

De la simulation à la réalisation d'un hacheur MPPT pour panneau photovoltaïque

Fabrice ROBERT¹, Nicolas LARDENOIS², Laurent VERMEIREN³
{fabrice.robert, nicolas.lardenois, laurent.vermeiren}@uphf.fr

Adresse : Université Polytechnique Haut-de-France, Institut Universitaire de Technologie, département Génie Electrique et Informatique Industrielle, Le Mont-Houy, 59313 Valenciennes Cedex 9

RESUME : L'article présente un outil de gestion de l'énergie photovoltaïque. Il concerne essentiellement les étudiants du cursus DUT Génie Electrique et Informatique Industrielle ainsi que ceux de la Licence Professionnelle Développement Durable et Gestion des Énergies. Initialement, les travaux ont exploité les logiciels classiques de simulation. La course du soleil, l'algorithme du calcul du point de puissance maximum d'un panneau solaire ont fait l'objet durant une dizaine d'années de travaux pratiques et de projets y compris dans le cadre Erasmus. Une alimentation programmable simulant des panneaux photovoltaïques a été acquise permettant notamment de réaliser un hacheur capable de rechercher le point de puissance maximum de ceux-ci comme il en existe d'office dans les onduleurs photovoltaïques. Dès lors les étudiants découvrent, réalisent et appliquent une grande partie des connaissances propres au Génie Electrique et Informatique Industrielle.

Mots clés : énergie photovoltaïque, algorithme Perturbe et Observe, hacheur MPPT, pluridisciplinarité

1 INTRODUCTION

L'article présente un outil pédagogique de gestion de l'énergie photovoltaïque. Il concerne essentiellement les étudiants du cursus DUT Génie Électrique Informatique Industrielle ainsi que ceux de la Licence Professionnelle Développement Durable et Gestion des Energies.

Le besoin en sources d'énergie non émettrice de gaz carbonique (CO₂) est croissant afin de limiter le réchauffement climatique et ses effets délétères à plus ou moins court terme. L'énergie photovoltaïque est prometteuse. Le coût des panneaux photovoltaïques et des équipements associés comme les onduleurs diminue ces dernières années grâce aux produits chinois. Cependant, cette source est intermittente et sujette à des fluctuations de production liées aux conditions météorologiques. Les paramètres essentiels pour la production photovoltaïque sont l'irradiance exprimée en Watt/m² et la température. Les fabricants utilisent majoritairement une norme dite « Standard Test Conditions » fixant l'irradiance à 1000W/m² et la température à 25°C. Ces valeurs définissent la puissance-crête d'un panneau exprimée en Watt-crête (Wc).

Dans ce contexte, afin de maximiser la production photoélectrique à chaque instant, les onduleurs sont équipés d'une fonction appelée « Maximum Power Point Tracking » (MPPT). Cette fonction est assurée par un hacheur DC/DC piloté par un algorithme dont le plus usuel se nomme « Perturbe et Observe ». Ce papier focalise sur le hacheur DC/DC et la fonction MPPT, inaccessible dans les onduleurs photovoltaïques industriels.

Les travaux présentés ici ont réuni des enseignants de génie électrique, de mathématiques et d'Automatique. Durant près de deux années universitaires, ils ont supervisé selon leur domaine de compétence des étudiants d'un Institut Universitaire de Technologie de

la spécialité Génie Electrique et Informatique Industrielle.

Sensibilisés aux énergies renouvelables, les auteurs ont collaboré depuis plus d'une dizaine d'années dans le domaine de l'énergie photovoltaïque. La course du soleil [1], un chariot photovoltaïque autonome [2], [3], les traqueurs solaires [4], [5], [6] ont nourri au fil des ans la synergie entre collègues de différentes disciplines avec pour principale conséquence une motivation d'une grande partie des étudiants découvrant les échanges fructueux et informels entre disciplines de l'IUT.

Les étudiants des cursus DUT Génie Électrique Informatique Industrielle (GEII) et Licence Professionnelle Développement Durable et Gestion des Energies sont amenés à mettre en œuvre panneaux photovoltaïques et onduleurs alimentant directement des charges (onduleur autonome). Pour appréhender l'ensemble de ces techniques, ces étudiants utilisent d'abord des modèles conçus par l'un des auteurs. Ils sont présentés dans la section 2.

