



Accepted Manuscript

Etude Didactique des Systèmes Photovoltaïques :
Optimisation Thermique et Electrique

Cédric Jaouen, Erik Lacombe, Olivier Béthoux, Jean-Paul Kleider

DOI:

Publisher: SEE

To appear in: **La Revue 3EI**

Date of Publication: Mars 2008 (volume 52)

Please cite this article as: Cédric Jaouen, Erik Lacombe, Olivier Béthoux, Jean-Paul Kleider, Etude Didactique des Systèmes Photovoltaïques : Optimisation Thermique et Electrique, La Revue 3EI, volume 52, pages 59-71, Mars 2008.

SEE Cercle Thématique 13.01, ISSN 1252-770X

<http://www.see.asso.fr>

Document Version: Early version, also known as pre-print

This is a PDF file of an unedited manuscript that has been accepted for publication. As a service to our customers we are providing this early version of the manuscript. The manuscript will undergo copyediting, typesetting, and review of the resulting proof before it is published in its final form. Please note that during the production process errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.



ETUDE DIDACTIQUE DES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUE OPTIMISATION THERMIQUE ET ELECTRIQUE

Cédric Jaouen^①, Erik Lacombe^②, Olivier Béthoux^②, Jean-Paul Kleider^①

① Laboratoire de Génie Électrique de Paris, CNRS UMR8507; SUPELEC; Univ Paris-Sud; UPMC Univ. Paris 06 ;
11 rue Joliot-Curie, Plateau de Moulon, F-91192 Gif-sur-Yvette Cedex, France

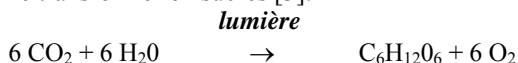
② Ecole Normale Supérieure de Cachan, département E.E.A.
cedric.jaouen@ens-cachan.fr ; erik.lacombe@ens-cachan.fr ;
olivier.bethoux@lgep.supelec.fr ; jean-paul.kleider@lgep.supelec.fr

Résumé : Les travaux de synthèse des experts internationaux du G.I.E.C. ont validé la thèse d'une influence prépondérante de l'homme sur l'évolution rapide du climat ainsi que la diminution importante de la biodiversité et ceci depuis l'ère industrielle (1850 à nos jours). Ces constats et l'esquisse de scénarios d'évitement de crise ont été largement repris et médiatisés par l'ancien vice président américain Al Gore (Co-prix Nobel de la paix 2007 avec le groupe d'experts du GIEC). Il s'ensuit un intérêt croissant du public pour les moyens de développement les moins agressifs pour notre environnement. Nos étudiants, comme la plupart des jeunes adultes, sont particulièrement motivés pour participer à cette mutation et souhaitent pouvoir contribuer à l'essor des énergies renouvelables [1].

Dans cet article, nous nous centrons sur la compréhension et l'optimisation d'une conversion noble (en termes d'entropie) : le passage de l'énergie lumineuse à l'énergie électrique. Cet article souhaite apporter une proposition d'enseignement adaptée à des étudiants de Génie Electrique (I.U.T. et Ecoles d'Ingénieurs). Il s'agit d'aborder les phénomènes physiques mis en jeu dans les convertisseurs photoélectriques. Cette présentation vise à éclairer les développements futurs. Dans un premier temps, elle sera validée expérimentalement sur deux technologies courantes de panneaux grâce à des mesures simples et reproductibles réalisées en laboratoire. De cette description physique et de ce constat expérimental découleront deux approches systèmes complémentaires. L'une nous conduira à envisager la cogénération et à en quantifier les avantages. L'autre portera sur le choix argumenté des paramètres d'un système d'adaptation du panneau à sa charge électrique alimentée.

1 Le soleil dans le « panel énergétique » : une ardente nécessité ?

Les sources d'énergie nous paraissent nombreuses mais à l'échelle humaine peu d'entre elles sont renouvelables. Un bilan énergétique terrestre nous rappelle que le soleil est responsable de 99,97 % de l'apport en énergie de notre planète, le reste provenant de la fusion du noyau terrestre ainsi que de l'interaction gravitationnelle Terre – Lune - Soleil [2]. Bien évidemment, à la surface de notre écorce terrestre, cette énergie solaire est utilisée sous des formes très variées. Parmi celles-ci, citons la photosynthèse qui permet aux plantes de se construire en captant le dioxyde de carbone (CO₂) contenu dans l'air pour le transformer en sucres [3].



Outre la biomasse si fondamentale pour les autres formes de vie, citons également les vents, les courants marins, le cycle de l'eau, ... qui sont issus des déséquilibres thermiques de la répartition de la chaleur apportée par le soleil. Notons également que la terre a connu depuis ses origines (4,5 milliards d'années) de grandes variations climatiques et atmosphériques. Certaines périodes ont en particulier été particulièrement propices à l'enfouissement rapide d'importantes masses végétales. Il y a 320 millions d'années (Carbonifère), le rapide enfouissement des grandes forêts de cette ère a conduit à la formation d'importants stocks de charbon. Plus près de nous (Crétacé supérieur – il y a environ 80 millions d'années), une importante activité volcanique a produit un important réchauffement climatique ; l'élévation du

niveau marin (200 à 300 mètres) qui engendra un rapide enfouissement organique dans les sédiments marins. Cette séquestration du carbone s'est opérée dans des conditions favorables à la création d'importantes nappes de pétrole et de gaz, que nous exploitons depuis un siècle. Insistons sur le fait que ces périodes de séquestrations du carbone sont particulièrement importantes car elles ont modifié la composition de l'atmosphère terrestre sur des échelles de temps géologiques (centaines de milliers d'années) en réduisant la concentration en dioxyde de carbone et en créant les conditions de vie actuelles [4]. L'un de ces paramètres (corrélé à tant d'autres) est la température moyenne du globe terrestre (environ 15 °C depuis des centaines de milliers d'années). L'utilisation à grande échelle des ressources en hydrocarbures (charbon, pétroles conventionnels ou non, gaz naturel (méthane)) pose bien sûr le problème de l'épuisement de la ressource mais à l'échelle au moins d'un siècle car les réserves prouvées en charbon sont encore abondantes et les ressources pétrolières difficiles d'accès sont encore peu exploitées mais importantes [5]. Or, bien avant cette perspective lointaine de changement d'approvisionnement en énergie, se pose la délicate mais urgente question de l'interaction de ce mode de consommation avec le climat ; le dioxyde de carbone, puissant gaz à effet de serre, est en effet un acteur majeur du système thermique terrestre [6]. Il paraît donc intéressant, voire vital pour les générations à venir, de ne pas épuiser en quelques siècles le stock d'hydrocarbures qui a mis plusieurs centaines de millions d'années à se constituer. Dans cette perspective, il convient de réorienter les approvisionnements d'énergie vers des technologies peu émettrices de gaz à effet de serre comme la biomasse, l'éolien, l'hydraulique, l'énergie de la houle et bien entendu les convertisseurs directs de l'énergie so-

laire. Cette dernière solution (valorisation directe de l'énergie solaire) est très séduisante. En effet, la surface de toiture, voire de mur est d'ores et déjà très importante. Elle pourrait donc être mise à profit sans nouvelle emprise au sol et en assurant une production localisée. Ceci limiterait les pertes de transport et responsabiliserait le consommateur devenu producteur. Ces perspectives paraissent a priori prometteuses. Il va néanmoins être très difficile de convaincre une humanité nombreuse (6,7 milliards en janvier 2008 et une prévision d'environ 9 milliards pour l'année 2050 [7]) et énergivore (11 435 millions de tonnes-équivalent-pétrole d'énergie primaire en 2005 sachant qu'une T.E.P. correspond à 41,6 GJ [8]) de ne pas utiliser une ressource (les hydrocarbures) encore très abondante et très facile d'emploi pour se tourner vers une source d'énergie diffuse et intermittente (conditions météorologiques et cycles journalier et saisonnier). Cette moyenne d'environ 1,7 T.E.P. par habitant ne doit pas cacher d'énormes disparités régionales. Rappelons que si nous généralisons à l'humanité la consommation moyenne d'un européen (chose qu'espèrent tout à la fois américains du nord et chinois ou indiens pour des raisons diamétralement opposées), nous aurions une consommation mondiale environ doublée !

Un seul chiffre comparatif permet d'illustrer ce nouveau défi énergétique. Un litre d'essence (soit 0,83 kg) a un pouvoir calorifique de 34,8 MJ. A titre de comparaison, les stations réparties sur le territoire français pour la mesure de l'éclairement solaire global permettent d'annoncer un ordre de grandeur de 1500 kWh par m² de surface horizontale et par an. En moyenne, et sans tenir compte du rendement énergétique de conversion, un m² de territoire hexagonal produira potentiellement en un an 5400 MJ soit l'équivalent de 155 litres d'essence. Et en prenant en compte, un rendement énergétique du panneau de 15 %, on obtient in fine 23,25 litres d'essence. On voit donc que c'est l'ensemble de la filière énergétique qui est à restructurer et que la pénétration des énergies renouvelables est fortement couplée à l'existence d'appareils à hautes performances énergétiques.

Nous voyons également, et c'est l'objet de cette étude, que la filière solaire doit optimiser ses performances dans le double but de s'implanter sur les meilleures surfaces bâties et d'obtenir une bonne acceptation sociale. C'est dans cette optique de rationalisation des espaces et de perspectives nouvelles et encourageantes que nous présentons les convertisseurs directs de l'énergie solaire en insistant sur leur éventuelle association harmonieuse.

Le second élément primordial pour un essor significatif des énergies renouvelables est bien entendu l'association à des moyens de stockage performants car si le litre d'essence précité résout intrinsèquement les deux termes de l'équation énergétique (énergie stockée et puissance disponible), ni le solaire, ni l'éolien ne peuvent prétendre à une continuité de service sans organe de stockage auxiliaire [9] [10].

