

# Projet LUMELEC : mariage de l'optique et de l'électronique

P.Arguel<sup>(1,2)</sup>, J.Grisolia<sup>(3,4)</sup>, J.Launay<sup>(1,5)</sup>, H.Tap-Béteille<sup>(1,6)</sup>,  
C.Duprat<sup>(7)</sup>, C.Capello<sup>(7)</sup>, F.Gessinn<sup>(7)</sup>, F.Guerin<sup>(7)</sup>, C.Rouabhi<sup>(7)</sup>  
[arguel@laas.fr](mailto:arguel@laas.fr)

- (1) CNRS ; LAAS ; 7 avenue du colonel Roche, F-31077 Toulouse Cedex 4, France  
Université de Toulouse ; UPS, INSA, INP, ISAE ; UT1, UTM, LAAS ; F-31077 Toulouse Cedex 4, France  
(2) Université Paul Sabatier, 118 route de Narbonne, F-31062 Toulouse Cedex 9, France  
(3) Université de Toulouse, INSA-CNRS-UPS, LPCNO, 135 avenue de Rangueil, 31077 Toulouse, France  
(4) Institut National des Sciences Appliquées, 135 avenue de Rangueil, F-31077 Toulouse, France  
(5) IUT A Paul Sabatier, 115 route de Narbonne, F-31077 Toulouse Cedex, France  
(6) INPT-ENSEEIH Toulouse II, 2 rue Camichel, F-31071 Toulouse Cedex 7, France  
(7) Atelier Interuniversitaire de Micro-nano-Electronique, 135 avenue de Rangueil, F-31077 Toulouse, France

**RESUME :** Chaque année, les installations de l'AIME (Atelier Interuniversitaire de Micro-nano-Electronique) de Toulouse sont utilisées par une quarantaine de filières d'enseignement qui y trouvent tous les moyens techniques pour concevoir, réaliser et caractériser un ensemble de dispositifs électroniques ou des microsystèmes électromécaniques. S'inscrivant dans une volonté d'élargissement de l'offre de formation de cette structure inter-établissement, et afin de répondre à une demande croissante de ses utilisateurs, un projet visant la conception, la réalisation et la caractérisation de dispositifs optoélectroniques a été mis en place et est actuellement en cours d'amélioration.

Dans le cadre de ce projet, baptisé LUMELEC, il s'agit de fabriquer, sur un même substrat de silicium, divers photodétecteurs destinés à être caractérisés et dont les performances font l'objet d'une étude comparative en fonction de l'application visée. En rupture avec les approches conventionnelles, nous proposons ici la mise en œuvre d'une réelle microfabrication par les étudiants, succédant à une phase de modélisation et aboutissant à une caractérisation quasi exhaustive du système réalisé. Ainsi, les contraintes liées à des applications dans des domaines aussi variés que la conversion photovoltaïque, la domotique, la biologie, l'environnement,... sont analysées afin de déterminer les caractéristiques du dispositif le mieux adapté à sa fonction. Dans cet article, nous décrivons les principales options retenues pour permettre une mise en œuvre aisée et « modulaire » de ce projet, et faire en sorte qu'il réponde aux demandes de formations diverses.

**Mots clés :** cellule photovoltaïque, photodétection, optoélectronique, photonique.

## 1 INTRODUCTION

Les dispositifs associant l'optique et l'électronique investissent aujourd'hui des champs d'applications aussi variés que la conversion d'énergie, la domotique, la biologie, la surveillance environnementale,...

Afin de répondre à un besoin croissant de formation dans ce domaine, nous avons proposé la mise en place du projet LUMELEC au sein de l'AIME [1]. Ce projet collaboratif regroupe cinq établissements toulousains et a pour objectif la réalisation et la caractérisation de photodétecteurs présentant divers stades de sophistication. A travers l'étude de ces dispositifs optoélectroniques élémentaires, nous explorons ainsi quelques voies permettant d'améliorer aussi bien ses performances intrinsèques que les performances d'une association de plusieurs composants de ce type. L'objectif du projet est ainsi d'amener les étudiants, à partir de leurs propres réalisations technologiques, à maîtriser des concepts relatifs à la photodétection pour les mettre en œuvre dans le cadre d'applications diverses et concrètes.