L'algorithme Perturbe et Observe est la base de la fonction MPPT. La réalisation d'un hacheur piloté par un microcontrôleur et assurant cette fonction est traitée dans la section 3.

Enfin, la dernière section tire des conclusions et propose de nouvelles applications et améliorations du système.

2. LES MODELES DE SIMULATION

2.1 LES MODELES DE DEPART

Le logiciel Matlab® et son interface graphique Simulink® se prêtent très bien à la construction de modèles photovoltaïques, tels que :

- Étude des caractéristiques non linéaires courant / tension I(V) et puissance/tension P(V) d'un panneau

- photovoltaïque raccordé à une résistance R : droite de charge, point de fonctionnement (voir figure 1),
- Étude de la résistance d'entrée d'un hacheur en fonction de la commande en modulation de largeur d'impulsion (MLI),
- Étude de l'algorithme « Perturbe et Observe » commandant le hacheur MPPT : voir figure 2.

Tous ces modèles sont issus des résultats des travaux conduits en 2009 par un étudiant finlandais durant son stage ERASMUS dans le département GEII et encadré par l'un des auteurs [7] et améliorés au fil du temps grâce aux retours d'expériences des étudiants. Ces modèles sont fournis aux étudiants de 2ème année de DUT GEII durant les séances de TP « Energie Renouvelable ».

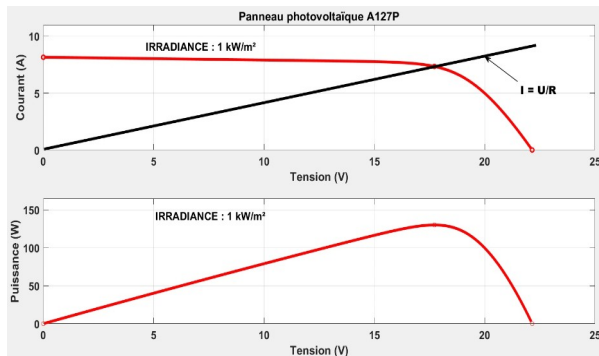


fig 1 : Étude des caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ aux « Standard Test Conditions »

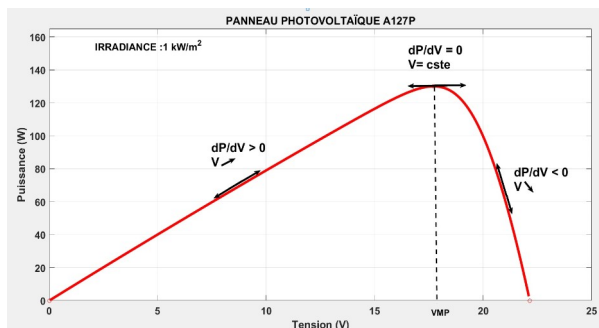


fig 2 : Étude du principe de l'algorithme Perturbe et Observe

Ils apprennent à s'en servir, calculent et définissent les variables des modèles afin d'obtenir des résultats qui sont validés ou non par l'enseignant, en faisant référence aux informations données en cours.

Les objectifs pédagogiques à atteindre sont d'une part, la compréhension du comportement non linéaire d'un champ photovoltaïque soumis à des variations météorologiques et, d'autre part, l'analyse des résultats obtenus.

Le retour d'expérience montre que les étudiants apprécient l'usage des modèles proposés car l'ergonomie du logiciel est efficace. Il faut cependant insister pour obtenir une analyse pertinente des résultats obtenus et non une accumulation de copies d'écrans.

2.2 L'ALGORITHME PERTURBE ET OBSERVE

L'algorithme Perturbe et Observe est une itération sans fin d'une part, de l'observation du signe de (dP/dV) sur la courbe $P(V)$ de la figure 2 et, d'autre part, d'une variation dV de la tension V (perturbation). Si (dP/dV) est positive, la tension V est inférieure à la tension du point de puissance maximale VMP. Il faut donc augmenter V de dV en augmentant la résistance d'entrée du hacheur via le rapport cyclique α du signal MLI. Au contraire, si (dP/dV) est négative, V est supérieure à VMP, la résistance d'entrée du hacheur doit diminuer. La figure 3 présente cet algorithme.

