

Simulateur de Production Solaire : un outil pédagogique innovant dédié à l'enseignement des principes fondamentaux de l'énergie photovoltaïque

Sébastien Jacques¹, Antoine Clenet¹, Zheng Ren¹, Matthieu Lescieux¹, Ambroise Schellmanns¹,
Thierry Jacques², Eric Pluvinet², Adelphe Caldeira¹, Nathalie Batut¹

Correspondant : sebastien.jacques@univ-tours.fr

¹ Polytech'Tours, département Électronique et Énergie, 7 avenue Marcel Dassault, 37200, Tours

² FREEVOLT SARL, 12 avenue des Prés, 78180, Montigny le Bretonneux

RESUME : Cet article décrit une nouvelle approche pédagogique pour l'enseignement des connaissances de base de l'énergie solaire et des applications photovoltaïques. Cette méthode d'enseignement expérimentale et interactive permet aux étudiants et aux concepteurs de systèmes photovoltaïques de manipuler un simulateur de production solaire. Cet outil de simulation reproduit à échelle réduite la trajectoire du soleil quelle que soit la période de l'année. La production d'énergie est ensuite calculée pour différentes inclinaisons et orientations d'un capteur solaire. Le simulateur offre aux étudiants l'occasion d'acquiescer d'une façon ludique les fondamentaux de l'énergie photovoltaïque. Plusieurs exemples de travaux pratiques sont détaillés afin de donner une vue d'ensemble des exercices d'apprentissage qui pourraient être faits par les étudiants pour découvrir les multiples applications du photovoltaïque. À titre d'exemple, de nombreux cas d'études peuvent être traités tels que la mise en œuvre des calculs de position du soleil, la caractérisation électrique des cellules solaires avec différentes technologies ou encore la programmation de suiveurs du point de puissance maximale.

Mots clés : simulateur de production solaire, dispositif pédagogique innovant, applications photovoltaïques.

1 INTRODUCTION

La question du recours aux énergies renouvelables est très importante et est régulièrement évoquée puisque leur utilisation s'inscrit dans le contexte environnemental de réduction de l'émission des gaz à effet de serre [1], [2]. Une seconde problématique est aussi soulevée par les réseaux d'agences nationales de l'énergie au sujet de la consommation mondiale d'énergie. Cette dernière pourrait augmenter de plus d'une fois et demi par an si aucune mesure n'est mise en place pour la réduire [3]. Pour répondre à ces problématiques, l'Union Européenne a par exemple pris des engagements définis dans un plan appelé « 20-20-20 » [4]. Ce plan définit trois objectifs à atteindre pour 2020 : réduire de 20% l'émission des gaz à effet de serre, porter à 20% la part des énergies renouvelables et réaliser 20% d'économie d'énergie.

La nécessité de protéger l'environnement, par exemple en limitant l'utilisation de combustibles fossiles, se reflète en particulier dans l'habitat où l'énergie solaire est largement déployée, notamment dans les pays qui disposent d'un cadre législatif et fiscal [5].

Les programmes pédagogiques du génie électronique et de l'énergie doivent nécessairement s'adapter à cet enjeu de maîtrise de l'énergie tout en intégrant les objectifs environnementaux fixés par les institutions européennes [6]. De nouvelles méthodes d'enseignement des énergies renouvelables et du développement durable doivent être mises en place pour sensibiliser les étudiants à ces changements de comportement.

Un Simulateur de Production Solaire (SPS) a récemment été inventé par la société FREEVOLT SARL située en région parisienne [7]. Ce simulateur a ensuite été réalisé au Département Électronique et Énergie de l'école polytechnique universitaire de Tours (Polytech'Tours DEE) dans le cadre d'une collaboration

avec cette société. Cet outil pédagogique permet aux étudiants de disposer d'un mode d'apprentissage expérimental et ludique afin d'acquiescer les connaissances fondamentales de l'énergie solaire et en particulier, des applications photovoltaïques. Ce simulateur a été récompensé lors de l'édition 2012 du concours Lépine international. Le prix de la région Ile-de-France et une médaille d'or ont été décernés.