Ce projet se scinde en deux parties dont la première, relative à la conversion photovoltaïque, est

opérationnelle depuis janvier 2011. Elle a déjà été suivie par une centaine d'étudiants et fait l'objet de l'essentiel des développements qui suivent.

La deuxième partie, actuellement en cours d'élaboration, est relative à la photodétection, au sens large, et à ses nombreux champs d'applications débordant largement le domaine de la conversion photovoltaïque. Ses principaux objectifs seront évoqués en fin d'article.

La mise en œuvre de la première partie du projet s'est basée sur les résultats d'une étude préalable de modélisation qui a déterminé le choix des principaux paramètres technologiques de la structure. Le dessin des dispositifs a ensuite été réalisé et un procédé technologique offrant divers stades d'élaboration a été établi. Enfin, un banc de caractérisation a été conçu et, actuellement, une extension de ses possibilités est en cours de mise en place.

## 2 MODELISATION DE LA STRUCTURE

Les principaux paramètres technologiques des dispositifs à réaliser ont été déterminés par une modélisation de la structure envisagée. A cette fin, un modèle scilab a été mis en œuvre sur la base d'une

cellule photosensible de type N<sup>+</sup>P. Afin d'optimiser les performances de la cellule, nous avons alors fait varier certains paramètres clefs tels que la valeur des dopages, la tension de polarisation, les épaisseurs de cathode,...

Tout d'abord la réponse spectrale a été évaluée pour différentes valeurs de dopage de l'anode (Fig.1). Cette première étude a montré que la sensibilité est d'autant meilleure que les valeurs de dopage sont faibles. Cependant, pour des raisons de disponibilité et de coût des wafers de silicium, un dopage de type P avec  $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  a été choisi. Il faut remarquer qu'un dopage inférieur permettrait d'améliorer la sensibilité aux grandes longueurs d'onde mais aurait peu d'influence sur la game spectrale visible. D'autre part, il augmenterait le temps de réponse en augmentant la durée de vie des porteurs minoritaires dans l'anode.

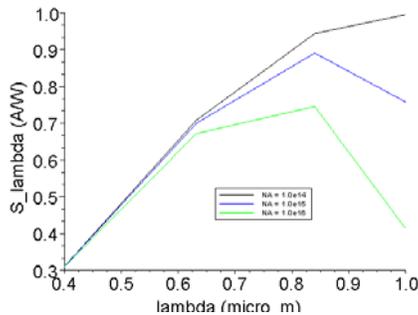


Figure 1 : Réponse spectrale pour différentes valeurs de dopage de l'anode. De haut en bas :  $N_A = 10^{14}; 10^{15}; 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

Ensuite, la réponse spectrale a été évaluée pour différentes valeurs de polarisation inverse de la photodiode. On observe alors que la valeur de la tension inverse de polarisation, tension qui permet d'augmenter l'étendue de la zone de charge d'espace, est un paramètre négligeable pour améliorer la sensibilité de la photodiode.

Enfin, la réponse spectrale de la photodiode a été évaluée pour différentes valeurs d'épaisseur de cathode. Comme attendu, la sensibilité est d'autant meilleure que l'épaisseur de la cathode est faible. Il est à noter que ce paramètre est important seulement pour les courtes longueurs d'onde (domaine où le coefficient d'absorption dans le silicium est le plus élevé). Nous nous efforcerons donc de réaliser des dispositifs présentant une profondeur de jonction la plus faible possible. Cependant, avec les équipements dont nous disposons, il est difficile d'obtenir et de contrôler des épaisseurs inférieures au micromètre. Nous choisissons donc de retenir cette épaisseur-là pour prétendre à une précision et une reproductibilité acceptables.