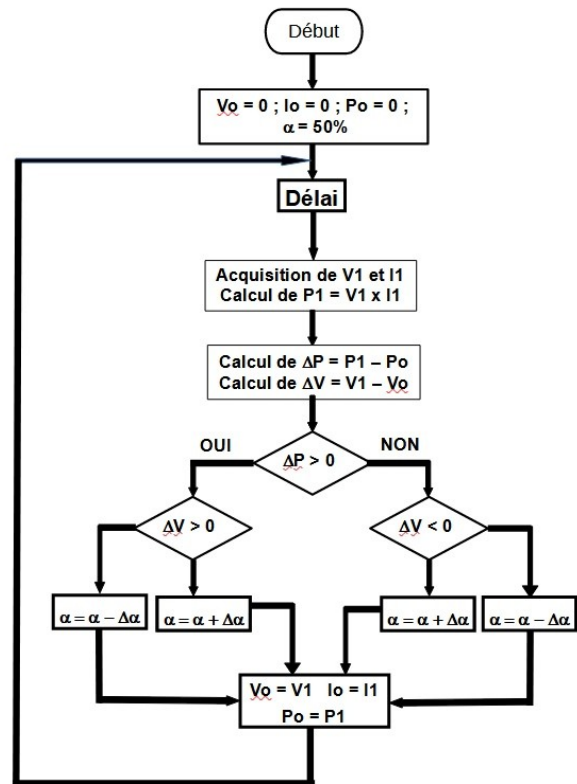


fig 3 : Algorithme Perturbe et Observe

En pratique et afin d'accélérer le process, ce n'est pas la dérivée (dP/dV) qui est calculée mais les variations ΔP et ΔV . De plus, pour éviter le risque d'une division par 0 si $\Delta V = 0$, le signe de $(\Delta P/\Delta V)$ est déterminé par les signes de ΔP et ΔV .

Au démarrage de l'algorithme, à $t = t_0$ la tension V et le courant I sont mesurés, leurs images numériques mises en mémoire V_0 et I_0 . La puissance est calculée et mémorisée en P_0 . Après un délai ΔT , soit à $t = t_0 + \Delta T$, V et I sont mesurés de nouveau et mis en mémoire V_1 et I_1 , la puissance P_1 est calculée ainsi que les écarts ΔP et ΔV . La perturbation $\pm \Delta\alpha$ est alors appliquée.

Le cycle se répète après avoir sauvegardé V_1 , I_1 et P_1 respectivement dans les variables V_0 , I_0 et P_0 .

Les paramètres ΔT et $\Delta\alpha$ sont à ajuster empiriquement pour obtenir le meilleur compromis rapidité/précision.

La mise en œuvre de modèles numériques est une étape utile en phase d'apprentissage et de conception mais elle doit conduire à une réalisation concrète d'un équipement afin de comparer les comportements et éventuellement corriger soit le modèle soit l'équipement.

En 2010, le département GEII a accueilli deux étudiants de la North-West University - Potchefstroom campus en collaboration avec le CESI d'Arras pour un stage d'initiation à la recherche. Ils ont été encadré par l'un des auteurs pour mettre en œuvre un kit Texas Instrument TMS320C2000 réalisant toutes les fonctions évoquées ci-dessus [8]. La complexité de la mise en œuvre du kit, notamment celle du DSP C2000 qui pilote l'ensemble a fait renoncer à son usage en Travaux Pratiques de DUT GEII.

C'est ainsi que les auteurs ont imaginé le hacheur MPPT avec sa commande Perturbe et Observe décrits dans la suite de ce papier.

3. LE HACHEUR MPPT

3.1 LA CONCEPTION DU HACHEUR

L'atelier GEII de l'IUT de Valenciennes dispose d'un panneau photovoltaïque de 130Wc. Le hacheur associé à ce panneau se comporte comme une résistance ajustable à l'aide d'une commande en modulation de largeur d'impulsion (MLI) fournie par une carte Arduino Nano munie d'un microcontrôleur 8 bits ATmega328P.

