax 2000C avec sa technologie sans transformateur* et son très bon rendement; la simplicité et le bon fonctionnement du Sunny Boy 3800 de SMA ; la compacité du Siemens Sitop Solar et son surdimensionnement apparent, et enfin le bon rendement constant du Powador 3501xi de Kaco sur une large plage de tensions d'entrée.

La technologie des onduleurs PV, comme celle des panneaux solaires, évolue et réserve encore quelques améliorations, notamment du côté du rendement et de la fiabilité.

Les auteurs de ce rapport espèrent que les informations qu'il contient correspondent à vos attentes et qu'elles contribueront à une meilleure compréhension de la technologie des onduleurs.

Références

- [1] IEA - SHC Task 16
- [2] Zacharias P., Berger B., *Overview of recent inverter development for grid-connected systems*, 21st European Photovoltaic Solar Conference, Dresden, 2006 , DVD, ISBN 3-936338-20-5.
- [3] Parler S.G Jr, Dublier C., *Selecting and applying Al Electrolytic capacitors for inverters applications*, Richardson Electronics, www.industrial.rell.com.
- [4] ESRAM T., Chapman P.L., *Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques*, Grainger Center for Electric Machinery and Electromechanics, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [5] *Market survey : Inverters 2007*, Photon International Avril 2007, p. 138
- [6] *Market survey : Inverters for grid-tied PV systems*, Photon International Avril 2005 p.80, Séries de mesures effectuées à l'Université Suisse des sciences appliquées Neuchâtel, sur les modèles de Sunny Boy.
- [7] SMA, www.sma.fr
- [8] PowerLynx, www.powerlynx.dk
- [9] *Protecting the protectors*, Photon International Mai 2006, p.112
- [10] *Renewable Energy world*, Mars-Avril 2004
- [11] *Interaction between Solar Modules and Inverters*, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE)
- [12] *Testing Fronius'IG 30 inverter*, Photon International Janvier 2007 p.96
- [13] *Testing SMA's SB 3800 inverter*, Photon International Février 2007 p.104
- [14] *Testing Sputnik's Solarmax 2000C inverter*, Photon International Avril 2007 p.114
- [15] *Testing Siemens' Sitop solar 1100 inverter*, Photon International May 2007 p.120
- [16] *Testing KACO's Powador 3201xi inverter*, Photon International Juin 2007 p.150
- [17] *Testing Inverters*, Photon International Janvier 2007 p.92

Lexique

AC	<p>« Alternative Current » = Courant alternatif.</p> <p>Abréviation utilisée par extension pour qualifier la partie alternative d'un montage, d'une tension,</p>
BUCK-BOOST	<p>« Buck-boost » ou « hacheur élévateur-abaisseur ».</p> <p>Il s'agit d'un convertisseur continu-continu de la famille des hacheurs. C'est un montage sans transformateur* qui permet d'élever ou d'abaisser la tension.</p>
COURANT DC MAXIMUM	Le courant maximum admissible en entrée de l'onduleur.
COURANT DC NOMINAL	Le courant dont l'onduleur a besoin pour un fonctionnement normal.
COURANT MAXIMUM AC	Le courant maximum que l'onduleur peut délivrer au réseau.
COURANT NOMINAL AC	Le courant normalement délivré au réseau par l'onduleur à capacité maximale.
DC	<p>« Direct Current » = Courant Continu.</p> <p>Abréviation utilisée par extension pour qualifier la partie continue d'un montage, d'une tension,</p>
DISTORSION HARMONIQUE TOTALE (THD)	Représente la déviation du courant délivré par rapport à la forme sinusoïdale. La valeur doit être inférieure à 5%, et certains onduleurs atteignent même des valeurs inférieures à 3%.
COMPATIBILITE ELECTROMAGNETIQUE	<p>EMC=Electromagnetic compatibility / Compatibilité électromagnétique</p> <p>Aptitude d'un appareil ou d'un système électronique à fonctionner dans son environnement électromagnétique de manière satisfaisante, sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques intolérables pour les appareils se trouvant dans son environnement.</p>
EMI	<p>« Electromagnetic Interferences » / Interférences électromagnétiques</p> <p>Les bruits électromagnétiques sont le résultat de tous les courants électriques. Ils induisent des champs et des signaux parasites qui peuvent perturber le bon fonctionnement de certains appareils s'ils ne sont pas filtrés.</p>
ENS	<p>Système de découplage électromécanique inventé par l'Allemand Klaus Köln et équipant presque tous les onduleurs allemands.</p> <p>L'impédance du réseau est testée de manière permanente et l'ENS déconnecte automatiquement le système PV du réseau en cas de problème, afin d'éliminer tout risque d'îlotage.</p>
GAMME MPP DC	La gamme de tensions d'entrée parmi laquelle l'onduleur recherche la

