

Installation solaire photovoltaïque autonome utilisant des cellules en couches minces CIS

Julien SERRES et Patrick DUBOIS

{julien.serres ; patrick.dubois}@ac-aix-marseille.fr

BTS Électrotechnique

Lycée Madeleine Fourcade,

Avenue du groupe Manouchian BP 128

13420 GARDANNE

Résumé : Cet article présente un essai de système destiné aux étudiants en première année du BTS électrotechnique. Durant cet essai, les étudiants vont travailler sur une station solaire équipée de deux panneaux photovoltaïques Cuivre - Indium - Sélénium- CIS - rechargeant deux batteries 12 V via un régulateur de charge MPPT, ce dernier alimentant un onduleur pur sinus de 350 VA.

Le but de cet essai est de familiariser les étudiants avec les différents éléments qui composent une station autonome photovoltaïque utilisant des cellules à couches minces CIS.

Mots clés : Essai de système, BTS électrotechnique, Photovoltaïque

Abréviations : - PV – Panneau photoVoltaïque ; - THD – Taux de Distorsion Harmonique (Total Harmonic Distorsion) ; - CIS – Cuivre-Indium-Sélénium

I. INTRODUCTION

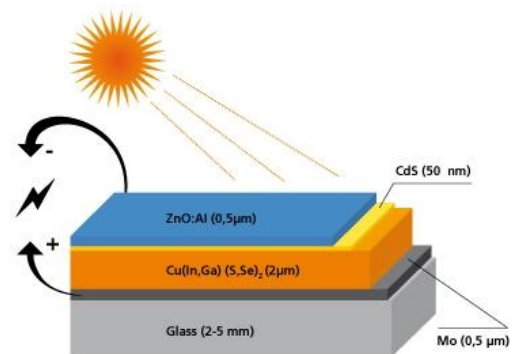
Dans cette partie, nous allons dresser un état de l'art de l'exploitation pédagogique des PV depuis la création de la revue 3EI, il y a maintenant bientôt 20 ans.

Lorsque l'on désire implanter une installation photovoltaïque, différentes questions doivent être abordées par le responsable de projet. Ces questions sont très variées, et vont du choix du logiciel pour estimer la production d'énergie électrique [Mazille et Boitier, 2010] à l'orientation optimale de l'installation photovoltaïque [Leger et al., 2006]. Depuis maintenant une dizaine d'année, les lycées se sont peu à peu équipés d'installations PV raccordées au réseau [Astier, 2004 ; Delanges et al., 2008 ; Coulaud et Monnot, 2010] pour décrire les différents aspects techniques relatifs à la production d'énergie photovoltaïque.

Sur le plan scientifique, ce type d'installation permet d'introduire, notamment par la professeur de Physique Appliquée, le modèle électrique des PV en effectuant différents essais de caractérisations [Arzandé et Éon, 2007 ; Jaouen et al., 2008 ; Boitier, 2008], et de construire un modèle numérique, par exemple, sous PSIM d'un PV [Roussel, 2010 ; Roussel et Aubry, 2012]. L'intérêt du hacheur parallèle et de la régulation peut alors être abordé en initiant les étudiants à l'algorithme MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) en utilisant un algorithme relativement simple appelé « perturbe et observe » [Fadat, 2005 ; Jaouen et al., 2008 ; Giraud et al., 2010]. Ce dernier point permet d'expliquer aux étudiants ce qui se cache

derrière le module « régulateur de charge MPPT », module obligatoire et directement relié aux PV.

Pour compléter les différents travaux pédagogiques antérieurs, nous avons alors souhaité présenter notre installation solaire autonome basée sur des PV de 2nd génération de type Cuivre – Indium - Sélénium (§. II et III), puis décrire notre méthode de travail en essais de systèmes (§ III.1), et enfin mieux expliquer ce qui se cache derrière les conditions standards de caractérisations des PV (§ III.2).