L'étude a été proposée, parmi d'autres thèmes, à un groupe d'étudiants de 2ème année de DUT GEII en « Projet pluridisciplinaire » encadré par l'un des auteurs. Un binôme a retenu ce sujet. L'objectif fixé est d'apprendre à maîtriser le modèle et à tester les différents réglages de ses paramètres avant de passer à la réalisation.

Le modèle établi par un des auteurs sous Simulink® a permis au binôme de dimensionner l'ensemble des composants du hacheur MPPT pour les « Standard Test Conditions » (voir figure 4) et de tester de son fonctionnement (voir figures 5 et 6).

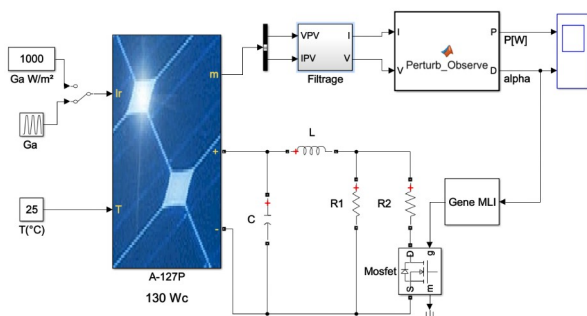


fig 4 : simulation du hacheur MPPT

Le cahier des charges impose que le hacheur supporte au maximum 8A, 22V et 130Wc. Sa résistance d'entrée

est ajustable de 10Ω à $0,47 \Omega$ afin de balayer toute la caractéristique du panneau photovoltaïque.

La résistance R1 est égale à $10\Omega / 100W$ et R2 vaut $0,5\Omega / 25W$. L'inductance de 10 mH limite l'ondulation du courant à moins de 80mA soit moins de 1 % du courant maximum.

Les résultats de simulation obtenus par les étudiants sont donnés en figures 5 et 6. ΔT est réglé ici à 100 ms et $\Delta\alpha = 2\%$. Une étude consiste à varier ces paramètres et conclure sur la précision, la rapidité et la stabilité de la puissance fournie en vu de la programmation de ces paramètres.

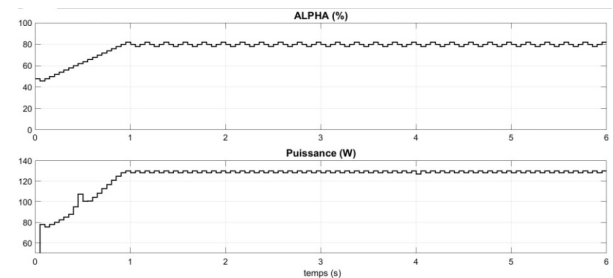


fig 5 : Réponse du MPPT pour une irradiance de $1000 W/m^2$

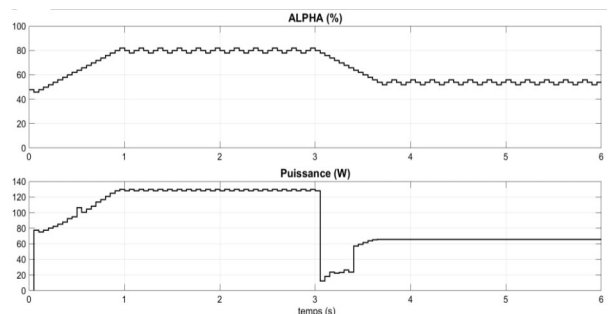


fig 6 : Réponse du MPPT pour un saut d'irradiance de $1000 W/m^2$ à $500 W/m^2$ à $t = 3$ secondes

Le cahier des charges du hacheur, élaboré par les auteurs, est fourni aux étudiants.

La fréquence MLI est choisie supérieure à 10 kHz afin de rendre inaudibles les vibrations électromagnétiques. La commande du hacheur MPPT est prévue selon deux modes :

- Manuel : un potentiomètre règle le rapport cyclique α du signal MLI,
- Automatique : l'algorithme Perturbe et Observe règle α .

En mode manuel un afficheur LCD indique l'évolution de α en fonction de la tension délivrée par le potentiomètre, les valeurs du courant et de la tension du panneau photovoltaïque.

En mode automatique, l'afficheur fournit α , le signe de $(\Delta P / \Delta V)$ et la puissance électrique délivrée par le panneau photovoltaïque.