Le SPS est une maquette qui reproduit, à échelle réduite, la trajectoire du soleil quelle que soit la période de l'année. Le simulateur estime ensuite la production d'énergie d'un capteur solaire utilisé dans des configurations d'inclinaison et d'orientation données. Les simulateurs solaires déjà disponibles sur le marché ne sont pas bien adaptés à la caractérisation de capteurs solaires dans des conditions réelles de fonctionnement, notamment en cas d'ombrage partiel ou encore lorsque le rayonnement solaire n'est pas perpendiculaire à la surface du capteur. Ces phénomènes sont pourtant très importants et leur impact sur la production d'énergie a été largement discuté dans la littérature [8]. Ainsi, le SPS apporte des solutions pour pallier à ces problématiques.

Dans cet article, le fonctionnement du simulateur est explicité. Plusieurs exemples de travaux pratiques, qui peuvent être mis en œuvre avec cet équipement, sont décrits. Ces exercices d'apprentissage peuvent s'inscrire dans le cursus scolaire des lycéens de la formation « Sciences et Technologies de l'Industrie et du Développement Durable » (STI2D), des techniciens ou encore des élèves-ingénieurs spécialisés dans les domaines du génie électronique et de l'énergie.

L'utilisation de cet outil a été évaluée par les étudiants de Polytech'Tours. Une synthèse des résultats de cette évaluation est exposée.

2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU SPS

2.1 Fonctions réalisées par le SPS

L'utilisation du SPS permet de réaliser de nombreuses fonctions. Sa principale application est d'estimer la production d'énergie solaire d'un capteur dans des conditions géographiques (latitude, longitude), météorologiques, d'inclinaison et d'orientation données.

Parmi les autres fonctions, le simulateur permet de mesurer les performances électriques d'une cellule solaire (par exemple, la tension en circuit ouvert, le courant de court-circuit, le tracé de la caractéristique courant-tension etc.) pour différents niveaux d'intensité lumineuse et pour différentes technologies de capteur.

Il est également possible de reproduire des ombrages à l'aide d'objets (par exemple, des arbres) et d'analyser leur impact sur la production d'énergie du capteur solaire.

Dans la suite de cet article, nous allons décrire le fonctionnement des parties « matérielle » et « logicielle » qui composent le SPS.

2.2 Caractéristiques de la partie « Hardware »

La figure 1 présente le SPS. Les dimensions du simulateur sont les suivantes : longueur et largeur respectivement égales à 55 cm et 46 cm.

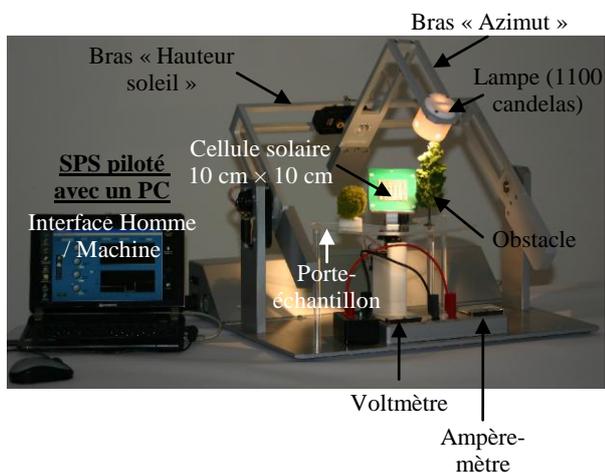


Figure 1 : Éléments constitutifs du SPS

La course du soleil est matérialisée à l'aide d'une lampe de 1 100 candelas. Cette lampe a été au préalable calibrée. Elle est dédiée aux dimensions du capteur solaire. Deux servomoteurs permettent de contrôler l'azimut solaire, ainsi que la hauteur du soleil. Leurs amplitudes maximales sont respectivement égales à 42,7 cm et 45,4 cm. Les mesures de l'angle de l'azimut solaire peuvent varier de -90° à 90°. Quant à la mesure angulaire de la hauteur du soleil, elle peut atteindre au maximum 90°. La commande des bras « Azimut » et « Hauteur soleil » est réalisée à l'aide d'un microcontrôleur ATMEGA 328 (carte Arduino Duemilanove). Le simulateur est équipé d'une tourelle sur laquelle une cellule solaire (longueur et largeur maximales égales à