Légendes :

- Couche N°1 : ZnO:Al - Alliage d'oxyde de zinc et aluminium
- Couche N°2 : CdS - Sulfure de Cadmium, isolant
- Couche N°3 : Cu(In,Ga)(S,Se)₂ - Chalcogénure, appelé plus communément CIS
- Couche N°4 : Mo - Molybdène
- Couche N°5 : Glass - Verre, support de base sur lequel est déposé l'ensemble des couches par électrolyse

Figure 1 : Vue en coupe d'une cellule à base de CuInSe.
[D'après projet CISEL – EDF R&D et CNRS/ENSCP 2003]

II. LES CELLULES EN COUCHES MINCES CIS

II.1. Intérêt industriel

Notre station photovoltaïque autonome utilise la technologie des panneaux solaires de type Cuivre-Indium-Sélénium (CIS), et constitue la 2nd génération des types de cellules photovoltaïques. Elle se présente sous forme de films minces avec une épaisseur de l'ordre de 2 μm (Fig. 1), de type Cuivre-Indium-Sélénium, ces derniers affichent des rendements de l'ordre de 12,8% [Muller, 2007] avec un prix de revient nettement plus faible que les panneaux utilisant le silicium. En effet, la plupart des installations connectées au réseau de distribution ou autonomes font appel à des technologies basées sur le silicium utilisant des cellules polycristallines ou monocristallines (1^{ère} génération de cellules) dont le rendement énergétique est très proche de celles au CIS. Les atouts de la technologie CIS se situent donc sur d'autres aspects que le plan énergétique :

- Coût énergétique de la fabrication
- Flexibilité du panneau
- Tenue en température
- Spectre d'absorption plus large

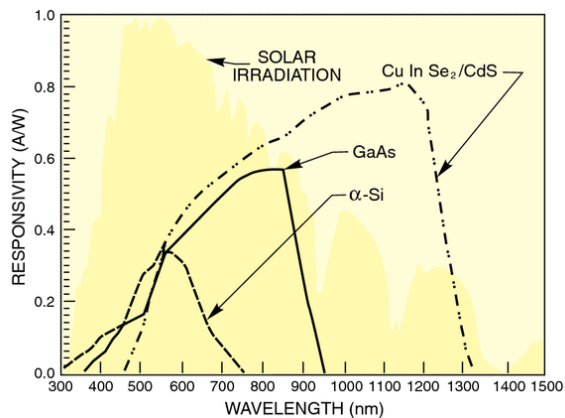


Figure 2 : Spectre d'absorption des cellules en couches minces CIS (notées CuInSe_2). On observe un élargissement important du spectre vers les infrarouges par rapport au silicium.

Source Web : [www.newport.com/Energy-Conversion]

Cette dernière particularité permet aux panneaux CIS d'être plus insensible aux ombrages et conditions nuageuses que ceux basés sur le silicium (Fig. 2).

II.2. Applications industrielles

Pour démontrer toute la potentialité industrielle de la technologie CIS, on peut citer l'exemple de l'une des plus grandes centrales solaires d'Europe utilisant des cellules CIS : la centrale de Brandis en Allemagne construite en 2009, où 550 000 modules CIS ont été installés sur une surface totale de 162 hectares, pour une puissance totale de 40 MWc et une production annuelle de 40 GWh (Fig. 3).

Il semble également que la technologie CIS présente un intérêt pour l'habitat individuel dans le cadre de la

maison dite ZEN (Zéro Énergie Nette) car la première maison ZEN a été inaugurée en 2007 [RICAUD et LOKHAT, 2012]. Cette maison est actuellement équipée d'une puissance photovoltaïque de 13 kWc couvrant la totalité de la toiture aussi bien orientée au sud qu'au nord.



Figure 3 : Centrale Solaire de Brandis en Allemagne.



Figure 4 : Station mobile photovoltaïque équipée de deux panneaux CIS de 80Wc. Les panneaux sont de la marque Würth Solar™ dont la référence est WSG0036E080.