Le capteur de tension V est réalisé par un simple diviseur résistif associé à un filtre analogique pour supprimer tout parasite de haute fréquence et ne fournir que la valeur moyenne.

Un capteur ACS 712 à effet Hall mesure le courant I et délivre une tension proportionnelle à celui-ci. Un filtre analogique est placé en sortie de capteur, identique à celui utilisé pour obtenir V.

La carte Arduino Nano recueille les tensions issues des deux capteurs et fournit le signal MLI à 15 kHz au transistor MOSFET.

Un commutateur placé sur une entrée logique tout ou rien permet de basculer du mode Manuel au mode Automatique.

3.2 LA RÉALISATION DU HACHEUR MPPT

Le circuit imprimé a été conçu par des étudiants de 1ère année de DUT Génie Électrique (schéma, simulation, routage) et réalisé par un sous-traitant industriel. Le soudage des composants et la réalisation de la face avant de la maquette ont été réalisés par les mêmes étudiants : voir figures 7 et 8.

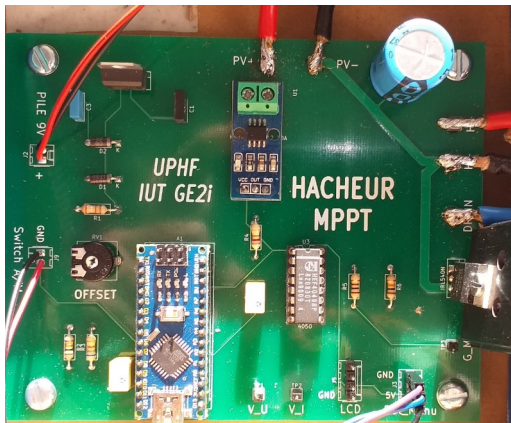


fig 7 : la carte du hacheur MPPT

La chaîne d'acquisition des signaux I et V a fait l'objet d'une attention particulière pour obtenir une image fidèle dépourvue de parasite.

Les objectifs attendus de ce travail sont multiples selon le public concerné. L'implantation des composants sur la carte électronique ainsi que les tests du bon fonctionnement sont des compétences basiques des étudiants en DUT GEII 1ère année.

La mise en œuvre de l'algorithme MPPT, son implémentation sur la carte à microcontrôleur et les essais ont fait l'objet de travaux pratiques en 2ème année de DUT GEII.

Pour éviter d'être soumis aux aléas météorologiques durant les tests, le panneau photovoltaïque est remplacé par une alimentation de puissance programmable CHROMA 62020H pilotée par un logiciel de simulation de champ photovoltaïque. Cela offre, et c'est une de ses caractéristiques majeures, la possibilité de modifier l'irradiance en temps réel. Cet équipement a été également exploité dans le cadre de TP de la Licence Professionnelle Développement Durable Gestion des Energies.

La figure 8 illustre l'organisation globale de la réalisation du projet.

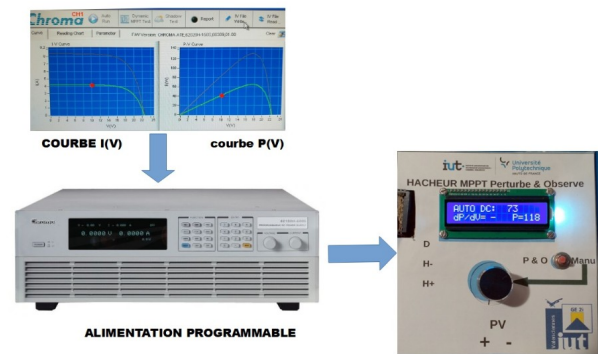


fig 8 : Organisation matérielle du projet hacheur MPPT

Le relevé des signaux images de I et V a permis aux étudiants de déterminer avec précision les facteurs d'échelle des chaînes d'acquisition avant l'implémentation des programmes rédigés en langage C et assurant le mode manuel puis le mode Perturbe et Observe.

3.3 LES ESSAIS PRATIQUES

Après la vérification de la validité des chaînes d'acquisition des signaux I et V avec un oscilloscope, un essai en mode manuel est testé avec succès : le point de fonctionnement décrit correctement la courbe I(V) selon la valeur du rapport cyclique α .

Le test en mode automatique est réalisé selon le scénario décrit ci-après.