10 cm), d'une puissance crête égale à 0,15 Wc, peut être positionnée à l'aide d'un système à aimants. Plusieurs technologies de cellules solaires peuvent être utilisées : silicium amorphe, monocristallin ou polycristallin.

Un porte-échantillon, qui intègre un graphique de la trajectoire du soleil dédié à un lieu géographique donné, permet de créer des masques solaires. Des obstacles (par exemple, des arbres miniatures) peuvent être disposés sur ce porte-échantillon pour reproduire ces masques solaires. Ces obstacles permettent de définir des zones d'ombre. Leur impact sur la production d'énergie solaire de la cellule peut ainsi être quantifié.

2.3 Interface Homme / Machine

Le SPS est entièrement piloté par un PC via un port USB. L'interface graphique a été réalisée à l'aide de l'environnement de programmation LabVIEW de National Instruments. Le microcontrôleur ATMEGA 328 peut être directement interfacé avec LabVIEW en utilisant la boîte à outils appelée « LIFA » (LabVIEW Interface For Arduino). L'utilisation de cet environnement graphique a pour avantages de contrôler, d'acquérir et d'interpréter les données émises par le microcontrôleur.

Comme on peut le voir sur la figure 2, le pilotage du SPS est réalisé en renseignant plusieurs paramètres disponibles dans l'interface Homme / Machine.

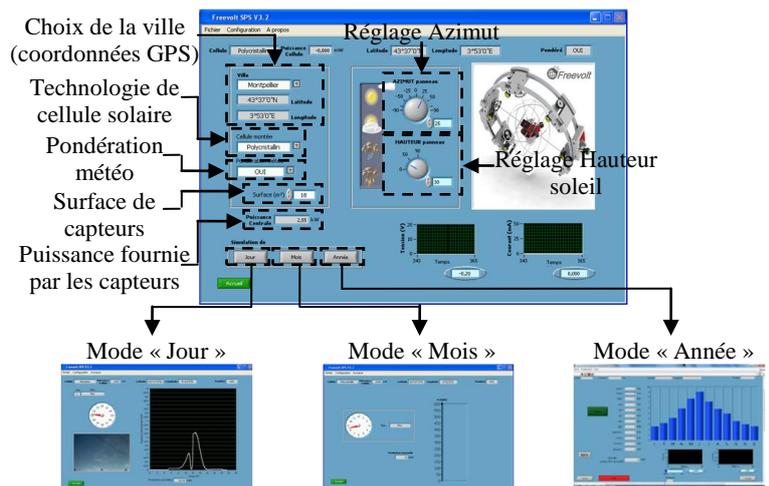


Figure 2 : Interface de pilotage du SPS

Tout d'abord, il est nécessaire de sélectionner la ville dans laquelle la simulation doit être effectuée. Pour cela, l'environnement de programmation intègre une base de données qui contient les coordonnées GPS (Global Positioning System) d'une centaine de villes situées en France et en Europe.

Ensuite, il est possible de choisir la technologie de la cellule solaire utilisée parmi les possibilités suivantes : silicium amorphe, monocristallin ou polycristallin.

L'environnement de programmation intègre les bases de données météorologiques des différentes villes. La production d'énergie solaire peut alors être estimée en pondérant les résultats en fonction des conditions météorologiques (i.e. temps ensoleillé, ciel nuageux, pluie). Pour cela, l'intensité lumineuse de la lampe est ajustée en fonction de ces conditions.