III. ESSAI DE SYSTEME

III.1. Organisation

Les essais de systèmes en première année du BTS électrotechnique sont organisés en séance hebdomadaire de 4 heures. Nous travaillons avec un groupe de 24 étudiants divisés en 12 binômes. Nous proposons alors annuellement deux rotations de 12 essais de systèmes permettant de couvrir 24 séances d'essais de systèmes. Les autres séances d'essais de

systèmes sont dédiées à la formation aux logiciels spécifiques (TraceElecPro, PSIM, Zelio Solf, WinRelais...), à l'habilitation électrique, et à des formations sur des thèmes spécifiques tels que la qualité de l'énergie électrique [Serres et al., 2009]. Nous divisons chacun de nos essais de systèmes en 5 tâches. Celui que nous présentons dans cet article est divisé comme suit :

- T(1)** : Réalisation de schéma de l'installation,
- T(2)** : Étude de l'autonomie des batteries,
- T(3)** : Caractéristiques énergétiques du PV,
- T(4)** : Mise en service de la station solaire,
- T(5)** : Rédaction d'un document de synthèse.

III.2. Les 5 tâches

• Pour réaliser la tâche **T(1)**, les étudiants disposent de la station mobile photovoltaïque (Fig. 4) et d'un schéma synoptique de l'installation autonome (Fig. 5).

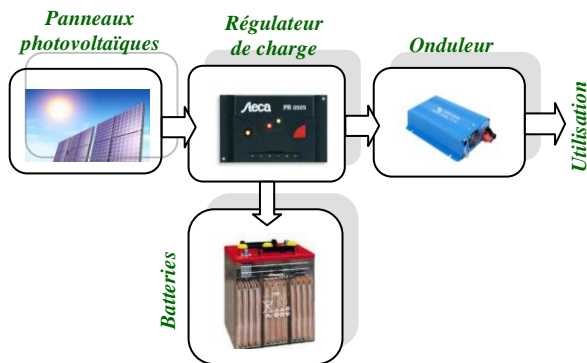


Figure 5 : Schéma synoptique de la station autonome photovoltaïque.

Les étudiants représentent alors le schéma électrique de la station autonome photovoltaïque au moyen du logiciel WinRelais dont le résultat est représenté sur la figure 6.

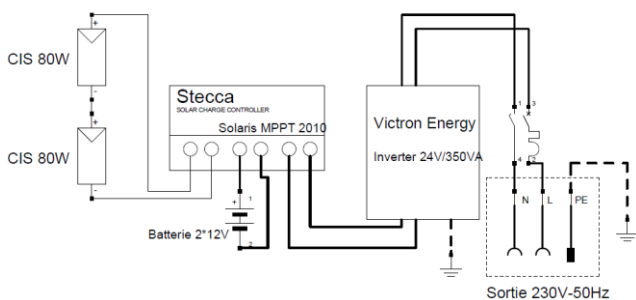


Figure 6 : Schéma électrique de la station autonome photovoltaïque.

• Pour réaliser la tâche **T(2)**, les étudiants sont invités à observer comment sont reliées les batteries, en identifier leur nature, et en calculer l'énergie stockée. Les étudiants repèrent alors qu'il y a deux batteries de 12 V plomb/acide montées en série de capacité nominale 12 Ah.

Ils en déduisent que la capacité de la batterie équivalente est alors de 12 Ah sous 24 V, puis une énergie électrique stockée de 288 Wh. Nous leur faisons alors remarquer qu'un montage en série permet d'augmenter la tension d'une association de batteries, alors qu'une association parallèle permet de faire augmenter la capacité disponible. Enfin un calcul de temps de décharge est alors proposé aux étudiants sous courant nominal de décharge des batteries.

Les batteries sont associées à un régulateur de charge de type MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) permettant d'extraire le maximum de puissance électrique de la part des PV quelles que soient les conditions d'ensoleillement et de température (e.g., l'algorithme « perturbe et observe » [Fadat, 2005 ; Jaouen et al., 2008 ; Giraud et al., 2010]). Cette dernière fonctionnalité est simplement expliquée aux étudiants car elle mériterait d'y consacrer une séance d'essais de systèmes à part entière.

• Nous détaillons ci-après les questions relatives à la tâche **T(3)** : Caractéristiques énergétiques du PV.

T(3.1) À partir des indications de la documentation, technique (Tab. 1) placer les points I_{SC} , U_{MPP} et U_{OC} sur le document en annexe 1 (cf. Fig. 7).