En conclusion, le modèle scilab mis en œuvre nous a permis de connaître la structure optimale qu'il est judicieux de fabriquer sur substrat silicium, à un coût raisonnable, avec les moyens disponibles au sein de la

centrale technologique de l'AIME et que nous rappelons ici :

- Dopage de l'anode :  $N_A = 1.10^{16} \text{ cm}^{-3}$
- Profondeur de la cathode:  $X_n = 1.10^{-4} \text{ cm}$
- Dopage de la cathode:  $N_D = 1.10^{19} \text{ cm}^{-3}$

Ce dispositif sera ensuite testé sous une tension de polarisation inverse égale à -5V.

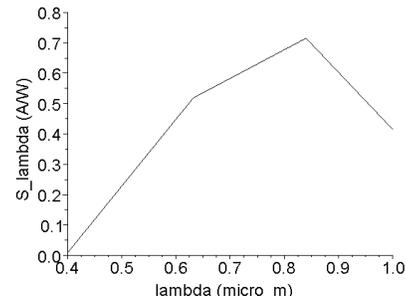


Figure 2 : Réponse spectrale de la cellule projetée.

La réponse spectrale de la cellule projetée selon les paramètres qui viennent d'être décrits est présentée sur la figure 2. Cette étude de modélisation est proposée, en option, aux étudiants des formations Master 1 et 2 afin qu'ils maîtrisent les principaux paramètres technologiques conditionnant les performances d'une photodiode et qu'ils en connaissent les ordres de grandeurs.

### 3 DESSIN DES DISPOSITIFS

Le premier dispositif envisagé dans le cadre du projet a été une cellule photovoltaïque. Généralement, une telle cellule est réalisée sur un wafer entier de silicium. Son dessin est alors optimisé pour couvrir au maximum la surface de matériau disponible tout en permettant un pavage « sans trou » lors de la réalisation ultérieure de panneaux.

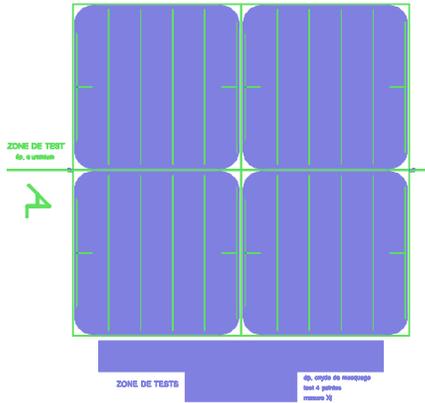
Afin de permettre aux étudiants d'évaluer le comportement électrique d'une cellule photovoltaïque unitaire sous illumination mais, également, de les confronter à l'assemblage de ces cellules tel qu'on peut le retrouver sur un panneau de type commercial (pour augmenter les valeurs de tension et courant « récupérables »), nous avons souhaité implanter quatre composants de taille plus réduite sur un seul et même wafer de deux pouces de diamètre.

Deux niveaux de masques de photolithographie ont ainsi été conçus à l'AIME (Figure 3) :

- le premier niveau pour délimiter, dans l'oxyde de masquage, les fenêtres de diffusion de dopants,
- le second niveau pour créer les lignes métalliques de collecte du courant et d'interconnexion vers une circuiterie externe.

Dans le cadre d'une amélioration optionnelle des dispositifs, un troisième niveau de masquage a été conçu pour dégager les plots d'interconnexion lors de la mise en œuvre d'une couche antireflet. Des zones

supplémentaires ont également été prévues sur ces masques afin de permettre les caractérisations physiques et électriques intermédiaires nécessaires à la vérification du bon déroulement du procédé en cours d'exécution (épaisseurs des couches de construction, dopages du silicium pré- et post-diffusion).