Le présent article se focalisera sur la conversion photovoltaïque. Une première partie détaille les principes

physiques de cette conversion afin d'éclairer les paramètres d'optimisation de la structure de conversion s'appuyant sur cette source primaire. La deuxième partie est donc consacrée à la caractérisation du panneau afin de montrer l'influence de la température, ce qui conduira tout naturellement à envisager l'idée de cogénération. Des données expérimentales seront analysées. La troisième partie de l'exposé traite des paramètres à prendre en compte lors de la réalisation de l'adaptation du panneau à sa charge électrique. La réalisation expérimentale sera détaillée.

Une conclusion reprendra ces différents éléments en insistant sur leur portée pédagogique. Des perspectives d'enrichissement de cette pratique didactique seront également dessinées.

2 Caractérisation expérimentale d'un panneau photovoltaïque.

2.1 But de cette caractérisation :

L'expérience de caractérisation (figure 1) que nous proposons aux étudiants a deux buts. Le premier consiste à introduire la nécessité de placer, en aval du panneau, un dispositif d'adaptation d'impédance permettant de placer le panneau à son point de rendement maximal. Pour cela, on relève expérimentalement la caractéristique $I = I(V)$ en maintenant la température la plus constante possible. Le second objectif est de quantifier l'influence de la température sur le rendement des panneaux solaires. Pour cela, nous allons, pour un flux incident connu, faire varier uniquement la température du panneau. Cette mesure débouchera sur une discussion sur la cogénération.

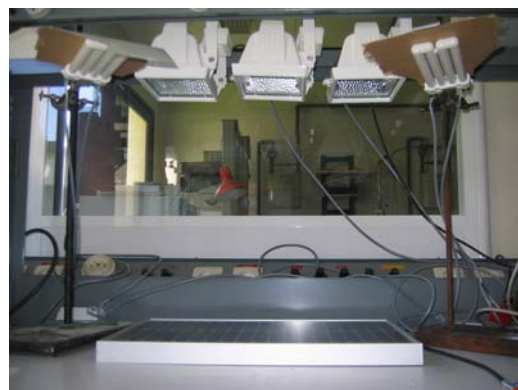


Figure 1 : Dispositif envisagé

2.2 Choix de la technologie du panneau :

Les panneaux photovoltaïques d'utilisation courante sont en silicium et réalisés en technologie cristalline (c : Si) ou amorphe (a : Si) (dépôt en couches minces) [11].

Les technologies cristallines sont issues du savoir-faire de l'industrie des composants électroniques. Ce sont donc des technologies assez matures. Elles sont basées

sur la fonte à haute température de silicium pur puis sur son refroidissement lent permettant d'obtenir soit un monocristal (refroidissement très lent) soit un polycristal constitué de cristaux plus petits. L'énergie requise pour créer les premiers est plus importante mais conduit à des cellules à meilleur rendement : le ratio énergie électrique produite sur énergie solaire incidente dépend des conditions d'utilisation et ne dépasse guère 20 % dans un cas et 15 % dans l'autre.

Les technologies amorphes, plus récentes, sont quant à elles en phase de maturation. Elles sont basées sur le dépôt sur un verre transparent (substrat) de trois couches de silicium (couche P, couche intrinsèque et couche N). L'épaisseur typique des zones dopées est de 10 nm, celle de la zone intrinsèque est d'environ 300 nm. Cette technologie présente des rendements plus faibles (7 à 10%) mais nécessite, pour le procédé de fabrication, un apport énergétique moindre et un nombre réduit d'étapes dans le processus de réalisation.

Quelle que soit la technologie, le retour énergétique d'un panneau placé sous nos latitudes est estimé de 2 à 4 années. Du point de vue de l'utilisateur, le critère de choix d'une technologie sera donc plus lié à la surface disponible pour générer la puissance électrique voulue. Pour notre part, nous disposons de deux types de panneaux. Le premier (fabriqué par Hélios Technology) est un panneau photovoltaïque en silicium monocristallin reconnaissable par son reflet uniforme et à dominante bleu-gris (figure 2). Sur la photo, on distingue les cellules : 38 fines tranches découpées dans le lingot de silicium ; elles sont disposées sur un cadre en aluminium et électriquement connectées en série par les fils apparents. La caractéristique électrique du panneau (tension à vide = 20,50 V) prouve que toutes les cellules sont placées en série : $20,50 \text{ V} / 38 = 0,54 \text{ V}$ est bien la tension à vide que l'on peut espérer aux bornes d'une cellule unique en silicium cristallin.



Longueur	524 mm
Largeur	325 mm
Surface	0,17 m ²
Conditions de caractérisation T = 25 °C Flux lumineux : 1000 W / m ² et AM 1,5	
V _{circuit ouvert}	20,50 V
I _{court-circuit}	1,36 A
P _{max}	20 W
V _{Pmax}	16,50 V
I _{Pmax}	1,27 A
I _{12,5 volts}	1,21 A

Figure 2 : panneau monocristallin

Le second panneau, de la société Solems, est de technologie amorphe reconnaissable à son reflet marron. Cette fois-ci, le processus de fabrication crée initialement une cellule unique sur un substrat en verre qui sert d'interface avec le flux lumineux incident. Pour créer

une tension plus élevée, adaptée aux applications usuelles de charge batterie, on crée par rayures des cellules plus petites que l'on connecte en série. Sur la photo (figure 3), on les distingue nettement.



Longueur	674 mm
Largeur	312 mm
Surface	0,210 m ²
Conditions de caractérisation T = 25 °C Flux lumineux : 1000 W / m ² et AM 1,5	
V _{circuit ouvert}	23,00 V
I _{court-circuit}	0,74 A
P _{max}	10 W
V _{Pmax}	17,50 V
I _{Pmax}	0,58 A
I _{12,5 volts}	NC

Figure 3 : panneau amorphe

Ces deux photos permettent de percevoir l'intérêt porté à la technologie couches minces depuis la découverte de leurs propriétés photovoltaïques (USA, 1975). En effet, s'appuyant sur le savoir-faire développé pour la réalisation des écrans plats, les industriels des couches minces sont capables de réaliser des cellules plus minces (d'un facteur 1000) et de surface très large en comparaison avec les techniques cristallines : en 2008, certaines installations industrielles créent en série des cellules de l'ordre du m². Sur la photo, on discerne bien que notre panneau amorphe est uniquement constitué de deux cellules-plan initiales (95 875 mm²). Un travail important et toujours d'actualité consiste à améliorer les performances en terme de rendement électrique. A contrario, le panneau cristallin est constitué de petites cellules (3 240 mm²) obtenues par sciage du lingot initial et engendrant donc des pertes de matière à la fabrication. Par ailleurs, on distingue bien que l'assemblage contribue à une importante perte de surface active (silicium) par rapport à la surface nécessaire à l'installation (cadre).

2.3 Choix de la technologie de l'éclairage

Les panneaux photovoltaïques sont conçus pour être utilisés à l'extérieur. Néanmoins, leur caractérisation est difficile dans ces conditions qui peuvent être très changeantes. Par ailleurs, il est alors également difficile de décorrélérer température du panneau et éclairage. C'est la raison pour laquelle nous avons opté pour une source d'éclairage artificiel dont le spectre utile ne s'éloigne pas trop de celui du soleil. Rappelons que le panneau monocristallin a une zone de sensibilité de 0 à 1100 nm (proche IR) alors que le panneau amorphe a la sienne de 0 à 750 nm (fin du visible et début de l'IR).

Aussi, avons-nous relevé le spectre de rayonnement du soleil en région parisienne ainsi que le spectre de lampes halogènes d'une part et fluo-compactes d'autre part. L'appareil de mesure est un spectroscope (Ulice Spid - HR) analysant la lumière dans la bande

[350 nm ; 850 nm] centrée autour du visible [380 nm ; 720 nm]. Cette analyse se fait au moyen de diodes photosensibles spécialisées dans une bande étroite de longueurs d'onde. Avant d'atteindre ces multiples capteurs, le rayon lumineux incident est donc diffracté au moyen d'un réseau miroir.

Cette mesure (faite au milieu d'une journée d'avril et par temps clair) nous donne un spectre solaire bien étalé et centré autour de 550 nm qui est la zone de plus haute sensibilité de l'œil humain (figure 5). On retrouve là l'influence de l'atmosphère sur le spectre solaire initial qui étale le maximum de puissance sur une plus grande plage de longueur d'onde et le décale un peu vers les infra-rouges. Notons dès à présent que cette mesure est relative et que nous devons faire intervenir un autre moyen de mesure pour réaliser nos bilans énergétiques.

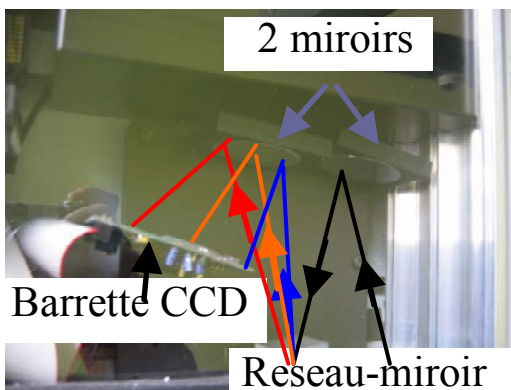


Figure 4 : Spectromètre – principe de la mesure

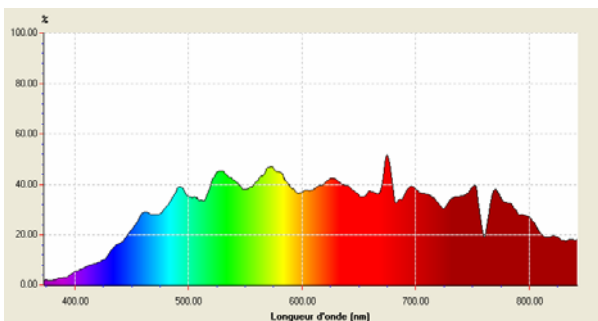


Figure 5 : Spectre solaire à mi-journée et par temps clair en région parisienne (avril 2007)

La lampe halogène est une ampoule comportant un filament de tungstène parcouru par un courant ainsi que des gaz halogènes. L'effet Joule porte le filament à température élevée ; il émet donc un rayonnement électromagnétique. La température d'une lampe halogène est de l'ordre de 3000 K ce qui correspond à un pic d'émission dans le proche infrarouge ($\lambda_{pic} = 965$ nm par la loi de déplacement de Wien [12]). C'est bien ce phénomène que le spectroscope utilisé révèle lors de l'analyse du flux lumineux émis par la lampe (figure 6-a). Le pic d'irradiance se situe néanmoins à une longueur d'onde inférieure à celle prévue ($\lambda_{pic} = 770$ nm)

Cette grande quantité d'ondes infrarouges, sources d'échauffements importants, nous a amené à explorer

l'éclairage par lampe à décharge. La lampe fluorescente est d'emploi courant et voit un courant électrique circuler dans un gaz ionisé (vapeur de mercure) : ceci produit une émission dans l'ultraviolet qui est absorbée par des poudres fluorescentes puis restituée par elles sous forme de lumière visible. Hélas, comme nous le constatons sur le relevé expérimental (figure 6-b), les bandes de réémissions sont très étroites ; on en remarque ici trois principales : 430 nm, 540 nm et 610 nm. Ce spectre discontinu est, bien plus que le précédent, éloigné d'un simulateur solaire et nous ne l'exploiterons pas.