Electrical data in STC	
Nominal output according to STC	80 W
MPP Voltage (U_{mpp})	35 V
Current at max. capacity (I_{mpp})	2.29 A
Open circuit voltage (U_{oc})	44 V
Short circuit current (I_{sc})	2.5 A

Tableau 1 : Extrait des données techniques du panneau PV CIS de marque Würth Solar™ et de référence est WSG0036E080. Le fichier pdf du produit est mis à disposition des étudiants. STC = Standard test condition : 1000 W/m^2 , $AM = 1.5$, $T = 25^\circ\text{C}$.

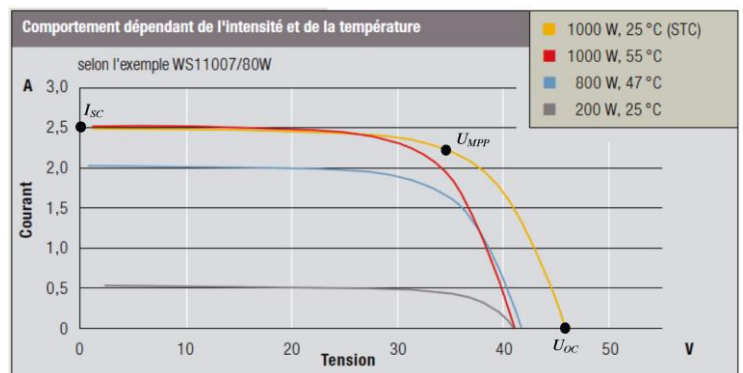


Figure 7 : Caractéristique électrique courant-tension $I(U)$ d'un PV CIS.

T(3.2) Dans quel cas et pour quel point y a-t-il un maximum de puissance délivré par le PV ?

→ La puissance est maximale dans les conditions standards d'utilisation lorsque :

- l'irradiance est égale à 1000 W/m^2
- le spectre de l'irradiance est normale par rapport à la densité de l'air : $AM = \ll \text{air mass} \gg = 1.5$
- la température du PV est égale à 25°C
- le point de fonctionnement du PV se situe sur U_{mpp} : soit ($U_{mpp} = 35 \text{ V}$, $I_{mpp} = 2,29 \text{ A}$), donc une puissance électrique de $80,15 \text{ W}$.

T(3.3) Donner, dans le cas de notre système, la valeur de la puissance maximale que peut délivrer nos PV.

→ Suivant les conditions standards d'utilisation, notre installation PV étant composée de 2 panneaux de 80 Wc , la puissance électrique maximale que peuvent délivrer nos deux panneaux est de 160 W (ou Wc).

T(3.4) Quelle est l'intensité du courant I débitée par les panneaux dans le cas précédent ?

→ Les deux PV sont couplés en série. Au point de fonctionnement maximal de puissance, ils délivrent un courant $I = I_{mpp} = 2,29 \text{ A}$.

T(3.5) Mesurer la puissance délivrée par les PV, vous préciserez votre démarche expérimentale. Donner par rapport à la puissance crête, le pourcentage de puissance délivrée par les panneaux.

→ Au moyen d'une pince wattmétrique (mode DC), suivant les conditions d'irradiance au moment de la mesure, nous obtenons 119 W , soit environ 74% de la puissance crête.

T(3.6) En précisant votre démarche expérimentale, mesure le rendement énergétique des deux PV.

→ Au moyen d'un solarimètre SL100 (Fig. 8), on peut mesurer l'irradiance reçue par le PV. Lors de notre mesure, une puissance solaire de 781 W/m^2 a été relevée. Le rendement énergétique du PV peut être alors calculé de la manière suivante :

$$\eta = \frac{P_{\square/\square} \text{ c}}{P_{sol}} = \frac{P_{\square/\square} \text{ c}}{E \cdot S} = \frac{119}{781 \cdot 1,205 \cdot 0,605 \cdot 2} = 10,5\%$$

On remarque que cette valeur est relativement proche de la valeur du rendement maximal ($12,8\%$) mesuré sur des produits industriels (cf. § II.1). Nous pensons que cet écart est dû essentiellement à deux raisons :

- Les conditions standards sont des conditions extrêmement particulières (cf. **T(3.2)** et Figs. 9,10), voir même de laboratoire. Le CEA a

d'ailleurs démontré que les PV travaillaient en moyenne à 94% de leur possibilité en situation réelle et optimale de fonctionnement [Guerrin, 2005].