L'interface graphique du logiciel CHROMA permet de modifier le niveau d'irradiance et de suivre dynamiquement la position du point de fonctionnement en rouge sur les courbes I(V) et P(V) des figures 8 et 9.

A la mise en service, le hacheur présente une résistance Rinit. L'alimentation CHROMA produit la caractéristique du panneau photovoltaïque correspondant à une irradiance de 1000 W/m² à 25°C. Le point de fonctionnement est alors en A, voir figure 9.

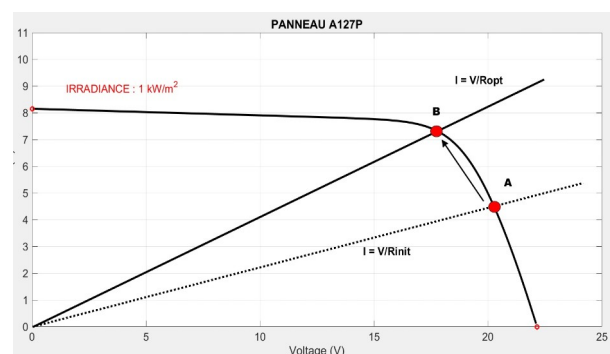


fig 9 : positions du point de fonctionnement pour 1000 W/m²

L'algorithme Perturbe et Observe détecte que $(\Delta P/\Delta V) < 0$ et progressivement le point de fonctionnement arrive en B. Une légère « oscillation » se produit alors autour de B : les « perturbations » éloignent puis ramènent le point de fonctionnement en B. Le hacheur présente la résistance optimale Ropt assurant la production maximale de puissance.

Le niveau d'irradiance passe à 500 W/m^2 : voir figure 10. Le point de fonctionnement saute de B en C, en glissant sur la droite de charge d'équation $I = V/R_{opt}$. L'algorithme détecte que $(\Delta P/\Delta V) > 0$. Tant que cette condition est vraie, le point de fonctionnement se déplace alors progressivement vers D où il va rester, à quelques « perturbations » près.

Les essais en mode Automatique ont permis de valider le bon fonctionnement de la carte et tous les résultats de simulation.

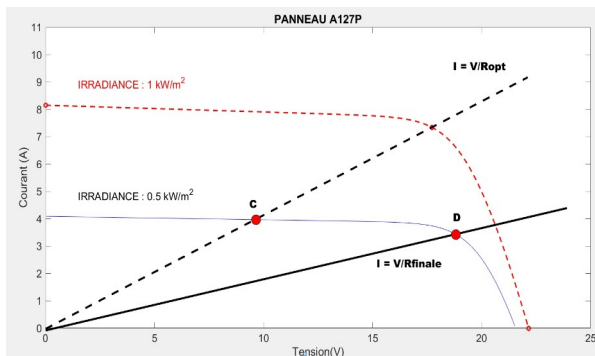


fig 10 : Evolution de la position du point de fonctionnement lors d'un saut d'irradiance

Le groupe d'étudiants de 2ème année de DUT GEII disposait de 40 heures en « Projet pluridisciplinaire » pour mener à bien la conception du hacheur. Le dimensionnement à l'aide du modèle Simulink® ne leur a pas posé problème, l'interface graphique étant suffisamment conviviale. L'emploi du hacheur, non pas exploité comme convertisseur d'énergie mais comme résistance ajustable fut une découverte pour eux. Ils ont éprouvé quelques difficultés à dimensionner les filtres, n'étant pas habitués à poser un cahier des charges. Le relevé des caractéristiques des chaînes de conversion les a amenés à affiner leur méthode de mesure, à exploiter un tableur pour tracer les caractéristiques et déterminer leur équation, nécessaire pour calibrer les valeurs échantillonnées par le microcontrôleur. Ils en retirent une bonne expérience du traitement analogique et numérique des signaux.