*Figure 3 : Superposition des deux masques conçus pour la réalisation de 4 cellules sur un wafer unique de silicium.*

Après une première réalisation testée en configuration de stage pour étudiants (voir partie caractérisation), la pertinence des masques proposés a été confirmée. Nous avons toutefois décidé de perfectionner le dessin des cellules photovoltaïques pour tenir compte de plusieurs paramètres impactant leurs performances.

Nous avons ainsi :

- réduit la largeur des doigts de la grille afin de diminuer le taux de couverture (ou d'ombre) dû aux métallisations en surface,
- espacé les doigts de la grille en respectant au mieux les résultats d'optimisation proposés par Chekane & al [2],
- placé deux plots d'interconnexion, de part et d'autre de chaque cellule, afin d'autoriser une utilisation symétrique (donc plus souple) lors de leur assemblage sur les supports PCB qui servent d'éprouvettes de tests,
- arrondi les angles de chaque cellule, à l'image des cellules commerciales qui sont optimisées, à la fois, pour recouvrir la plus grande surface de silicium et limiter les zones évidées lors de leur association sur des panneaux.

#### 4 PROCÉDE DE FABRICATION

Dans les années 1950, les premières cellules solaires réalisées utilisaient des substrats de type N (dopés au phosphore). A cette époque, leur première application n'était pas terrestre mais spatiale, pour l'alimentation de satellites. Les substrats de type P se révélant plus résistants aux radiations, les cellules photovoltaïques ont ensuite été développées sur du cristal dopé au bore. Ces premières cellules étaient seulement constituées

d'une jonction diffusée (émetteur) et d'un contact ohmique. Par rapport à ces simples photodiodes, l'architecture des cellules photovoltaïques a ensuite rapidement évolué et abouti à une architecture standard. Nous partirons donc de ce type de substrats dopé P pour la réalisation technologique des composants projetés, et en cohérence avec le modèle Scilab décrit précédemment.

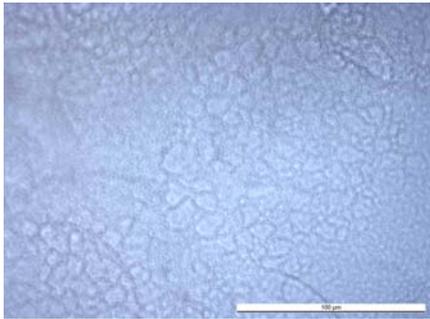
A la différence des dispositifs réalisés pour la microélectronique, le substrat (wafer) de silicium est ici utilisée dans sa totalité. Ces substrats sont découpés en usine, à la scie à fil, dans des lingots selon différents procédés. Même si une épaisseur de 10  $\mu\text{m}$  suffit théoriquement pour que la quasi-totalité des photons du domaine visible soit absorbée, les techniques actuelles de découpe ne permettent pas d'atteindre des épaisseurs inférieures à 100  $\mu\text{m}$ . D'autre part, des épaisseurs aussi faibles réduisent considérablement la résistance mécanique des wafers et imposent une manipulation très minutieuse de ces derniers. Pour le procédé de fabrication envisagé, nous utiliserons donc des plaquettes de 2 pouces de diamètre avec une épaisseur de 300  $\mu\text{m}$ . Ainsi, nous nous affranchirons du risque de casse des wafers en cours de procédé.

Au niveau industriel, trois grandes avancées technologiques ont permis l'augmentation du rendement des cellules photovoltaïques. Il s'agit, respectivement, de la texturation de surface des cellules, de l'usage d'une couche antireflet (CAR), et de l'usage d'un champ de surface arrière (Back Side Field : BSF). Nous avons donc fait apparaître ces différentes étapes dans le procédé de fabrication afin de faire appréhender aux étudiants l'importance de chacun de ces éléments. Toutefois, nous avons conservé la possibilité de ne pas appliquer systématiquement l'ensemble de ces trois opérations afin, par exemple, de pouvoir comparer la part de chacune d'elles sur le rendement final.