La surface de capteurs solaires (exemple d'une surface de panneaux solaires posée sur le toit d'une maison) est également une donnée d'entrée de la simulation. Le système estime, à partir de cette information et de la technologie, la puissance de sortie (en valeur crête) du capteur photovoltaïque.

Enfin, l'azimut solaire et la hauteur du soleil peuvent être réglés pour tenir compte de l'orientation et de l'inclinaison de la cellule.

Le SPS dispose de trois modes de fonctionnement : « Jour », « Mois » et « Année ». Chaque mode permet d'afficher la production d'énergie solaire (journalière, mensuelle ou annuelle suivant les modes) directement dans l'interface de simulation, dans des conditions météorologiques données et pour une certaine configuration d'installation du capteur solaire. Un rapport (au format html) récapitulant toutes les informations d'entrée et de sortie peut aussi être généré automatiquement. Les données de sortie, par exemple la tension, le courant ou encore la puissance fournie par la cellule solaire, peuvent être exportées vers un tableur.

Avant toute simulation, il est possible d'effectuer un cycle d'étalonnage du SPS pour entre autres minimiser l'effet de la luminosité ambiante. En utilisant ce cycle d'étalonnage, l'estimation de la production d'énergie du capteur solaire tient uniquement compte de l'intensité lumineuse fournie uniquement par la lampe.

3 EXEMPLES DE TRAVAUX PRATIQUES

3.1 Préambule

Dans cette partie, quatre exemples de travaux pratiques sont détaillés. Ces exercices s'inscrivent dans le programme de la formation d'ingénieur proposée par le département Électronique et Énergie de Polytech'Tours. En particulier, ces travaux pratiques sont réalisés par des étudiants de troisième année dans le cadre d'un cours intitulé « Gestion de l'énergie solaire et applications photovoltaïques ».

Les trois premiers exercices aident à prendre en main le simulateur pour appréhender ses modes de fonctionnement. Le dernier exercice décrit la programmation d'un microcontrôleur de type ATMEGA 328 afin de réaliser un système de suivi du point de puissance maximale.

À l'issue de ces séances de travaux pratiques, les élèves-ingénieurs ont rempli un questionnaire de satisfaction. Un résumé des résultats obtenus est donné à la fin de ce chapitre.

3.2 Exemples de TP liés au fonctionnement du SPS

Le premier exercice proposé consiste à extraire les principales caractéristiques électriques d'une cellule solaire. Les étudiants doivent déterminer la courbe I(V) en faisant varier la résistance de la charge à l'aide d'une boîte à décades (cf. Figure 3). À partir de cette courbe, il est alors possible d'extraire la tension en circuit ouvert et le courant de court-circuit de la cellule. En utilisant le graphique I(V), il est intéressant de tracer la puissance fournie par le capteur solaire en fonction de la tension à ses bornes pour extraire le point de puissance maximale (MPP de l'acronyme anglophone « Maximum Power Point »). Puisque le simulateur permet de traiter les données à l'aide d'un tableur, cet exercice peut être complété en analysant le comportement des différentes technologies de cellules (silicium amorphe, monocristallin, polycristallin) pour un même niveau d'ensoleillement.

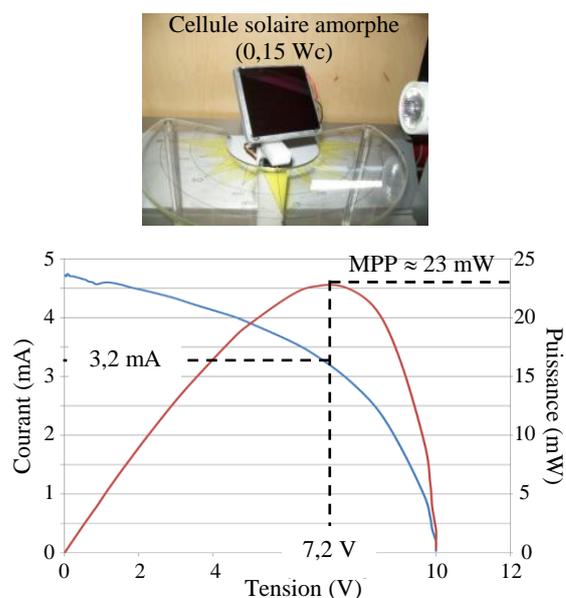


Figure 3 : Exemple de résultat d'un exercice visant à tracer les courbes courant-tension et puissance-tension d'une cellule solaire