tension opérationnelle optimale du générateur PV.

HARMONIQUES

Toute fonction périodique peut être décomposée (base de Hilbert) en une somme de fonctions trigonométriques sinusoïdales de fréquences multiples de la fréquence fondamentale de la fonction (série de Fourier). Ces fonctions sinusoïdales sont appelées harmoniques.

En électricité, quand il y a des harmoniques cela signifie que le système de tensions et de courants n'est pas parfaitement sinusoïdal (une sinusoïde parfaite = une seule fréquence). Les harmoniques font augmenter les pertes thermiques et donc baisser le rendement de l'onduleur, et elles altèrent la qualité de l'énergie électrique du réseau.

ÎLOTAGE

On parle d'îlotage lorsqu'un générateur se retrouve déconnecté du réseau principal, et continue à alimenter des charges, formant un îlot avec ces charges. Différents risques en découlent : la dégradation des équipements électriques en cas de dérives de tension et de fréquence importantes, problèmes de déphasage entre réseau et générateur après ré-enclenchement, les problèmes de sécurité pour le public et la maintenance.

ISOLATION GALVANIQUE

Dans un transformateur*, les circuits primaires et secondaires sont couplés magnétiquement donc le courant ne peut pas circuler directement entre les 2 circuits et le primaire est donc protégé des perturbations que peut subir le secondaire (le réseau dans le cas des systèmes PV). C'est ce qu'on appelle une isolation galvanique.

MLI

Modulation de largeur d'impulsion ou Pulse Width Modulation (PWM*) en anglais

Par Modulation de Largeur d'Impulsion, on entend modulation du rapport cyclique d'un signal.

En appliquant une succession d'états discrets pendant des durées choisies, on obtient en moyenne sur une certaine durée n'importe quelle valeur intermédiaire. Ce type de modulation est largement employé pour diverses applications : Variateur de vitesse, chargeur de batterie, alimentation à découpage, potentiomètre numérique....

Dans les onduleurs photovoltaïques, la modulation de largeur d'impulsions alliée à un filtre permet de transformer un signal continu en alternatif à la fréquence voulue.

MPP

« Maximum Power Point » = Point de puissance maximale.

Cf. paragraphe A.3

PUISSANCE ACTIVE

Exprime la puissance réellement utile à un appareil électrique : celle qui est convertie en puissance mécanique.

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

PUISSANCE APPARENTE

La puissance que doit fournir le distributeur pour alimenter l'ensemble des récepteurs.