L'utilisation d'une structuration de la surface avant (texturation), alliée à une couche antireflet (CAR), permet de réduire drastiquement la réflexion du rayonnement incident. Le procédé de texturation consiste à créer un relief micrométrique à la surface de la plaquette de silicium. Cela permet de multiplier les angles d'incidence et donc les chances pour la lumière de pénétrer dans le matériau. Les techniques industrielles de texturation se font le plus souvent par voie humide alcaline (KOH, ...). Cependant, les voies humides acides et les voies sèches font l'objet d'un intérêt croissant et nous nous sommes ainsi orientés vers une attaque humide  $\text{HF}/\text{HNO}_3/\text{CH}_3\text{COOH}/\text{H}_2\text{O}$  pour éviter une contamination éventuelle de la salle blanche par le Potassium. La figure 4 montre un exemple de texturation de surface obtenue par le procédé retenu.

Une couche antireflet peut également être déposée sur la face avant des cellules pour améliorer le confinement

optique [3]. La CAR permet d'adapter l'indice optique entre le milieu extérieur et le silicium, et ainsi minimiser les réflexions. Pour cela, il est nécessaire que cette couche présente un indice de réfraction ainsi qu'une épaisseur adaptés au milieu extérieur. La CAR la plus répandue pour les cellules photovoltaïques est constituée de nitrure de silicium hydrogéné ( $a\text{-SiN}_x\text{:H}$ ). En effet, ce matériau permet de combiner des propriétés optiques excellentes et un niveau élevé de passivation de surface. Ne disposant pas de l'équipement nécessaire pour le dépôt de telles couches, nous nous sommes orientés vers l'utilisation d'un matériau de type AZ BARLi II 200 qui se dépose à la tournette, est recuit à 180°C et peut être structuré par gravure sèche (source gazeuse :  $\text{CHF}_3/\text{C}_2\text{F}_6/\text{O}_2$ ) ou par plasma oxygène. Cette couche, de l'ordre de 200 nm d'épaisseur, permet de réduire la réflectivité des semiconducteurs qui est habituellement de l'ordre de 25% dans le domaine du visible.



*Figure 4 : Résultat d'une attaque acide de texturation sur une surface de silicium initialement polie.*

En face arrière des cellules photovoltaïques, il est nécessaire de prendre un contact métallique sur la base (anode). Au niveau du contact, la vitesse de recombinaison de surface atteint des valeurs très élevées qui diminuent le rendement des dispositifs. Pour réduire le taux de recombinaison sur cette face arrière, il est possible de diminuer les défauts d'interface ou d'éloigner un des types de porteurs. L'efficacité d'un champ répulsif en face arrière a été d'abord démontrée par la réalisation d'un gradient de dopage : la jonction ainsi formée éloigne les porteurs minoritaires de la face arrière et diminue les recombinaisons au niveau du contact. Dans le cas de cellules standards, la technique la plus répandue au niveau industriel utilise une couche d'Aluminium déposée en face arrière [4]. Lors d'un traitement thermique adapté, un alliage eutectique AlSi est formé qui, en refroidissant, donne naissance à une zone dopée Aluminium. Cette étape technologique agit doublement sur la longueur de diffusion des porteurs en diminuant, à la fois, les recombinaisons volumiques et surfaciques. Cette option a donc été retenue pour le procédé développé à l'AIME.

Ces diverses possibilités d'amélioration étant établies, la réalisation technologique des cellules peut maintenant se résumer aux principales étapes suivantes :

- oxydation de masquage,
- photogravure n°1 d'ouverture de diffusion de la cathode,
- gravure humide de l'oxyde de masquage après protection de la face arrière,
- texturation de la surface avant par voie chimique,
- diffusion de la cathode,
- désoxydation des fenêtres de diffusion,
- métallisation de la face avant,
- photogravure n°2 pour la gravure du métal en face avant,
- métallisation de la face arrière après l'avoir désoxydée,
- formation du BSF par recuit rapide,
- dépôt et structuration photolithographique de la couche antireflet en face avant.