4. CONCLUSION

L'article a présenté une série de travaux concernant l'énergie photovoltaïque. Étudiés sur quelques années, les modèles développés par les auteurs ont été appliqués par les étudiants d'IUT GEII au sein de travaux pratiques ou de projets. L'acquisition d'une alimentation programmable simulant le fonctionnement d'un panneau photovoltaïque sous un niveau d'irradiance modifiable a dégagé de nouvelles perspectives d'applications pédagogiques. L'implémentation de l'algorithme du MPPT dans un hacheur conçu et réalisé sur place a permis aux étudiants de tester et valider un grand nombre de leurs compétences requises dans le

domaine du génie électrique et de l'informatique industrielle. L'anglais des documents techniques, le traitement analogique et numérique du signal, l'emploi de la CAO électronique, la programmation en langage C, la production d'un rapport final, des présentations orales sont les quelques éléments appliqués.

Les étudiants de la Licence Professionnelle Développement Durable Gestion des Energies vont disposer d'un outil pédagogique leur permettant de visualiser le fonctionnement de l'algorithme Perturbe et Observe qui est intégré dans les onduleurs industriels mais non accessible.

Le hacheur étant opérationnel, il sera connecté au panneau réel A127P placé en extérieur. L'algorithme du MPPT installé dans le microcontrôleur est le plus connu. De nombreuses variantes existent [9]. Elles feront l'objet de développements ultérieurs, notamment l'implémentation d'une autre méthode dite *méthode de conductance incrémentale* afin de comparer les deux algorithmes en terme de rapidité en régime transitoire et de stabilité en régime permanent. L'implémentation de commandes à pas $\Delta\alpha$ variable est également envisagée. Ces développements solliciteront les compétences des enseignants informaticiens, mathématiciens et électroniciens du département.

Un prolongement confié à des étudiants de DUT GEII en projets tutorés ou en projet pluridisciplinaire consistera à équiper en plus le panneau photovoltaïque d'une carte d'acquisition avec transmetteur wifi pour suivre l'évolution de sa production photovoltaïque sur smartphone.

Remerciements

L'Institut Universitaire de Technologie de Valenciennes a mis à la disposition des étudiants et des enseignants ses salles techniques équipées des matériels, ordinateurs et logiciels adéquats. Qu'il en soit ici vivement remercié. Nos remerciements s'adressent également à l'UPHF qui a acquis une licence MATLAB mise à la disposition de tous les étudiants du campus.

Les auteurs remercient le relecteur pour ses remarques pertinentes, critiques et constructives.

Bibliographie

- [1] Robert F., Bécar J.P., Canonne J.C., *Un exemple de projet pluridisciplinaire : Modélisation dynamique et mesures de la course du soleil*, Actes du colloque CNRIUT 07, Thionville, 31 Mai-2 Juin 07
- [2] Robert F., Bécar J.-P., *Plateforme automobile à autonomie augmentée et pilotée sous Zig-Bee*, actes du 10ème colloque sur l'Enseignement des Technologies de l'Information et des Systèmes, Caen, du 20 mars au 22 mars 2013

- [3] Robert F., Baklouti M-A, Ghorbel Firas, *le chariot photovoltaïque autonome*, compte rendu de fin d'études ISET - Sfax, IUT GEII Mai 2013, Valenciennes
- [4] Robert F., Bécar J.P., Transfert de savoir IUT-Entreprise, *Le traqueur solaire voit le jour !* Esprit IUT , numéro spécial recherche, Février 2013 pp 40-42
- [5] Robert F., Bécar J.P., Alexief J.L., Canonne J.C., Vermeiren L., *Prototype de traqueur solaire à deux axes*, Actes du 8ème Colloque sur l'enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes, 8 - 10 mars 2010, Grenoble, France
- [6] Robert F., Bécar J.P., *Contrat d'étude exploratoire (LL 080602) entre la société AXIA, 171 rue Solférino 59000 Lille et Valutec, C3T Université de Valenciennes - Le Mont-Houy 59314 Valenciennes portant sur la conception et le dimensionnement mécanique d'un système support d'un panneau photovoltaïque de 1m² orientable selon 2 axes. 30 Avril 2008.*
- [7] Jalava T. - Satakunta University of Applied Sciences - Pori – Finland- *MPPT Program Development with Matlab* – 2009 – mémoire de stage ERASMUS.
- [8] Joubert de Wet, Melvin Ferreira, *Methodology for the experimental evaluation of MPPT Algorithms*, rapport de stage d'Initiation à la Recherche, CESI d'Arras Juin 2010.
- [9] https://en.wikipedia.org/wiki/Maximum_power_point_tracking