Le deuxième exercice consiste à obtenir une meilleure compréhension de l'impact de l'orientation et de l'inclinaison d'une cellule photovoltaïque sur la production d'énergie. Comme l'illustre la figure 4, ce type de simulation est réalisé sur un lieu géographique donné (par exemple, pour une latitude et une longitude respectivement égales à 43,3° N et 1,29° O). L'orientation et l'angle d'inclinaison du capteur solaire sont à ajuster en contrôlant les bras « Azimut » et « Hauteur soleil ». La production d'énergie solaire peut ensuite être calculée pour chaque valeur d'orientation et d'inclinaison. La figure 4 montre en particulier un exemple de traitement des résultats à l'aide d'un tableur. Ces graphiques permettent d'extraire les valeurs optimales de l'orientation et de l'inclinaison pour maximiser la production d'énergie du capteur solaire.

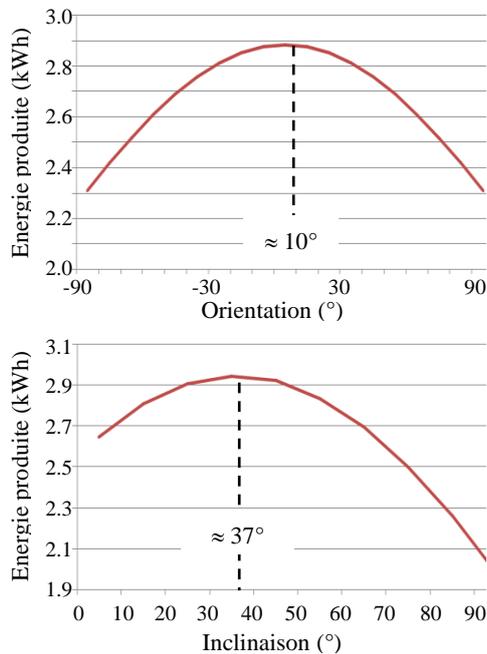
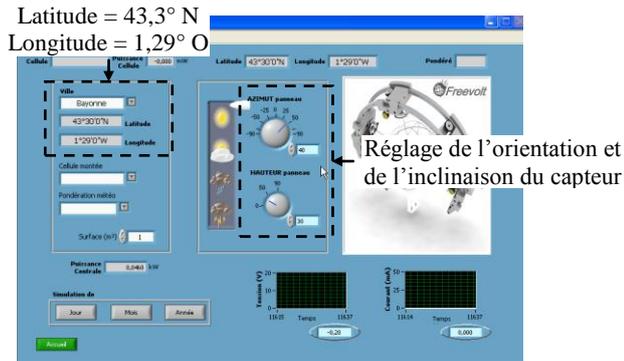


Figure 4 : Exemple de résultat d'un exercice visant à analyser l'impact de l'orientation et de l'inclinaison sur la production d'énergie d'une cellule solaire

Le troisième exercice consiste à analyser l'impact de zones d'ombre sur la production d'énergie d'une installation photovoltaïque. Cet exercice peut être réalisé en utilisant les trois modes de fonctionnement du SPS (c'est-à-dire « Jour », « Mois » et « Année »). Tout d'abord, il est proposé aux étudiants de réaliser un masque solaire (cf. Figure 5 (a)). Cette étape consiste à relever les zones d'ombre qui viendraient gêner la production d'énergie des capteurs solaires installés dans une configuration donnée, par exemple sur le toit d'un bâtiment. Ensuite, ces zones d'ombre sont reproduites en positionnant des obstacles sur le porte-échantillon du SPS. La figure 5 (b) donne un exemple de simulation journalière qui permet de quantifier la perte d'énergie due à ces zones d'ombre.