En parallèle de ces étapes technologiques, des mesures sont effectuées sur une plaquette dédiée aux tests afin de déterminer les différentes épaisseurs, dopages et profondeur de jonction pendant le déroulement du procédé de fabrication.

Dans un souci permanent d'amélioration du procédé, et afin de proposer une diversification des solutions apportées, nous travaillons actuellement sur la possibilité de remplacer le peigne de contact en Aluminium, sur la face avant, par une solution alternative permettant de réduire les pertes optiques induites par l'ombrage de ces contacts. Cette solution sera alors prochainement exploitable par les étudiants, au même titre que les trois précédentes qui viennent d'être présentées.

*In fine*, le procédé de réalisation se déroule sur deux journées complètes et est effectué par des étudiants travaillant en binôme. Il se termine par les étapes de découpe, de report sur support PCB et de microsoudure des cellules photovoltaïques afin de préparer les dispositifs à l'étape finale de caractérisation.

## 5 CARACTERISATION

Dans ce projet, nous avons pour objectifs de tester les dispositifs réalisés en offrant plusieurs niveaux d'approfondissement et, ainsi, développer des caractérisations électriques et optiques qui s'adressent à des publics et des niveaux de formation différents :

- Une formation au niveau Licence 3, axée essentiellement sur un banc de caractérisation permettant d'accéder, à la fois, aux propriétés optiques et électroniques des dispositifs réalisés dans le seul cadre de la conversion photovoltaïque. Il s'agit là d'une étape de caractérisation se déroulant sur une demi-journée.

- Une formation au niveau Master 1 et 2, plus ambitieuse, axée sur un banc de caractérisation en cours de mise au point et permettant d'accéder, à la fois, aux propriétés électroniques et de photodétection des dispositifs réalisés. A terme, cette étude se déroulera sur une journée entière et permettra d'aborder les contraintes liées à des applications au-delà de la seule conversion photovoltaïque et couvrant des domaines aussi variés que la domotique, la biologie, l'environnement...

A l'heure actuelle, le banc de caractérisation destiné à la formation au niveau Licence 3 est opérationnel et a déjà été exploité en enseignement. A l'issue de la fabrication des cellules photovoltaïques, ce banc a pour ambition de démontrer aux étudiants, d'une part, que sans pièce mécanique en mouvement, sans bruit, sans production de polluants, les cellules photovoltaïques qu'ils ont fabriquées convertissent directement l'énergie solaire en électricité sous forme de courant continu et, d'autre part, que l'utilisation de cette énergie nécessite des stratégies et des précautions particulières. L'objet de cette séance de caractérisation est alors de leur faire découvrir les cellules solaires individuelles et leur assemblage en panneaux solaires (modules), ainsi que d'acquérir quelques notions de radiométrie. Pour cela, les expériences installées en salle de caractérisation de l'AIME se répartissent en quatre modules et permettent de :

- Tracer et comprendre les caractéristiques I(V) d'une cellule solaire individuelle.
- Monter en série et en parallèle des cellules solaires pour la réalisation d'un module.
- Mettre en évidence les effets d'ombrage.
- Mettre en place une application permettant d'utiliser l'énergie électrique générée.

Le banc de caractérisation développé à cet effet est composé des principaux éléments suivants (Figure 5) :

- Une source de lumière blanche, collimatée, présentant un spectre proche du spectre solaire.
- Des supports mécaniques nécessaires au positionnement relatif des différents éléments d'optique (mini-table perforée, supports à hauteur réglable).
- Un puissance-mètre optique ou un luxmètre.
- Le matériel électronique de polarisation et de mesure (source de tension, oscilloscope,...).
- Un boîtier de « multiplexage » permettant de réaliser différentes configurations lors de l'association de cellules.