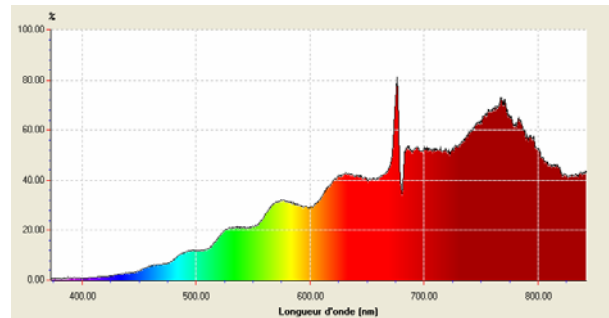


Fig 6-a : lampe halogène

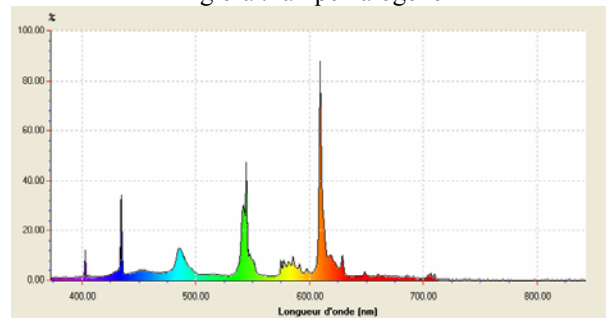


Fig 6-b : lampe fluo-compacte

Figure 6 : Analyse des lumières artificielles utilisables

Nous allons donc devoir nous contenter des lampes halogènes tout en améliorant leur connaissance en prolongeant la première mesure (centrée autour du domaine du visible) par une mesure dans les infrarouges. En effet, le spectre de sensibilité des cellules solaires en silicium cristallin se prolonge jusqu'aux environs de 1100 nm. D'autre part, les lampes à incandescence ont un spectre important dans l'infrarouge source non négligeable d'énergie, convertible en électricité ($\lambda < 1100$ nm) ou bien en chaleur ($\lambda > 1100$ nm). Pour cela, nous utilisons un appareil disponible à l'I.E.F. (laboratoire de recherche de l'Université Paris Sud) et destiné à l'étude des lasers ; il permet une analyse des rayons lumineux dans la gamme, 750 – 1800 nm. Cet appareil (Ando AQ6317), comme le précédent, donne une courbe relative. Les deux appareils ayant une zone de recouvrement dans le proche infrarouge, nous l'avons mise à profit pour raccorder les deux mesures afin d'obtenir une courbe d'émission spectrale s'étalant de 350 nm à 1750 nm et couvrant donc bien la zone principale d'émission de la source adoptée (lampe à incandescence).

La dernière étape consiste à transformer ce spectre relatif en émittance énergétique monochromatique ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$). Il va donc falloir quantifier un point de la courbe précédente puis obtenir les autres par une règle de proportionnalité. Pour cela, nous avons utilisé un filtre optique très sélectif ($\Delta\lambda = 10 \text{ nm}$) centré autour de la longueur d'onde ($\lambda_0 = 710 \text{ nm}$) avec une atténuation de $G_{BP} = 55 \%$ dans la bande passante. Nous l'avons associé à une photodiode (S1336), de surface active connue ($1,2 \text{ mm}^2$) et de réponse spectrale parfaitement étalonnée. Dans la bande passante du filtre, la photosensibilité de la photodiode est de $G_{PD}(\lambda_0) = 0,38 \text{ A/W}$. En mesurant son courant de court-circuit sous lumière incidente filtrée ($I_{CC} = 1 \mu\text{A}$), nous en déduisons donc la puissance incidente : $p(\lambda_0, \Delta\lambda) = 4,8 \mu\text{W}$ pour $1,2 \text{ mm}^2$ et 10 nm . Ce qui signifie qu'à la longueur d'onde λ_0 , l'émittance énergétique spectrale est : $E(\lambda_0) = 363 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$.

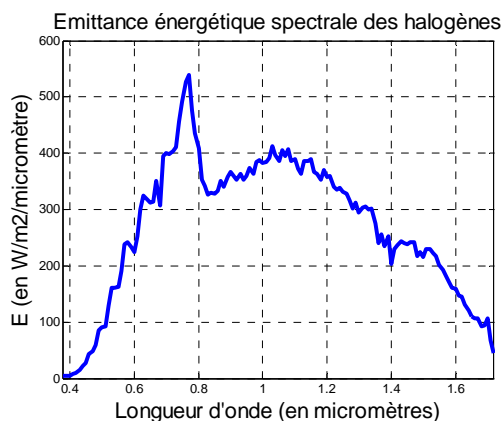


Figure 7 : Spectre prolongé [350 - 1750 nm] (halogène)

Nous venons de présenter les deux acteurs (source et récepteur) de notre caractérisation des cellules photovoltaïques. Nous allons donc maintenant décrire le dispositif expérimental les mettant en jeu et analyser les résultats obtenus.

2.4 Caractérisation du panneau et validation du modèle

2.4.1. Protocole expérimental adopté :

Nous proposons de placer chaque panneau sous une rampe d'éclairage à lampes halogènes dont on contrôle le flux lumineux par un auto-transformateur. Le panneau alimente un rhéostat dont on mesure les grandeurs électriques tension (V_p) et courant (I_p). Par ailleurs, nous instrumentons le panneau avec un thermocouple indiquant la température au plus près du silicium (T_{Si}). Cette série de mesures nous permet de tracer des réseaux $I = I(V)$ à température constante et d'en déduire les réseaux $P = P(V)$ à T_{Si} donnée. Compte-tenu du fort échauffement procuré par les halogènes (puissance spectrale importante dans l'infrarouge), cette mesure doit être réalisée par éclairage intermittent ; la durée d'exposition aux halogènes conditionne la température.

Nous avons ainsi réalisé, pour chaque panneau, quatre séries de mesures allant d'une température ($T_{Si})_{min} = 28^\circ\text{C}$ proche de la température ambiante de la salle à ($T_{Si})_{max} = 60^\circ\text{C}$ totalement crédible pour un panneau exposé au soleil. La valeur typique de la température de fonctionnement réel va de 50°C à 100°C en fonction des conditions climatiques et d'installation ; cette température est en particulier fortement liée à la ventilation du site [11]. Les températures intermédiaires de caractérisation sont ($T_{Si})_{int1} = 38^\circ\text{C}$ et ($T_{Si})_{int2} = 48^\circ\text{C}$.

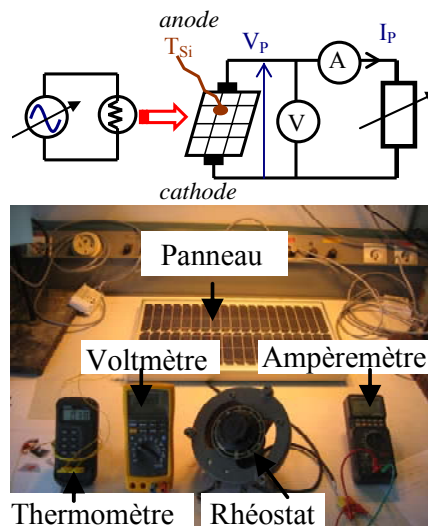


Figure 8 : Dispositif expérimental de caractérisation des deux panneaux solaires

2.4.2. Panneau en silicium monocristallin :

La figure 9 synthétise la caractéristique électrique du panneau monocristallin pour un éclairage donné. Les différentes courbes correspondent à quatre températures contrôlées différentes.

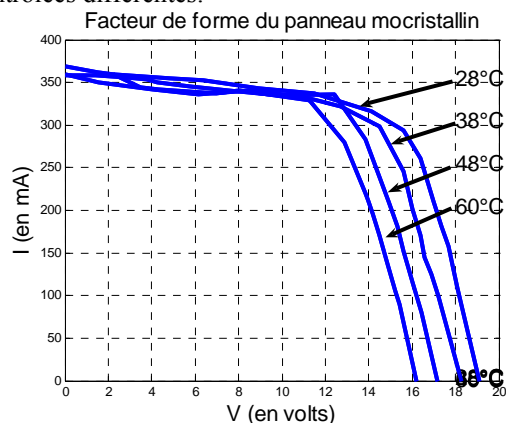


Figure 9 : Réseaux $I = I(V)$ paramétrés par T_{Si}

A température T_{Si} donnée, la caractéristique $I = I(V)$ fait bien apparaître deux zones. A faible tension, on observe une zone à courant sensiblement constant. Il s'agit du photo-courant I_{ph} créé par la dissociation de paires électron / trou sous le double effet de l'interaction avec le photon incident ($\lambda < \lambda_{coupure}$) et de la barrière de potentiel

qui favorise la collecte par les électrodes avant recombinaison. Pour ces faibles tensions (ici $V_p < 10$ V), le courant I_D de diffusion des majoritaires reste négligeable car la barrière de potentiel est encore suffisante. En revanche, passé ce seuil de tension, nous observons une chute brutale du courant $I_p = I_{ph} - I_D$ délivré par le panneau (jusqu'à son annulation) lié à l'évolution exponentielle I_D sous l'effet d'une différence de potentielle V_p appliquée, par la charge, aux électrodes. Rappelons que la théorie des semi-conducteurs donne pour le courant d'un panneau la relation [13] :

$$I_p = I_{ph} - I_s(T_{Si}) \left\{ \exp \left(\frac{q V_p}{n k T_{Si}} \right) - 1 \right\} \quad (1)$$

Où n est le nombre de cellules mises en série (ici $n = 38$) ;
 $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K est la constante de Boltzman ;
 $q = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C est la charge de l'électron.