- Les solarimètres sont sensibles à la bande spectrale du silicium (Fig. 8) et non la bande spectrale élargie du CIS (Fig. 2), car ce dernier ne contient nullement de silicium (Fig. 1).



Figure 8 : Solarimètre SL100 (Kimo®, coût 430 € TTC). Bande spectrale de 400 nm à 1100 nm , avec une gamme d'irradiance de mesure de 1 W/m^2 à 1300 W/m^2 . La cellule de détection est constituée de silicium polycristallin, conformément au spectre d'absorption représenté sur la Fig. 2. Il existe également des pyranomètres (synonymes de solarimètres), par exemple le PYR1307 (coût 130 €), mais sa bande spectrale d'absorption va de 300 nm à 1000 nm .

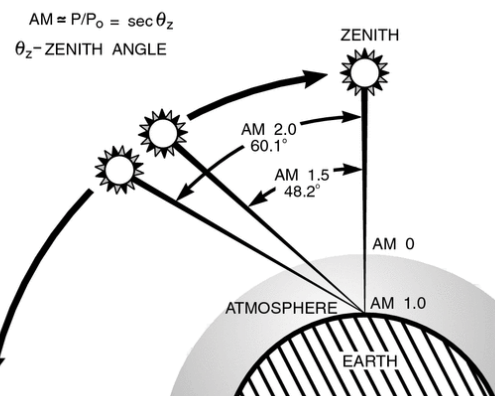


Figure 9 : Les différentes conditions AM. La valeur de AM dépend de l'angle zénithal. Source Web : [www.newport.com/Introduction-au-rayonnement-solaire]

T(3.7) On souhaite construire une centrale photovoltaïque raccordé au réseau et produisant $30,9 \text{ MWC}$ (comme la centrale solaire des Mées dans les Alpes de Haute-Provence dotée de $112\,780$ panneaux poly-cristallins) avec des panneaux équivalents, calculer la surface de cette centrale.

→ 30,9 MWc / 80 Wc = 386 250 unités, soit une surface totale de 386 250 x 0,729 = 281 586 m², soit environ 28 ha de PV de type CIS pour une surface totale exploitée au sol de 63 ha indiqués pour la centrale solaire des Mées. Cela signifierait que seulement environ 50% de la surface du terrain serait exploité par les PV. Le gain d'échelle semble relativement faible dans la mesure où le rendement énergétique des deux types de cellules sont relativement proche.

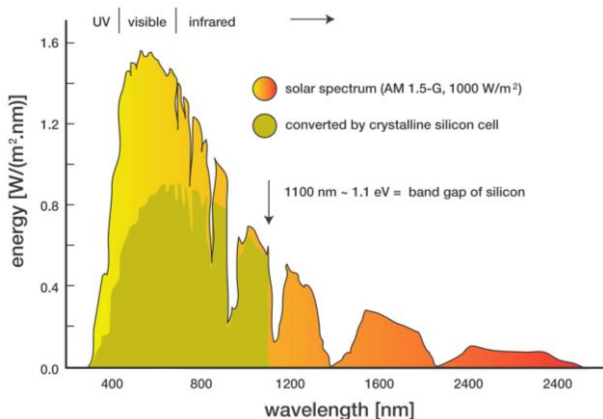


Figure 10 : Spectre électromagnétique du Soleil reçu suivant la condition AM = 1.5-G. [Source Web inconnue]. Cette dernière condition est définie par la norme internationale CEI/IEC 904-3. L'irradiance de 1000 W/m² correspond à la totalité du spectre solaire disponible d'environ 250 nm à 2500 nm, hors seule le spectre compris entre 250 nm et 1100 nm est utilisable pour les PV au silicium, et de 450 nm à 1300 nm pour les PV au CIS. L'irradiance effective des PV suivant la condition AM = 1.5-G serait alors dans sa bande passante égale à 800 W/m², donc, et pour simplifier, 20% des photos reçus par un PV ne peuvent déjà pas interagir avec celui-ci. [www.newport.com/Introduction-au-rayonnement-solaire]

• Nous détaillons maintenant les questions relatives à la tâche **T(4)** : Mise en service de la station solaire.