$$S = U \cdot I = \sqrt{(P^2 + Q^2)}$$

PUISSANCE MAX AC	La puissance que l'onduleur peut délivrer au réseau pendant un court moment (30 min par exemple), avant qu'il ne chauffe trop et qu'il n'oblige à réduire la puissance.
PUISSANCE NOMINALE AC	La puissance délivrée normalement au réseau par l'onduleur en charge max.
PUISSANCE DC MAX	La puissance max admissible à l'entrée de l'onduleur. Dans le cas d'une puissance plus élevée, l'onduleur ne sera peut-être pas endommagé, mais son fonctionnement ne sera pas optimal.
PUISSANCE REACTIVE	C'est une composante de la puissance apparente (l'autre étant la Puissance active*). Elle est déphasée de 90° par rapport à la Puissance active*. Elle exprime la puissance absorbée par des inductances pures ou des condensateurs. Cette puissance n'est pas utilisable dans le plupart des cas. On en limite la quantité en imposant un facteur de puissance (cos φ) maximum. $Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$
PUSH-PULL	Un montage push-pull est un convertisseur continu-alternatif (onduleur) dont la présence d'un transformateur* à point milieu permet d'une part d'élever ou d'abaisser la tension en jouant sur le rapport de transformation, et d'autre part d'économiser 2 transistors et deux diodes (par rapport à un onduleur de pont) Attention : pour des raisons technologiques la gamme de puissance du montage push-pull reste limitée à quelques dizaines de kilowatts.
PWM	Pulse-Width Modulation ou MLI en français.
TENSION DC NOMINALE	La tension sous laquelle l'onduleur est normalement utilisé.
TENSION MAX DC	La tension maximale que le système PV peut délivrer. Si cette tension est dépassée, l'onduleur risque d'être endommagé.
TENSION MIN DE LA PUISSANCE NOMINALE	La tension minimum dont l'onduleur à besoin pour alimenter le réseau avec sa puissance nominale.
TRANSFORMATEUR	Appareil permettant de modifier les valeurs de tensions et d'intensité du courant d'un système d'énergie électrique alternative en un système de tensions et de courant de valeurs différentes mais de même fréquence et de même forme. Un transformateur est composé de 2 bobines enroulées autour d'un circuit magnétique qui constitue la carcasse du transformateur. On distingue l'enroulement primaire et l'enroulement secondaire. L'énergie électrique est transmise magnétiquement entre le primaire et le secondaire.

RCB

« Residual Current Breaker » ou « Residual Current Device »

C'est un dispositif qui détecte les déséquilibres de courant entre la phase et le neutre, et déconnecte le circuit en conséquence. Ce déséquilibre pourrait être dangereux si quelqu'un venait à toucher accidentellement ou manipuler le dispositif.

RENDEMENT EUROPEEN

L'onduleur ne fonctionnant pas à charge maximale toute l'année, la notion de rendement européen permet de prendre en compte la fréquence et les variations d'ensoleillement.

Il se calcule avec la formule :

$$\eta_{\text{Euro}} = 0,03\eta_{5\%} + 0,06*\eta_{10\%} + 0,13*\eta_{20\%} + 0,1*\eta_{30\%} + 0,48*\eta_{50\%} + 0,2*\eta_{100\%}$$

Les $\eta_{x\%}$ correspondent aux rendements de l'onduleur pour $x\%$ de la puissance nominale (charge), cf. figure 15.

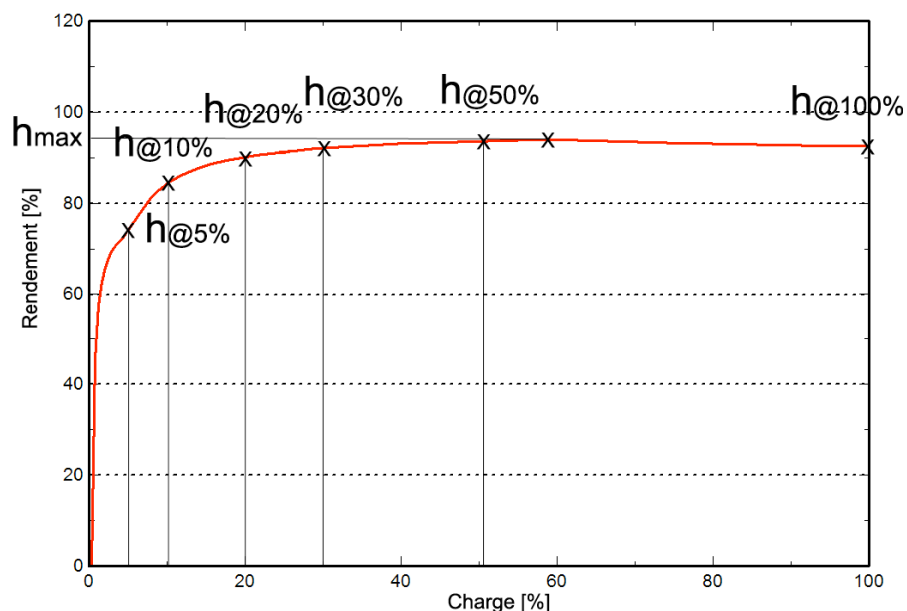


Figure 16 : Courbe typique du rendement d'un onduleur PV en fonction de sa charge, illustrant les points nécessaires au calcul du rendement européen.