Dans la pratique, et dans une première partie, ce banc de caractérisation permet de montrer aux étudiants que chaque cellule photovoltaïque délivre un courant sous une tension qui lui est propre, que sa tension lorsqu'aucun courant ne circule à ses pôles est appelée

"tension en circuit ouvert" ( $V_{CO}$ ), et que le courant circulant lorsqu'il n'y a aucune tension est le "courant de court-circuit" ( $I_{cc}$ ).

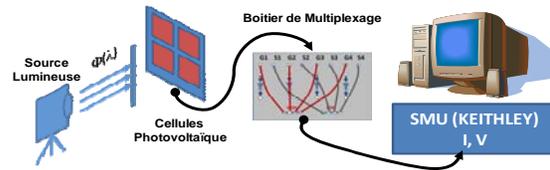


Figure 5 : Haut : schéma du banc de caractérisation. Bas : vue du boîtier de « multiplexage » (ici le boîtier est relié à un moteur de ventilateur).

Les étudiants comprennent alors que ce sont les deux situations extrêmes de fonctionnement de la cellule pour lesquelles aucune puissance n'est délivrée. Ils comprennent également que cette situation est toujours à éviter, et qu'il faut faire fonctionner le panneau solaire photovoltaïque avec une tension et un courant à puissance maximale ( $V_m$  et  $I_m$ ). Ce sont alors ces deux paramètres qui servent à déterminer le rendement nominal du panneau photovoltaïque (défini par le rapport de la puissance maximale disponible à la puissance du rayonnement incident) dont la puissance est alors exprimée en  $W_C$  (Watt crête). En outre, l'exploitation des courbes obtenues permet ensuite d'extraire le Facteur de Forme (filling factor) FF, et donne alors l'occasion de réfléchir à la relation entre les étapes technologiques du procédé et les caractéristiques électriques observées.

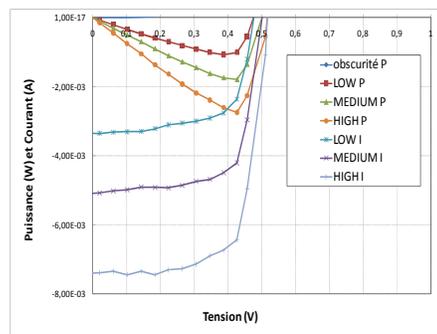


Figure 6 : Caractéristiques I(V) et P(V) sous éclairement croissant d'une cellule individuelle.

La figure 6 présente un exemple de caractéristiques d'une cellule individuelle testée par les étudiants en faisant varier l'intensité lumineuse incidente, et pour laquelle ils ont obtenu les caractéristiques suivantes :  $V_{CO} \sim 510$  mV,  $I_{CC} \sim 7.4$  mA,  $P_{Max} \sim 1.2$  mW et un rendement  $\eta \sim 14.5\%$ .

Ensuite, dans une seconde partie, l'étude porte sur la caractérisation d'associations de cellules assemblées en série et/ou en parallèle. Les cellules définissent alors un module photovoltaïque fournissant la tension et le courant électrique utiles afin d'augmenter la puissance disponible. La figure 7 présente un exemple de caractéristiques pour quatre cellules individuelles associées en série par les étudiants, et pour lesquelles ils ont obtenu les caractéristiques suivantes (en condition d'éclairage maximal disponible) :  $V_{CO} \sim 2.11$  V,  $I_{CC} \sim 8.37$  mA,  $P_{Max} \sim 15$  mW.