T(4.1) Visualiser l'allure de la tension d'entrée et de sortie de l'onduleur. Déduisez-en la nature du convertisseur.

→ La tension d'entrée est continue 24 V, et la tension de sortie est sinusoïdale 50 Hz de valeur efficace V = 230V. Le convertisseur ci-présent, appelé onduleur, est un convertisseur continu/alternatif (DC/AC).

T(4.2) Justifier le nom d'onduleur « pur sinus ». Pour cela, mesurer le taux de distorsion en tension – THD –, puis chercher à l'aide d'Internet le THD maximum toléré sur le réseau de distribution.

→ On relève un THD V% = 3,8% en sortie de l'onduleur. Cela représente un très faible THD en

tension, sachant que les normes CEI 61000-2-2 et EN 50160 définissent les niveaux des harmoniques de tension sur les réseaux publics basses tensions (BT). Le taux global de distorsion en tension en BT doit ainsi rester inférieur à 8%, ce qui est bien le cas. C'est la raison pour laquelle cet onduleur peut-être qualifié de « pur sinus ».

T(4.3) Calculer le courant maximum pouvant être délivré par l'onduleur sur une charge résistive, vous pourrez vous aider de la documentation du convertisseur.

→ Sur la documentation technique, on relève que l'onduleur peut distribuer une puissance apparente de S = 350 VA. Lorsque la charge est résistive, le facteur de puissance est égale à l'unité, donc : I = S/V = 350/230 = 1,52 A.

T(4.4) Mesurer les harmoniques de la tension en sortie de l'onduleur pour le fonctionnement nominal. Quels sont les harmoniques les plus importants ?

rang	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9
%	100	0	3,5	0	0,95	0	0,5	0	0,47
V	232	0	8,2	0	2,2	0	1,2	0	1,1

→ Les harmoniques de tension les plus importants sont les harmoniques H3, H5, H7, et H9. L'harmonique H3 (150 Hz) est le plus prépondérant, et explique quasiment à lui seul le THD V% = 3,8%.

Les étudiants remarquent alors que tous les harmoniques pairs sont nuls. Nous expliquons alors aux étudiants que lorsqu'une tension (ou un courant) est périodique et présente une symétrie dite de demi-onde, c'est-à-dire telle qu'une rotation autour de l'abscisse de l'alternance positive ou négative permet de reproduire l'autre alternance, alors tous les harmoniques de rang pair sont nuls.

T(4.5) Maintenant, vous allez caractériser la courbe de rendement de l'onduleur. Pour cela, et par vos mesures, complétez le tableau ci-dessous :

I _S (A)	0,25	0,5	0,75	1	1,25
P _E (W)	68	133	202	283	352
P _S (W)	58	115	171	232	280
η	0,85	0,86	0,85	0,82	0,80

Que peut-on dire du rendement de l'onduleur ?

→ La documentation constructeur de l'onduleur 350 VA déclare un rendement énergétique de 89% pour une tension d'entrée de 24 V. On peut alors dire que le rendement de l'onduleur est excellent dans la mesure où il fonctionne à pleine charge, toutefois nos essais n'ont pas permis d'atteindre un tel rendement. L'onduleur joue seulement le rôle de convertisseur

DC/AC mettant en forme l'énergie électrique à distribuer sous forme purement sinusoïdale 230V/50Hz.

• Enfin **T(5)** : Rédaction d'un document de synthèse. Tout au long des séances d'essais de systèmes, les étudiants travaillent sur support informatique pour lire les sujets et les documentations, rédiger leur rapport, dessiner les figures, représenter les résultats sur des graphiques au moyen du logiciel Open Office. Leur rapport sous support informatique (.pdf) est ensuite envoyé par courriel aux enseignants.