L'intérêt de cet exercice est non seulement de comprendre l'influence des ombrages partiels sur la production d'énergie solaire, mais également de pouvoir optimiser le positionnement de l'installation photovoltaïque afin de pallier à cette problématique.

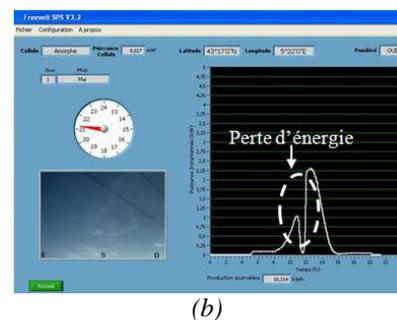
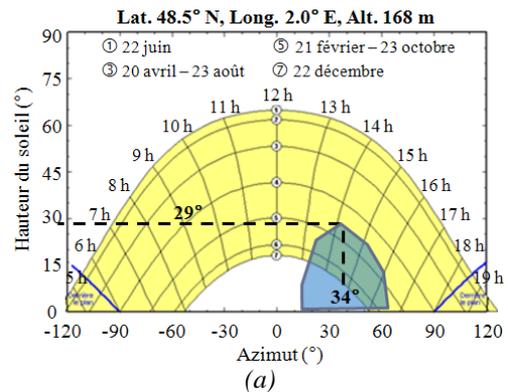


Figure 5 : Exemple de résultat d'un exercice visant à analyser l'impact de l'orientation et de l'inclinaison sur la production d'énergie d'une cellule solaire

3.3 Exemple de TP lié à la réalisation d'un suiveur

Dans ce paragraphe, un exercice d'un niveau plus avancé est décrit. Il consiste à travailler sur l'environnement de programmation de la machine et en particulier, celui des microcontrôleurs de type ATMEGA 328.

Le SPS est équipé d'une seconde tourelle autonome intégrant son propre microcontrôleur. Il est alors proposé aux étudiants de réaliser leur propre programme de commande de l'ATMEGA 328 afin de piloter les servomoteurs pour réaliser des systèmes de suivi du point de puissance maximale. La rotation de ces moteurs est transférée aux actionneurs du support de la cellule solaire par l'intermédiaire d'un réducteur. Les rotations sont possibles à la fois dans les sens horaire et antihoraire. L'éventail de systèmes de « tracking », qui peuvent être réalisés, est très large. Il est en effet possible de réaliser des systèmes de suivi mono-axe en azimut, mono-axe en hauteur ou encore biaxe. L'utilisation de la plateforme Arduino a de nombreux avantages. Cette plateforme est dite « open source »

pour la création d'interface de développement. La programmation du microcontrôleur est faite en langage C. Les étudiants peuvent réaliser ces programmes en parfaite autonomie puisqu'un didacticiel d'utilisation de la carte Arduino est disponible.

3.4 Évaluation des utilisateurs

Trente étudiants de troisième année du département Électronique et Énergie de Polytech'Tours ont assisté à des cours magistraux pendant 12 heures. Les notions de base des applications de l'énergie solaire et du photovoltaïque ont d'abord été introduites. Ensuite, les élèves-ingénieurs ont eu l'occasion d'appliquer leurs connaissances en utilisant le SPS pendant 12 heures de travaux pratiques. Ils ont notamment eu la possibilité de réaliser les exercices décrits dans cet article.

Chaque étudiant a rempli un questionnaire à la fin des exercices d'apprentissage. Le but de ce questionnaire est de donner une note de satisfaction globale du simulateur et en particulier, de son utilité dans la formation d'ingénieur. Quatre questions ont été posées et notées sur une échelle de « 1 » à « 4 ». Les notes « 1 » et « 4 » représentent respectivement les notes minimale et maximale obtenues pour chaque question. Le tableau 1 synthétise les résultats. Le SPS a remporté un pourcentage de satisfaction globale de 83,5%.