On remarque (tableau 1) que le photo-courant $I_{ph} \approx I(V=0) = (I_p)_{CC}$ est, en première approximation, insensible à la variation de température T_{Si} .

En revanche, comme le montre l'expression (1), la tension de seuil est fortement dépendante de la température T_{Si} . La tension à vide V_{p0} ($V_{p0} \Leftrightarrow I_p = 0$) est donc elle aussi fortement corrélée à la température. Elle diminue rapidement avec elle (tableau 1) : on constate une diminution de 2,8 V pour une température passant de 28°C à 60°C ; soit -90 mV/°C. En effet, pour $V_p = V_{p0}$, on peut négliger 1 devant le terme exponentiel et, on a, en tenant compte du courant de saturation [14] :

$$I_{ph} = C \cdot T_{Si}^3 \cdot \exp \left(- \frac{E_g}{k T_{Si}} \right) \cdot \exp \left(\frac{q V_{p0}}{n k T_{Si}} \right) = C \cdot T_{Si}^3 \cdot \exp \left(\frac{q V_{p0} - E_g}{k T_{Si}} \right)$$

Où E_g est l'énergie de bande interdite du semi-conducteur. Dans le cas du silicium cristallin elle est de l'ordre de $E_g \approx 1,1$ eV (1,17 eV à 0 K et 1,12 eV à 300 K). Quant à (V_{p0}/n) , il est de l'ordre de 0,55 V pour ce panneau. Le courant I_{ph} étant quasi insensible à la température et le terme exponentiel étant prépondérant, une augmentation de la température entraîne donc une diminution de (V_{p0}/n) pour qu'en valeur absolue, le terme $((V_{p0}/n) - E_g)$ augmente. Par dérivation de $\ln(I_{ph})$ par rapport à la température, on a :

$$0 = \frac{3}{T_{Si}} - \frac{q V_{p0} - E_g}{n k T_{Si}^2} + \frac{\frac{\partial q V_{p0}}{\partial T_{Si}} - \frac{\partial E_g}{\partial T_{Si}}}{k T_{Si}}$$

Comme le terme $(k T_{Si}/q)$ est de l'ordre de 26 mV à 25°C, le premier terme de l'expression est négligeable devant le deuxième. Ce qui conduit à :

$$\frac{\frac{\partial q V_{p0}}{\partial T_{Si}}}{n} - \frac{\partial E_g}{\partial T_{Si}} = \frac{q V_{p0} - E_g}{T_{Si}}$$

Or, la barrière de potentiel (E_g/q) dépend peu de la température. Elle varie typiquement de $-0,2$ mV/°C. On a donc :

$$\frac{\partial \frac{V_{p0}}{n}}{\partial T_{Si}} = \frac{V_{p0} - E_g}{n T_{Si} q} \approx \frac{-0,55 \text{ V}}{320 \text{ K}} = -1,72 \text{ mV/°C}$$

Ce qui, ramené à 38 cellules en série, donne -65 mV/°C ce qui est du même ordre de grandeur que notre résultat pratique (-90 mV/°C).

Par ailleurs, notons qu'à éclairement donné, les seules connaissances du courant de court-circuit, de la tension à vide et de la température permettent d'établir le modèle statique du panneau. Comme le propose [15], ce dernier est facilement implantable dans l'environnement Matlab/Simulink. Ceci peut permettre de conduire des simulations avant implantation d'une commande MPPT. Pour notre part, la courbe produite à partir des seules informations précédentes correspond assez précisément aux mesures effectuées sur toute la plage de fonctionnement.

	$T_{Si} = 28$ °C	$T_{Si} = 38$ °C	$T_{Si} = 48$ °C	$T_{Si} = 60$ °C
$(I_p)_{CC}$	360 mA	360 mA	358 mA	365 mA
$(V_p)_0$	19,1 V	18,26 V	17,16 V	16,22 V
P_{max}	4,6 W	4,3 W	4,15 W	3,7 W
$(V_p)_{Pmax}$	15,6 V	14,5 V	12,4 V	11,25 V
$(V_p)_{Pmax} / (V_p)_0$	81,7 %	79,4 %	72,3 %	69,4 %

Tableau 1 : quelques mesures du panneau monocristallin sous halogène

Du point de vue de l'utilisateur, un élément important est la puissance qu'il peut prélever avec une charge donnée et sous un éclairement et une température fixés. Pour cela, des caractéristiques du panneau, on déduit le transfert de puissance vers la charge (figure 10). Il s'agit de l'aire décrite par le point de fonctionnement (I_p, V_p) . Cette puissance est nulle pour $(V_p = 0)$ et pour $(V_{p0} \Leftrightarrow I_p = 0)$. Elle passe par un maximum P_{max} qui, pour cet essai, se situe autour de 75 % de la tension à vide V_{p0} (tableau 1). Bien évidemment, la tension V_{pmax} diminuant avec l'augmentation de température, on observe, une réduction significative de la puissance maximale disponible en sortie de panneau : $-19,5$ % lors du passage de la température ambiante (28 °C) à la température de 60°C, soit $-0,61$ % par °C. Cette diminution de la puissance crête est conforme aux ordres de grandeurs évoqués dans la littérature : $-0,4$ % par °C [11]. L'écart peut venir d'une imprécision de la mesure de température par suite d'un positionnement de la sonde de température pas optimal par rapport au silicium.

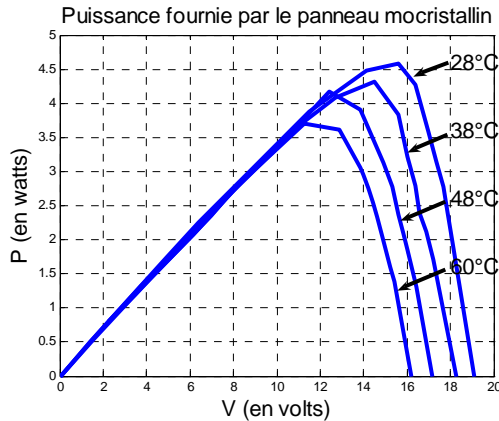


Figure 10 : réseaux $P = P(V)$ paramétrés par T_{Si}

Le dernier point à explorer est le rendement électrique, c'est-à-dire le rapport entre la puissance électrique maximale disponible et la puissance lumineuse incidente. Dans notre cas, il faut être très prudent car l'éclairage procuré par la rampe d'halogènes ne s'avère pas du tout homogène. En plaçant la diode calibrée à différents points d'un maillage du panneau (figure 11), nous constatons une puissance incidente fortement variable autour d'une valeur moyenne de $P_{moy} = 360 \text{ W/m}^2$. Nous avons vu précédemment que le panneau possédant 38 cellules élémentaires et présentant une tension à vide d'environ $20 \text{ V} \approx 38 \cdot (0,53) \text{ V}$ a donc une connexion exclusivement série de ses cellules. Nous en déduisons que le courant en sortie de panneau I_p est imposé par la cellule la moins éclairée (valeur minimale de $P_{min} = 250 \text{ W/m}^2$). Si nous souhaitons comparer ce rendement à celui proposé par le constructeur avec un éclairage solaire uniforme de 1000 W/m^2 , il nous faut donc adopter comme puissance incidente de référence la puissance surfacique minimum ; ici, il s'agit de 250 W/m^2 . Ce qui donne une puissance incidente de $(0,170 \text{ m}^2) \cdot (250 \text{ W/m}^2) = 42,5 \text{ W}$. D'où le rendement électrique constaté à $T_{Si} = 28 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$\eta_{\text{constaté}} = \frac{(P_{\text{élec}})_{\text{max}}}{P_{\text{lu min euse}}} \approx \frac{(P_{\text{élec}})}{(P_{\text{lu min euse}})_{\text{min}}} = \frac{4,6 \text{ W}}{42,5 \text{ W}} = 10,8\%$$

Alors que le rendement constructeur à $25 \text{ }^\circ\text{C}$ et sous « un soleil » (AM 1,5) est de :

$$\eta_{\text{constructeur}} = \frac{(P_{\text{élec}})_{\text{max}}}{P_{\text{lu min euse}}} = \frac{20 \text{ W}}{170 \text{ W}} = 11,8\%$$

Ce rendement constructeur peut paraître faible par rapport au rendement couramment admis pour une cellule monocristalline (15 % à 20 %). Mais nous devons remarquer que sur le panneau, une grande partie (72 %) de la surface n'est pas couverte de silicium. ($0,123 \text{ m}^2$ de silicium pour $0,170 \text{ m}^2$). Ce point expérimental est important car il permet de mettre l'accent sur les difficultés d'implantation des panneaux solaires. Les zones d'ombres sont bien entendu à éviter. Mais si elles existent à certaines saisons et heures du jour, ou si elles apparaissent suite à une modification du site, leur impact sur l'installation ne sera pas le même sur les performan-

ces globales selon que les panneaux seront associés en série ou en parallèle. En parallèle, il faut simplement éviter par une diode anti-retour d'alimenter le panneau le moins éclairé par le panneau qui l'est le plus. En série, en revanche, il faut prévoir des diodes de contournement d'un ensemble de cellules si on ne veut pas perdre toute la puissance dans le cas où une cellule se trouvant à l'ombre imposerait un courant quasi-nul à l'ensemble en série. Cette technique permet d'éviter une puissance nulle en sortie de l'ensemble mais ne peut rien, dans notre cas par exemple, contre la pénalisation de puissance due à un alignement des courants sur la cellule la moins éclairée.