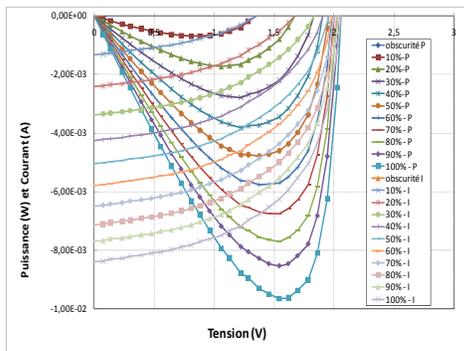


Figure 7 : Caractéristiques I(V) et P(V) sous éclairement croissant de 4 cellules photovoltaïques mises en série.

En troisième partie de caractérisation, nous simulons l'effet de l'ombrage d'une ou plusieurs cellules afin de permettre aux étudiants de comprendre l'utilité de placer, dans le circuit électrique, des diodes anti-retour (DAR) en série avec chaque cellule ou module.

Enfin, dans la quatrième et dernière partie, nous mettons les étudiants en situation d'utiliser cette énergie sur une charge et ainsi de travailler sur une application concrète : alimentation d'un moteur électrique surmonté d'un ventilateur, allumage d'une LED... C'est ainsi l'occasion pour les étudiants d'appliquer toutes les stratégies développées ci-dessus (association en série, en parallèle, gestion d'ombrage,...) et de choisir le meilleur montage possible pour les deux applications visées.

A court terme, le banc actuel de caractérisation doit évoluer pour être accessible à des formations au niveau Master 1 et 2. En particulier, nous sommes en train d'acquérir du matériel tel que :

- un simulateur solaire,

- une série de filtres colorés permettant un échantillonnage spectral centré sur une dizaine de longueurs d'ondes,
- une série de filtres neutres permettant le choix de la puissance avec une grande dynamique,
- des supports de filtres «à barillet» pour une manipulation rapide, aisée et sûre,
- deux lentilles convergentes et deux diaphragmes variables permettant de modifier la mise en forme initiale du faisceau.

Ce banc permettra alors de caractériser un large panel de photodétecteurs et de mener une étude comparative de leurs performances en vue d'applications diverses.

## 6 CONCLUSION

Le projet LUMELEC, mis en place au sein de l'AIME, est un projet collaboratif de formation portant sur la modélisation, la technologie et la caractérisation de composants optoélectroniques. Ce projet est développé en deux étapes dont la première a été présentée dans cet article et est relative à la conversion photovoltaïque. Son objectif est de proposer une formation conduisant les étudiants des niveaux L3 à M2 à maîtriser les divers paramètres conditionnant les performances de cellules solaires prises isolément ou assemblées en panneau. Le caractère volontairement modulaire des enseignements proposés permet à des formations diverses d'approfondir les aspects de leur choix. Ce volet de formation est opérationnel depuis janvier 2011 et a déjà été suivi par une centaine d'étudiants qui ont fait part d'un grand intérêt pour cette forme d'enseignement.

La deuxième étape est relative à la photodétection prise dans sa globalité. Pour cela, un banc complet de caractérisation est en cours d'élaboration. Il permettra, à terme, de mener une caractérisation approfondie et comparative de divers photodétecteurs en vue d'applications variées. Les étudiants seront ainsi amenés, à partir de leurs propres réalisations, à maîtriser les principaux concepts de la photodétection afin de pouvoir les utiliser dans le cadre d'applications reposant sur des flux lumineux de nature très diverses, tant en termes de propriétés spectrales que de propriétés spatiales, énergétiques ou temporelles. Enfin, au-delà des aspects purement pédagogiques, ce projet a également pour ambition d'initier des collaborations avec le milieu industriel dans un secteur très évolutif et connaissant une croissance spectaculaire depuis quelques années.

### Références :

- [1] <http://www.aime-toulouse.fr>
- [2] Rev. Energ. Ren. Vol. 7, pp.95-108, 2004
- [3] Inter. Conf. on Photovoltaic Power Generation, Hamburg, pp.487-490, 1974.
- [4] IEEE Trans. Elec. Dev., vol.46, N7, pp.1363-1370, 1999.