4 CONCLUSION

Le simulateur de production solaire (SPS) décrit dans cet article constitue un outil pédagogique innovant destiné à l'enseignement des connaissances de base de l'énergie solaire et des applications photovoltaïques.

Cet outil a de nombreuses applications. Plusieurs exemples de travaux pratiques sont décrits: la caractérisation de cellules solaires, la prédiction de la production d'énergie d'une installation solaire soumise à diverses contraintes environnementales (par exemple, un ombrage partiel), la programmation de systèmes de suivi du point de puissance maximale ou encore l'introduction des fondamentaux de l'astronomie (par exemple, les calculs de position solaires). En utilisant cet outil, les étudiants participent à une méthode d'apprentissage interactive et didactique.

Bien que l'intérêt de ce simulateur soit avant tout pédagogique, il pourrait permettre l'estimation de l'efficacité énergétique d'un capteur photovoltaïque quand il est mis en situation dans les applications de l'habitat. Ainsi, il pourrait aider les concepteurs au dimensionnement et à l'installation de centrales photovoltaïques. Ce simulateur pourrait également être utilisé en tant que démonstrateur par les agences de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.

Bibliographie

- [1] M. A. Saidel, T. M. Reis, Jr F. A. A. Prado, "Carbon Credits and Energy Efficiency", *International Journal of Green Energy*, Vol. 6, Issue 3 (2009), pp. 312-322.
- [2] G. D. Bolt, M. Kleingeld, J. F. van Rensburg, "Carbon tax: Future models and impact", *Proceedings of the 8th Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy*, 2011, pp. 152-158.
- [3] D. Singh, N. K. Sharma, Y. R. Sood, R. K. Jarial, "Global status of renewable energy and market: Future prospectus and target", *Proceedings of International Conference on Sustainable Energy and Intelligent Systems*, 2011, pp. 171-176.
- [4] S. Favuzza, G. Graditi, M. G. Ippolito, F. Massaro, R. Musca, E. R. Sanseverino, "Transition of a distribution system towards an active network. Part I: Preliminary design and scenario perspectives", *Proceedings of 2011 International Conference on Clean Electrical Power*, 2011, pp. 9-14.
- [5] H. M. Hwang, J. B. Park, J. H. Rho, J. H. So, H. E. Song, G. J. Yu, "Comparative analysis of system economics for the Korean and German photovoltaic support program", *Proceedings of IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2011, pp. 3254-3259.
- [6] A. Filipkowski, "Introducing future engineers to sustainable ecology problems: a case study", *European Journal of Engineering Education*, Vol. 36, Issue 6 (2011), pp. 537-546.
- [7] E. Pluvinet, « Dispositif de mise en situation de capteurs, ou cellules solaires dans un système reproduisant la course solaire ainsi que l'environnement en laboratoire », *Brevet d'invention n° 2943851*, 8 octobre 2010.
- [8] H. Patel, V. Agarwal, "MATLAB-Based Modeling to Study the Effects of Partial Shading on PV Array Characteristics", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 23, Issue 1 (2008), pp. 302-310.

Tableau 1. Résumé des résultats de l'évaluation du SPS par les étudiants de Polytech'Tours DEE

Question	Pas du tout = 1	Bien = 2	Très Bien = 3	Excellent = 4	Moyenne	Bilan
1. Le SPS est-il utile dans l'enseignement des fondamentaux des applications photovoltaïques ?	2,1%	12,3%	41,2%	44,4%	3,28	82,0%
2. Avez-vous le sentiment d'avoir acquis davantage de connaissances des applications de l'énergie solaire ?	2,5%	11,2%	39,7%	46,6%	3,30	82,5%
3. Évaluer la facilité d'utilisation du SPS.	1,3%	4,9%	51,2%	42,6%	3,35	83,8%
4. Évaluer l'intérêt du SPS.	1,2%	7,9%	37,3%	53,6%	3,43	85,8%
Satisfaction globale						83,5%