Par ailleurs, concernant la différence entre le rendement constaté sous halogènes et celui donné sous AM 1,5, nous la justifions par la différence des spectres incidents. En effet, la lumière issue des halogènes génère un flux de photons très important dans l'infrarouge et cela bien au-delà de la sélectivité du filtre constitué par le panneau en silicium. (cf § 3 et figure 14)

Le taux de photons dont l'énergie est convertible sous forme électrique est ainsi plus important avec la lumière solaire naturelle qu'avec la lumière artificielle adoptée.

Cet élément de compréhension est important pour comprendre que le couple soleil / terre est fortement lié à la couche atmosphérique. Le spectre incident dépend non seulement de la couverture nuageuse mais encore de l'épaisseur de couche atmosphérique que doivent traverser les rayons solaires. On souligne ici l'influence de la latitude, de l'heure et de la saison [16]. Selon les raies filtrées (et la technologie de panneau par sa zone de sensibilité spectrale), le rendement électrique du panneau sera plus ou moins bon.

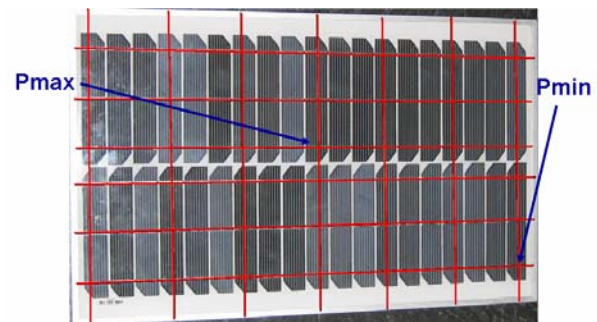


Figure 11 : hétérogénéité de l'intensité de l'éclairage reçu par le panneau

2.4.3. Panneau en silicium amorphe :

Pour le panneau en technologie amorphe, la caractéristique $I = I(V)$ paramétrée par la température T_{Si} fait également apparaître deux zones.

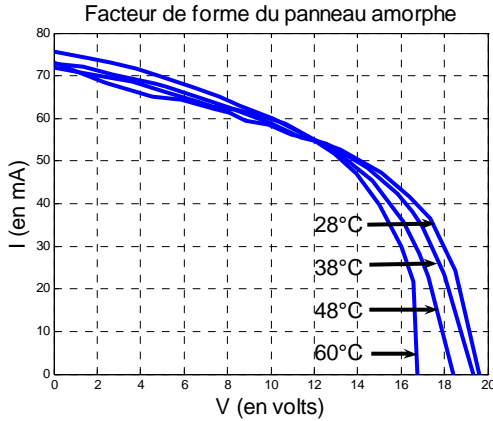


Figure 12 : réseaux $I = I(V)$ paramétrés par T_{Si}

A tension nulle (court-circuit), le courant I_p qui correspond au photocourant I_{ph} est sensiblement indépendant de la température. A faible tension, on observe ($T_{Si} = C^{ste}$) une zone à diminution linéaire du courant I_p en fonction de la tension V_p appliquée au panneau par la charge. Cette zone peut donc être représentée par une résistance R_p qui, dans notre cas, serait d'environ 670Ω . Elle s'expliquerait par deux effets, le premier intrinsèque à la cellule, le second lié à la fabrication du panneau. En effet, comme précédemment, on considère toujours le modèle :

$$I_p = I_{ph} - I_D$$

Du point de vue de I_{ph} , il est lié à la qualité du matériau et dépend de la tension V_p , car les porteurs sont créés préférentiellement dans une zone de champ électrique. Du point de vue de I_D , on doit déplorer la présence d'une composante ohmique due à la présence d'impuretés aux bords de chaque cellule. En effet, dans cette technologie (couches minces), la réalisation des cellules élémentaires s'opère en striant la cellule initiale avec un rayon laser. Malgré les précautions, de la matière sublimée se redépose sur les cellules mitoyennes à l'issue de cette opération et un traitement par lavage ne peut en venir entièrement à bout.

Enfin, au-delà d'une tension de seuil, nous observons une chute brutale du courant jusqu'à son annulation. Ce phénomène est dû à la diode PIN créée pour réaliser la photopile. Ajoutons que si cette diode, caractérisée par une structure non-cristalline, obéit aux mêmes lois de variation qu'en (1), alors, on a (largeur de bande interdite $E_g = 1,74 \text{ eV}$) :

$$\frac{\partial V_{p0}}{\partial T_{Si}} = \frac{V_{p0}}{T_{Si}} - \frac{E_g}{q} \approx \frac{(0,7 \text{ V}) - (1,74 \text{ V})}{320 \text{ K}} = \frac{-1,04 \text{ V}}{320 \text{ K}} = -3,2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$$

Or (tableau 2), nous constatons bien une plus forte sensibilité de la tension V_{p0} du panneau amorphe aux variations de température T_{Si} : $-62 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ pour le panneau entre 28°C et 48°C . Ramené à une cellule, on observe : $-2,2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$.

	$T_{Si} = 28^\circ\text{C}$	$T_{Si} = 38^\circ\text{C}$	$T_{Si} = 48^\circ\text{C}$	$T_{Si} = 60^\circ\text{C}$
$(I_p)_{CC}$	73 mA	71 mA	73 mA	75,5 mA
$(V_p)_0$	19,63 V	19,31 V	18,39 V	16,75 V
P_{max}	713 mW	702 mW	679 mW	669 mW
$(V_p)_{P_{max}}$	15,1 V	14,5 V	13,0 V	12,1 V
$(V_p)_{P_{max}} / (V_p)_0$	76,9 %	75,1 %	70,7 %	72,2 %

Tableau 2 : quelques mesures du panneau amorphe sous halogène

Des caractéristiques du panneau, on déduit, le transfert de puissance vers la charge électrique. Cette puissance passe par un maximum P_{max} qui, pour cet essai, se situe autour de 75 % de la tension à vide V_{p0} . Pour ce panneau amorphe, suite à une augmentation de température, on observe une réduction beaucoup moins significative de la puissance maximale disponible en sortie de panneau : $-6,2 \%$ lors du passage de la température ambiante (28°C) à la température de 60°C soit $-0,19 \%$ par $^\circ\text{C}$. Ceci est dû au fait que lors du déplacement du point P_{max} , la réduction de la tension $(V_p)_{opt}$ s'accompagne d'une augmentation du courant $(I_p)_{opt}$. Cette diminution de la puissance crête est très proche des ordres de grandeurs évoqués dans la littérature : $-0,15 \%$ par $^\circ\text{C}$ [11]. Comme précédemment, l'écart peut venir d'une imprécision de la mesure de température par suite d'un positionnement non optimal de la sonde de température.

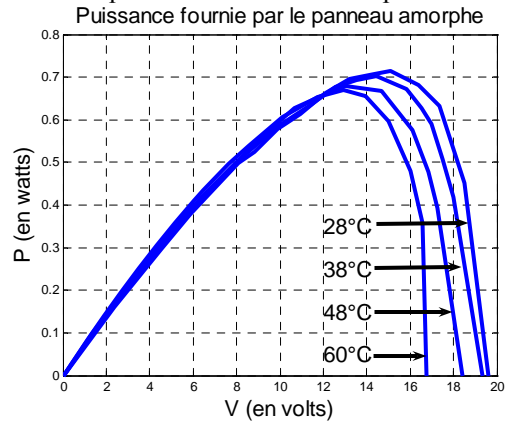


Figure 13 : réseaux $P = P(V)$ paramétrés par T_{Si}

Nous terminons cette analyse par l'étude des performances énergétiques globales du panneau. En conformité avec notre explication précédente, nous allons tenir compte de la zone pour laquelle l'intensité de l'éclairement est la plus faible. Le panneau ayant une surface active de $0,185 \text{ m}^2$ et le flux lumineux incident minimal ayant une puissance surfacique de $250 \text{ W}/\text{m}^2$, on a donc à $T_{Si} = 28^\circ\text{C}$:

$$\eta = \frac{(P_{elec})_{max}}{P_{lumineuse}} \approx \frac{(P_{elec})}{(P_{lumineuse})_{min}} = \frac{0,713 \text{ W}}{46,25 \text{ W}} = 1,5\%$$

Alors que le constructeur annonce, à 25°C et sous « un soleil » (AM 1,5) un rendement maximum de :

$$\eta = \frac{(P_{elec})_{max}}{P_{lumineuse}} = \frac{10 \text{ W}}{185 \text{ W}} = 5,4\%$$

On voit que le rendement mesuré sur ce panneau est très inférieur à celui donné par le constructeur. Comme précédemment, nous l'expliquons par la différence entre le spectre de la lumière naturelle très riche en longueurs dans le visible alors que la lumière artificielle adoptée possède la majeure partie de son spectre dans l'infrarouge qui est inutile en terme de génération de paires électrons-trous pour une couche de silicium amorphe (cf figure 15). En effet, le panneau a : Si présente une longueur d'onde de coupure de l'ordre de $\lambda_{\text{coupure}} \approx 760 \text{ nm}$ (limite supérieure du visible) et donc ne peut pas transformer en puissance électrique une grande partie de la puissance lumineuse émise par la lampe ($\lambda_{\text{pic}} \approx 800 \text{ nm}$ et un spectre centré encore plus haut dans l'infrarouge) ce qui est nettement moins le cas pour la puissance lumineuse solaire dont le spectre après filtrage par l'atmosphère est justement centré dans le milieu du visible.

3 Cogénération thermique – électrique

Même si la lumière adoptée est imparfaite, nous venons de montrer que la conversion photo-électrique possède des rendements faibles. Ceci est dû au principe même de cette conversion. Plusieurs phénomènes viennent minorer le rendement de cette conversion : réflexion partielle de la lumière, absorption optique, recombinaison des porteurs avant de rejoindre les électrodes, etc.