I. CONCLUSION

Introduire les panneaux photovoltaïques de 2nd génération dans nos enseignements permet de développer la culture technologique de nos étudiants, en découvrant qu'ils ne sont pas seulement basés sur le silicium. Par ailleurs, les étudiants sont sensibles aux énergies renouvelables, c'est un secteur très porteur de nos jours et certainement tout au long du XXI^{ème} siècle, chaque année de nombreux étudiants de notre BTS électrotechnique poursuivent en licence pro « énergies renouvelables ». Cet essai de système, introduit en première année du BTS électrotechnique, nous permet par la suite, de développer d'autres essais de systèmes, comme les onduleurs et leurs modes de commande. Nous disposons également au sein de notre atelier d'une Alimentation Sans Interruption – ASI – de 10 kVA, dont nous proposerons également une publication de cet essai, par la suite, dans la revue 3EI. Nous envisageons également de faire l'acquisition d'une éolienne de proximité pour démontrer aux étudiants l'intérêt de solutions hybrides (solaire + éolien) [Nael et al., 2006 ; Leger et al., 2004], qui devrait à l'avenir se développer massivement dans le cadre l'habitat individuel/collectif dit ZEN – Zéro Énergie Nette – [Ricaud et Lokhat, 2012].

Références bibliographiques

- Arzandé A. et Éon T., “Commande d'une pompe par générateur photovoltaïque”, La Revue 3EI, No 51, pp. 45-50, Déc. 2007.
- Astier S., “L'électricité photovoltaïque connectée au réseau : une énergie en plein essor”, La Revue 3EI, No 39, pp. 32-45, Déc. 2004.
- Boitier V., Baget R., Alonso C., “Caractérisation de panneaux photovoltaïques”, La Revue 3EI, No 55, pp. 54-61, Dec. 2008.
- Coulaud S. et Monnot E., “Les projets d'un atelier scientifique et technique: l'atelier Énergie et Environnement”, La revue 3EI, No 62, pp. 29-35, Sept. 2010.
- Delagnes D., Fleche B., et Porterie R., “Systèmes Solaires Photovoltaïques”, La Revue 3EI, No 54, pp. 19-30, Sept. 2008.
- Fadat J., “Chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque – Commande MPPT”, La Revue 3EI, No 43, pp. 50-62, Déc. 2005.
- Giraud F., Sergent J-F., Amberg M., Le Ménach Y., “Initiation à la conversion de l'énergie électrique : exemple sur un micro-système de production photovoltaïque”, La Revue 3EI, No 60, pp. 51-55.
- Guénin de Montgareuil A., “Des cellules de haute technologie pour des modules moins chers”, CLEFS CEA, No 50/51 pp. 116-120, hiver 2004-2005.
- Jaouen C., Lacombe E., Berthoux O. et Kleider J-P., “Étude didactique des systèmes photovoltaïques : optimisation thermique et électrique”, La Revue 3EI, No 52, pp. 59-72, Mars 2008.
- Leger V., Gatel D., Pichon J., Pellion K., Vincent Y., Escassut J., Vignal T. et Lequilleuc B., “Chaîne de conversion solaire-photovoltaïque”, La Revue 3EI, No 46, pp. 29-40, Sept. 2006.
- Leger V., Pellion K., Vincent Y., Lequilleuc B., Vignal T., Ben Moussa M., “Étude d'un système de production, par énergies renouvelables, couple au réseau : principe de fonctionnement, aspect énergétique, bilan de puissance”, La Revue 3EI, No 39, Déc. 2004
- Mazille D. et Boitier V., “Quels logiciels utiliser pour estimer la production d'une installation photovoltaïque ?”, La revue 3EI, No 63, pp. 50-59, Dec. 2010.
- Muller J-C., “Électricité photovoltaïque – Filière et marché”, Les Techniques de l'Ingénieur, Ref. BE8579, Janvier 2007.
- Nael R., Cozian G., Cadiou L., Drillet P., “Centrale de production hybride”, La Revue 3EI, No 46, pp. 41-46.
- Ricaud A. et Lokhat I., “La maison Z.E.N.”, La Revue 3EI, No 69, pp. 7-11, Janvier 2012.
- Roussel J-M., “Système photovoltaïque autonome ou couplé au réseau. Approche pédagogique sous PSIM”, La revue 3EI, No 48, pp. 48-57, Juin 2010.
- Roussel J-M. et Aubry T., “Développement d'un modèle de panneau photovoltaïque sous PSIM”, La revue 3EI, No 69, pp. 61-86, Juillet 2012.
- Serres J., Dubois P., Jaunay C., et Escolano S., “Réseau électrique haute qualité”, La Revue 3EI, No 58, pp. 20-26, Juin 2009.