Du point de vue de l'absorption optique, cette conversion est forcément partielle car seuls pourront interagir avec les électrons de valence, les photons suffisamment énergétiques. Tous les photons en dehors de la bande de sélectivité du matériau ($\lambda > \lambda_c$), n'auront qu'un effet thermique. Par ailleurs, les photons suffisamment énergétiques ($\lambda < \lambda_c$) ne pourront générer qu'une seule paire d'électrons-trous ; le reste de leur énergie $h\left(\frac{c}{\lambda} - \frac{c}{\lambda_c}\right)$

sera convertie sous forme de chaleur. On voit donc que le rendement théorique de conversion passe de 100 % pour une lumière monochromatique ($\lambda = \lambda_c$) à 0 % pour une lumière monochromatique ($\lambda \ll \lambda_c$).

$$\text{Filtre énergétique}_{\text{photons} > \text{électrons}}(\lambda) = \frac{E_{\text{gap}}}{h \frac{c}{\lambda}} = \frac{\lambda}{\lambda_{\text{coupure}}}$$

Par intégration sur toutes les longueurs d'ondes, on peut déduire la part maximale d'énergie lumineuse convertible sous forme électrique.

A titre indicatif, le rendement d'un panneau solaire, située à la limite de l'atmosphère, ne pourra pas dépasser la valeur indiquée dans le tableau 3. Pour cela, on a pris pour base le rayonnement AM0 en limite supérieure d'atmosphère (spectre solaire proche de celui d'un corps noir porté à 5770 K).

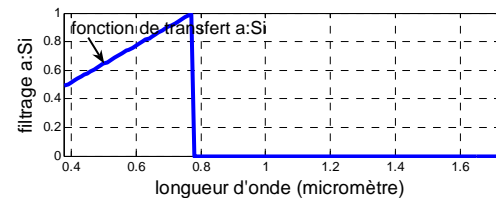
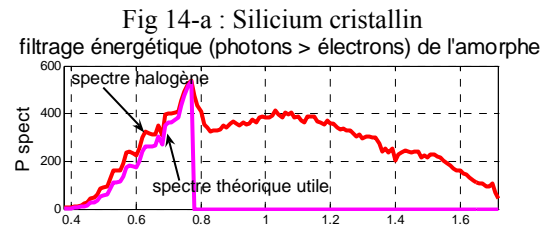
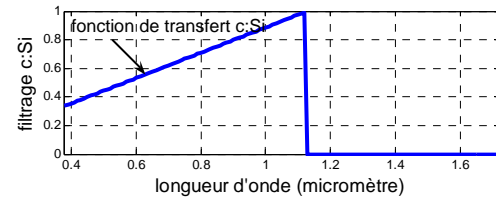
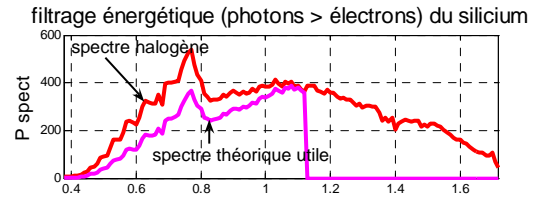


Fig 14-a : Silicium cristallin
 Fig 14-b : Silicium amorphe
 Figure 14 : Puissance spectrale potentiellement convertible en énergie électrique par du silicium Sous un rayonnement AM 0)

Matériau	$\eta_{\text{MAX théo}}$ en %
germanium	38
silicium cristallin	44
arséniure de gallium	42
silicium amorphe	38
sulfure de cadmium	20

Tableau 3 : Potentiel de conversion photo-électrique des semi-conducteurs courants (sous AM 0)

Par ailleurs, nous avons expérimenté l'importante diminution du rendement de cette conversion photo-électrique avec la montée en température du matériau, surtout dans le cas du matériau semi-conducteur massif. Ces deux constatations, rôle prédominant du thermique sur l'électrique et diminution du rendement photovoltaïque avec l'accroissement de la température, nous ont conduit à expérimenter la possibilité de coupler ces deux formes de convertisseurs d'énergie. Cette cogénération chaleur à basse température d'une part et électricité de l'autre pourrait revêtir deux avantages. Le premier d'optimiser les meilleures surfaces de toitures, le second d'éviter la dégradation du rendement électrique par fort ensoleillement grâce à une évacuation des calories vers le réservoir de chaleur du dispositif thermique. Le sur-

coût de l'installation photovoltaïque initiale ne devrait pas être très important car c'est bien le procédé de fabrication des photopiles qui est de loin le plus coûteux. Nous avons donc cherché à quantifier la part d'énergie thermique que nous pourrions retirer d'un panneau photovoltaïque en lui associant un dispositif de récupération de calories par fluide caloporteur. Nous avons réalisé notre dispositif en détournant l'armature de nos panneaux individuels ; en effet, celle-ci crée une zone creuse à l'arrière du panneau. Nous y avons donc versé une quantité connue d'eau dont nous avons mesuré l'échauffement en termes d'élévation de température et de durée de cette élévation. L'énergie thermique se calcule à partir de l'expression suivante :

$$E_{\text{therm}} = C.m.\Delta T_{\text{eau}}$$

Où C représente la capacité calorifique de l'eau et vaut $4,18.10^3 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$;
 m la masse d'eau ;
 et ΔT_{eau} l'élévation de température.

Le volume d'eau disposé à l'arrière du panneau est de 500 ml et se trouve pris entre la cloison et une plaque de polystyrène limitant les échanges thermiques avec l'air ambiant. Par ailleurs, la charge électrique est une résistance adaptée pour tirer le maximum de la puissance électrique du panneau.

Pour la puissance thermique, nous avons pris comme référence la valeur moyenne de la puissance reçue par le panneau, soit $P_{\text{moy}} = 360 \text{ W/m}^2 \cdot 0,170 \text{ m}^2 = 61,2 \text{ W}$. Alors que pour la puissance électrique, nous avons comme précédemment pris comme référence la puissance reçue par la cellule la moins éclairée, soit pour le panneau : $P_{\text{min}} = 250 \text{ W/m}^2 \cdot 0,170 \text{ m}^2 = 42,5 \text{ W}$.

Cette mesure a duré $\delta t = 447 \text{ s}$ et a donné les résultats suivants.

Pour l'aspect thermique, on constate une élévation de température de $\Delta T_{\text{eau}} = 11,4 \text{ }^\circ\text{C}$, soit une énergie thermique récupérée sur la face arrière de $E_{\text{therm}} = C.m.\Delta T_{\text{eau}} = 23826 \text{ J}$ alors que le flux total incident était de $(E_{\text{th}})_{\text{réf}} = P_{\text{moy}} \cdot \delta t = 27356 \text{ J}$. Ce qui entraîne un coefficient de récupération de 87 %. Bien entendu, cette mesure est réalisée sans prendre en compte la capacité thermique du panneau lui-même. Une étude à température quasi constante donnerait des résultats plus réalistes et sans doute meilleurs.

Pour l'aspect électrique, la puissance est sensiblement constante et égale à 4,6 W ce qui sur la durée de l'expérience donne une énergie de $E_{\text{elec}} = P_{\text{elec}} \cdot \delta t = 2056 \text{ J}$. Cette dernière doit être comparée à l'énergie incidente $(E_{\text{elec}})_{\text{réf}} = P_{\text{min}} \cdot \delta t = 19\,000 \text{ J}$. De ce point de vue, on peut revendiquer un coefficient de récupération de 10,8 %.

Ces mesures sont bien entendus imparfaites mais elles ont le mérite de montrer que dans le cadre de l'optimisation des systèmes, la cogénération solaire ouvre des perspectives importantes car, dans le bâtiment, nombreuses sont les utilisations de chaleur à basses températures ce qui est parfaitement compatible avec

l'optimum de la conversion photo-électrique. Nous souhaiterions poursuivre cette étude dans le cadre d'un système réel avec fluide circulant à l'arrière du panneau pour reprendre de telles mesures en régime thermique quasi-permanent.

4 Adaptation d'impédance du panneau à la charge : réalisation et expérimentation du « MPPT »

4.1 Problématique

Comme nous l'avons évoqué, l'énergie solaire est cyclique et diffuse. De plus, la conversion photo-électrique est caractérisée par un rendement médiocre : au mieux 20% dans les applications industrielles courantes. Ceci fait que plus que pour toute autre système, il est important d'adapter la source à la charge. Ceci se réalise lors de l'investissement initial lorsque l'on choisit le courant de court-circuit et la tension à vide du générateur photovoltaïque par des mises en série / parallèle judicieuses de cellules élémentaires. Mais charge et ensoleillement fluctuent au cours d'une journée et il faut insérer une interface de puissance adaptant en permanence la photopile à sa charge. Dans la plupart des applications (couplage au réseau électrique ou recharge de batteries tampon), il va s'agir de tirer le maximum de puissance des panneaux quelles que soient les conditions d'utilisation (éclairage, charge électrique et température).

Nous nous plaçons dans le cas courant d'une utilisation à tension plus élevée que celle délivrée par notre photopile et nous choisissons donc un hacheur élévateur comme étage d'adaptation. Ce dernier fonctionne à la fréquence fixe de $F_D = 100 \text{ kHz}$ et est réglé par action sur son rapport cyclique α . Cette variable de réglage provient d'un micro-contrôleur dans lequel est implanté un algorithme « Perturb & Observ » [15] prélevant ses informations des grandeurs électriques V_p et I_p mesurées en sortie de panneau. Pour réaliser ce système de recherche automatique de puissance nous avons adopté un microcontrôleur de la famille PSoC développé par la société Cypress [17]. En effet, outre les classiques périphériques d'entrée - sortie (CAN et CNA) et l'unité centrale (CPU), ce composant propose des blocs fonctionnels paramétrables tant de type numérique que de type analogique. Compte-tenu du bruit de découpage, ce dernier aspect est utile pour supprimer les ondulations à F_D avant numérisation. Ainsi, deux composants sont nécessaires pour piloter l'étage de puissance : le « PSoC » et le « driver » de transistor MOSFET.

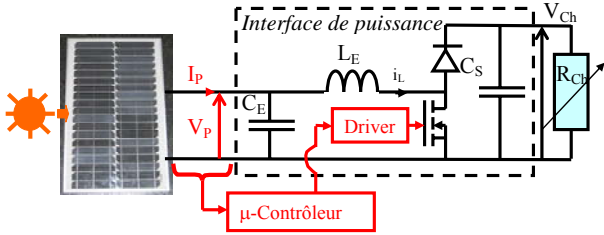


Figure 15 : synoptique du montage d'adaptation automatique d'impédance

4.2 Choix des paramètres

Comme nous ne mesurons ni l'éclairement incident ni la température du panneau, le point de maximum de puissance est a priori inconnu. Mais comme l'ont montré les courbes $P = P(V, T_{si})$, quand la charge électrique varie, on ne détecte qu'un maximum. Le principe de la commande « Perturb & Observ » est très simple (figure 16). Il consiste à solliciter le système en modifiant légèrement le rapport cyclique d'un incrément $\delta\alpha$. Lorsque le système s'est stabilisé autour de son nouveau point d'équilibre, on décide du nouvel incrément à appliquer en fonction de l'écart δP entre la puissance actuelle et la puissance précédente. Si δP est positif, on conserve le sens d'évolution de α en appliquant le même incrément $+\delta\alpha$; s'il est négatif, on applique l'incrément $-\delta\alpha$ afin de modifier le sens d'évolution de la commande. En régime permanent, le panneau oscille donc autour du maximum de puissance qu'il peut délivrer.

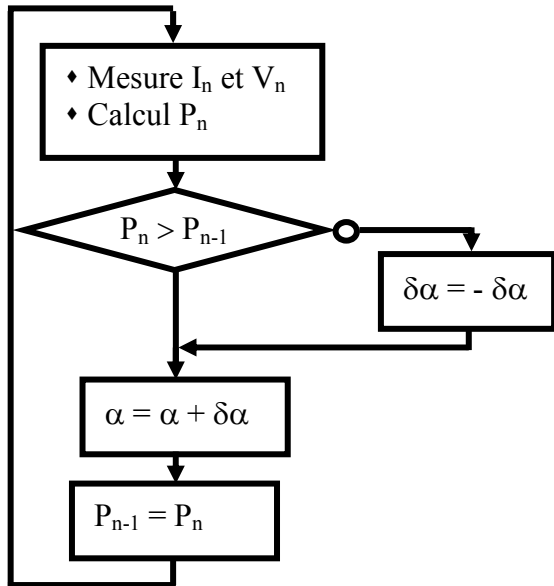


Figure 16 : algorithme « Perturb & observ » implémenté

Nous voyons également qu'il faut tenir compte de la dynamique du hacheur afin de mesurer $P = V_P \cdot I_P$ à des instants pertinents. C'est cette dynamique qui va conditionner le choix de la période d'échantillonnage $T_{éch}$. Pour la déterminer en fonction de L_E et C_S , nous établis-

sons un modèle moyen pour une conduction continue, ce qui est pertinent car la commande α évolue par petits incréments.

En amont du hacheur, on peut écrire :

$$L_E \frac{di_L}{dt} = V_P - (1-\alpha)v_{Ch}$$

En aval du hacheur, on peut écrire :

$$C_S \frac{dv_{Ch}}{dt} = (1-\alpha)i_L - \frac{v_{Ch}}{R_{Ch}}$$

Cette mise en équation fait apparaître des termes non-linéaires, résultats du produit de la commande par l'état.

Et en notant : $\alpha = \alpha_0 + d\alpha$, $i_L = i_{L0} + di_L$, et

$v_{Ch} = v_{Ch0} + dv_{Ch}$, et en négligeant les termes du second ordre, les deux expressions précédentes décrivent un système linéaire :

$$L_E \frac{d(di_L)}{dt} = \left[V_P - (1-\alpha_0)v_{Ch0} \right] - (1-\alpha_0)dv_{Ch} + v_{Ch0} \cdot d\alpha$$

$$C_S \frac{d(dv_{Ch})}{dt} = \left[(1-\alpha_0)i_{L0} - \frac{v_{Ch0}}{R_{Ch}} \right] + (1-\alpha_0)di_L - i_{L0} \cdot d\alpha - \frac{dv_{Ch}}{R_{Ch}}$$

En utilisant la transformation de Laplace, on obtient donc :

$$L_E s di_L(s) = -(1-\alpha_0)dv_{Ch}(s) + v_{Ch0} \cdot d\alpha(s)$$

$$C_S s dv_{Ch}(s) = +(1-\alpha_0)di_L(s) - i_{L0} \cdot d\alpha(s) - \frac{dv_{Ch}}{R_{Ch}}$$

D'où l'on peut tirer les fonctions de transfert de $di_L(s)$ et de $dv_{Ch}(s)$ en fonction de la commande $d\alpha(s)$. Elles ont toutes les deux les mêmes pôles. A titre d'exemple, on a :

$$H_v(s) = \frac{dv_{Ch}(s)}{d\alpha(s)} = H_0 \frac{1-\tau s}{1 + \frac{2m}{\omega_0} s + \frac{1}{\omega_0^2} s^2}$$

$$\text{Avec : } \omega_0 = \frac{(1-\alpha_0)}{\sqrt{L_E C_S}} \text{ et } m = \frac{1}{2(1-\alpha_0)R_{Ch}} \sqrt{\frac{L_E}{C_S}}$$

$$H_0 = \frac{v_{Ch0}}{(1-\alpha_0)} \text{ et } \tau = \frac{L_E i_{L0}}{(1-\alpha_0)v_{Ch0}}$$

Ce qui avec les valeurs adoptées pour le filtrage $L_E = 800 \mu H$ et $C_S = 10 \mu F$ donne un coefficient d'amortissement très faible. Par exemple, pour un rapport cyclique d'1/2 et une résistance de charge de 90Ω , on calcule un coefficient amortissement $m \approx 0,1$ et une pseudo-période $T'_0 \approx 1,1 \text{ ms}$. La simulation de ce convertisseur sous matlab/simulink confirme ces calculs, comme le montre la figure 17.

On choisit donc une période d'échantillonnage de $T_{éch} = 50 \text{ ms}$ avec deux convertisseurs analogique-numérique de 10 bits. Et pour supprimer les inévitables ondulations de découpage présentes sur les variables mesurées i_P et v_P , nous plaçons en amont des convertis-

seurs des filtres analogiques passe-bas du second ordre à $F_D / 100$.

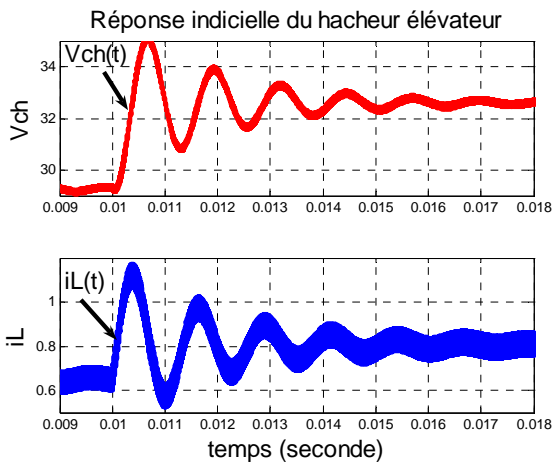


Figure 17 : simulation d'un échelon de commande de 0,05 autour de $\alpha_0 = 1/2$. Réponse de $v_{Ch}(t)$ et de $i_L(t)$

Le choix de la valeur de l'incrément/décroissement $\Delta\alpha$ de la commande α va résulter d'un compromis entre rapidité et précision. Plus celui-ci est petit, meilleure sera la précision de l'accrochage en régime permanent sur le maximum de puissance : rappelons que celui-ci est détecté par oscillation autour de sa position. En revanche plus la valeur $\Delta\alpha$ est faible plus la convergence de l'algorithme à la suite d'un élément perturbateur est lente. Il nous a semblé que les variations de l'environnement ne dépassant pas la seconde, il était surtout essentiel de privilégier la précision. Pour cela nous avons réalisé un essai en boucle ouverte pendant lequel le rapport cyclique balayait la plage $[0 ; 1]$. Ceci nous a permis de localiser le maximum de puissance pour un cas de figure précis ce qui permettra dans un deuxième temps de valider que l'algorithme implanté converge bien vers le maximum de puissance. Ceci nous a également permis d'observer qu'une résolution supérieure à 8 bits était inutile compte-tenu de la précision de nos mesures. Nous avons adopté la valeur de compromis $\Delta\alpha = 0,0078 = 1/128$ ce qui nous amène à parcourir toute la plage de commande en environ 6 s. Lors des variations d'éclairement, nous verrons que cela nous a permis de garantir des temps de réaction de l'ordre de la seconde.

4.3 Résultats expérimentaux

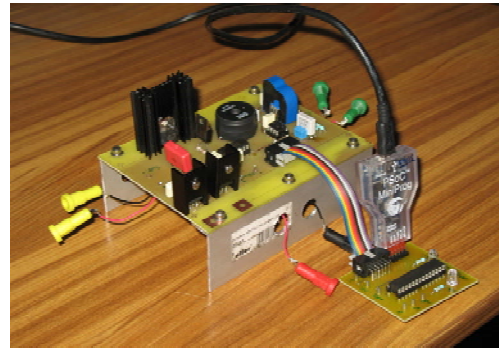


Figure 18 : montage d'adaptation automatique d'impédance (parties puissance et commande)

Ne disposant de dispositif de mesure de l'éclairement solaire, nous avons réalisé des expériences sous lumière artificielle.

La première expérience (figure 19), peu réaliste, correspond à un éclairement soudain du panneau après une phase d'obscurité. Connaissant tous les paramètres de cette expérience nous validons ainsi le bon accrochage de l'algorithme d'adaptation automatique d'impédance.

La deuxième expérience (figure 20) consiste en une variation par échelon de la charge électrique alors que l'éclairement reste identique. Directement après chaque variation soudaine de la charge, la puissance prélevée au panneau diminue. Mais l'algorithme réagit en faisant varier la commande et à chaque fois directement dans le bon sens. Le transitoire ne dure pas plus d'une seconde. Comme souhaité, le point de convergence défini par l'algorithme est à chaque fois le même en terme de puissance ; en effet, l'éclairement et la température étant fixes, le potentiel du panneau est inchangé tout au long de l'essai. En négligeant les pertes du convertisseur d'adaptation, on a :

$$P = \frac{(V_{Ch})^2}{R_{Ch}} = \frac{(V_p / (1-\alpha))^2}{R_{Ch}} = \frac{(V_p)^2}{R_p}$$

la résistance apparente R_p vue par le panneau est : $R_p = (1-\alpha)^2 \cdot R_{Ch}$.

Donc toute diminution de la résistance de charge R_{une} entraîne une diminution du rapport cyclique permettant l'adaptation d'impédance. C'est bien ce qui est observé.

La dernière expérience (figure 21) induit elle aussi une désadaptation transitoire de la charge R_p vue par le panneau. Il s'agit cette fois-ci d'une variation brutale d'éclairement. Cette dernière induit une modification de la caractéristique $I_p = I(V_p)$ du panneau. La nouvelle caractéristique ne rencontre plus la droite de charge $I_p = V_p/R_p$ au point optimal ; il faut pour cela que la commande α évolue. Directement après chaque variation soudaine de la charge, la puissance prélevée au panneau diminue. Mais l'algorithme réagit en faisant varier la commande et à chaque fois directement dans le bon sens. Le transitoire ne dure environ que deux secondes, et on peut mesurer par l'aire située entre la courbe de puissance et le segment de droite horizontale l'énergie per-

due par rapport à une réaction instantanée de l'algorithme. Pour connaître l'importance de ces pertes sur une journée, il faudrait avoir des relevés précis d'un éclairage réel typique et ainsi mesurer la fréquence des changements et leurs rapidités. Si nous constatons des changements brutaux et fréquents, il faudrait revoir notre stratégie de MPPT pour conserver sa précision tout en la rendant plus rapide.

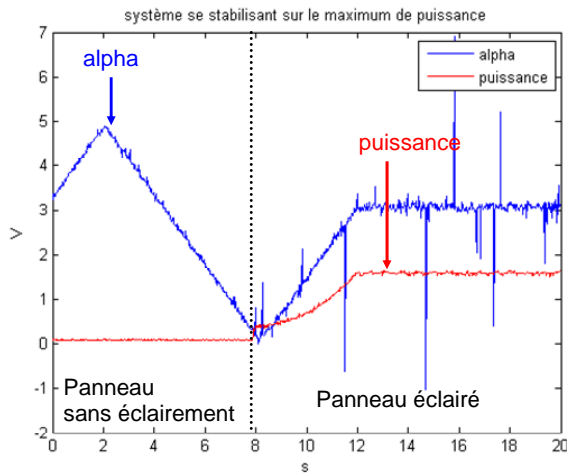


Figure 19 : éclairage brutal du panneau

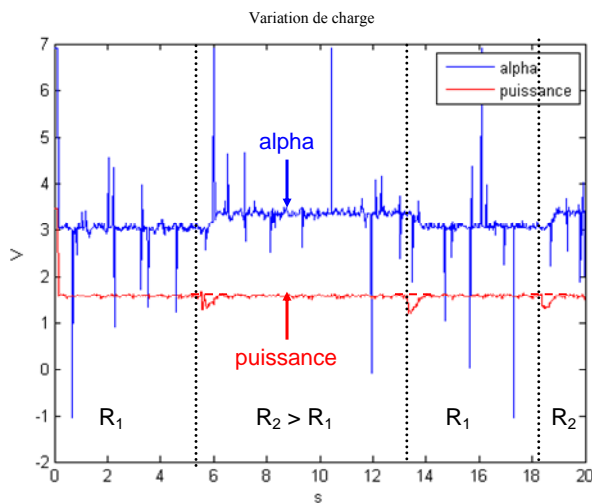


Figure 20 : variations brutales de la charge

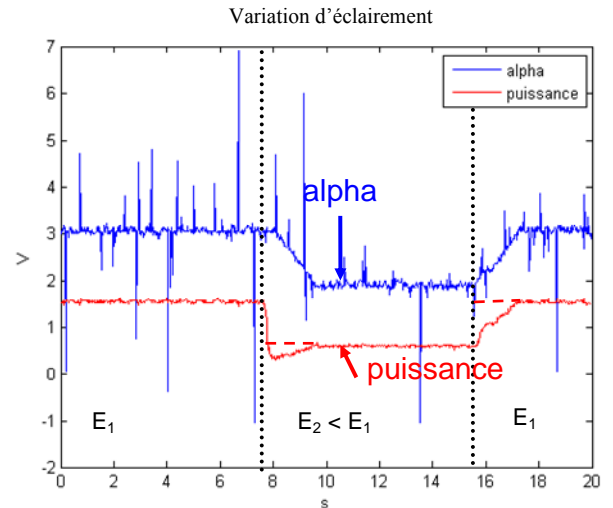


Figure 21 : variations brutales d'éclairage

5 Conclusion et perspectives

Comme nous l'avons évoqué en préambule, la diminution drastique des émissions de gaz à effet de serre va être un enjeu majeur de ce XXI^{ème} siècle. Or, le secteur du bâtiment est gros consommateur d'énergie, particulièrement dans nos pays développés. A titre indicatif, le secteur des logements et des bureaux français, avec 70,6 millions de tonnes équivalent pétrole, représente 44 % de la consommation d'énergie française [18]. Parmi l'ensemble des solutions qui peuvent être déployées, les toitures solaires permettent une production localisée d'électricité sans nouvelle emprise au sol.

L'idée qui sous tend notre contribution est de donner à des étudiants du Génie Electrique des explications scientifiques et objectives sur les mérites et les limitations de la filière photovoltaïque. Par des expériences simples, nous avons pu mettre en évidence l'interaction entre spectre lumineux et rendement du panneau solaire et cela pour les deux technologies les plus courantes : le silicium massif (c :Si) ou en couches minces (a :Si). Nous avons également pu insister sur le second paramètre prépondérant qui est la température du panneau. Cet échauffement néfaste du panneau pour la conversion photoélectrique, nous a ainsi amené à développer une expérience élémentaire de cogénération. Par ailleurs, nous avons également exploré le troisième aspect du générateur photovoltaïque. Dans le but d'une optimisation système, il s'agit bien évidemment d'adapter la source (ici non maîtrisée) à sa charge (également inconnue). Pour cela nous avons développé un ensemble expérimental complet autour d'un hacheur piloté par un micro-contrôleur PSoC très adapté à du prototypage rapide comme cela peut avoir lieu en salle de travaux pratiques. Ce dernier sujet couvre bien tous les aspects abordés par les étudiants de Génie Electrique : capteurs, filtrage, micro-contrôleur, programmation temps réel en langage C et électronique de puissance.

Pour parfaire cette série de TP., il faudrait mettre en place un dispositif de mesure de l'éclairement solaire qui permettrait d'évaluer la rapidité des changements réels de luminosité. Il serait également intéressant d'envisager un dispositif d'acquisition et d'intégration qui ferait le bilan entre l'énergie convertible et l'énergie effectivement convertie sous forme électrique. Ce rendement sur cycle réel serait le meilleur indicateur de la performance des différents outils de recherche du maximum de puissance (MPPT).

Remerciements :

Nous remercions notre collègue de Paris Sud Delphine Marris-Morini travaillant à l'Institut d'Electronique Fondamentale (I.E.F.) pour les mesures de spectres lumineux qu'elle nous a aidé à réaliser.

Pour la mise en œuvre du micro-contrôleur PSoc, nous souhaitons remercier nos collègues de l'IUT de Cachan Yves Guinand et Jean-Yves Lechenadec pour avoir guidé notre prise en main de ce composant.

6 Bibliographie

- [1] H. Descamps, G. Galasso, F. LEMAN, R. Mouyal,
Enjeux, défis et activités pédagogiques au lycée César Baggio de Lille
La Revue 3EI, n° 50, septembre 2007
- [2] Bernard Multon, Julien Seigneurbieux, Marie Ruelan, Hamid Ben Ahmed
Energie et développement durable
Bulletin des anciens élèves de l'ENSET / ENS de Cachan, n°228, février 2006
- [3] Jean-Claude Sabonnadière et al
Nouvelles technologies de l'énergie, tome3, géothermie et énergie de la biomasse
Hermes
- [4] Adolphe Nicolas
2050, rendez-vous à risques
Belin – Pour la science
- [5] Dominique Kopp

Convoitises sur les ressources stratégiques de l'Arctique – Début de guerre froide

Le Monde Diplomatique, septembre 2007, pages 4 - 5

[6] Assemblée Nationale N° 3021

Rapport fait au nom de la mission d'information sur l'effet de serre présidée par Jean-Yves Le Déaut

[7] www.populationmondiale.com

[8] International Energy Agency
Key World Energy Statistics - 2007

[9] Michel Amiet

La théorie des 3 E

La Revue 3EI, n° 46, septembre 2006

[10] Bernard Multon, Jacques Ruer

Stocker l'énergie : oui, c'est indispensable et c'est possible. ! Pourquoi ? Où ? Comment ?

Publication du club ECRIN : www.ecrin.asso.fr

[11] Alain Ricaud

Modules photovoltaïques, filières technologiques

Traité de Génie Electrique des Techniques de l'Ingénieur, D 3 940

[12] Simone Mattei

Rayonnement thermique des matériaux opaques

Traité de Génie Electrique des Techniques de l'Ingénieur, BE 8 210

[13] Lang Tran Tien

Circuits Fondamentaux de l'électronique analogique

Lavoisier, Tec&Doc, 1996

[14] Ludovic Protin et Stephan Astier

Convertisseurs photovoltaïques

Traité de Génie Electrique des Techniques de l'Ingénieur, D 3 360

[15] Jérôme Fadat

Chaîne de conversion photovoltaïque, commande MPPT

La Revue 3EI, n° 43, décembre 2005

[16] V. Léger, D. Gatel, K. Pellion, Y. Vincent, J. Escasut, T. Vignal, B. Lequilleuc, J. Pichon

Chaîne de conversion solaire-photovoltaïque

La Revue 3EI, n° 46, septembre 2006

[17] <http://www.cypress.com>

[18] Observatoire de l'énergie