

Annexe 6 : Document d'accompagnement du travail pratique en CPGE PTSI

Exploitation pédagogique basée sur l'étude de
l'installation photovoltaïque avec stockage de 1 MWc

Culture Sciences
de l'Ingénieur

La Revue
3E.I

Édité le
Xx/xx/2026

école
normale
supérieure
paris-saclay

Omar RAMI-YAHYAOUÏ¹

Cette ressource est une annexe à la ressource « Exploitation pédagogique basée sur l'étude de l'installation photovoltaïque avec stockage de 1 MWc » [1] qui fait partie de La Revue 3EI du 2^{ème} trimestre 2026.

TP Module photovoltaïque autonome / CPGE PTSI

TP MODULE PHOTOVOLTAÏQUE AUTONOME

Durée : 6 h (3 séances de 2 h)

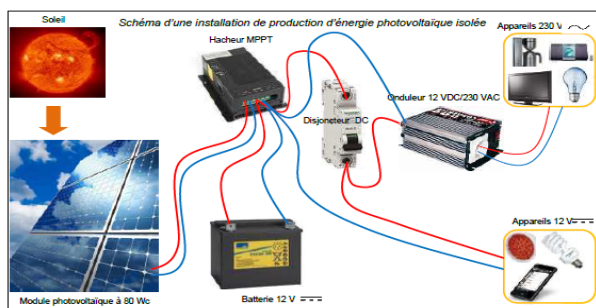
Objectifs :

- Valider le comportement énergétique d'une installation PhotoVoltaïque (PV) autonome par simulation.
- Analyser et comprendre comment favoriser au mieux les échanges d'énergie entre la source PV et sa charge grâce aux caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$.
- Optimiser de façon simulée ces échanges en fixant leur point de fonctionnement à celui maximal de puissance MPPT (Maximum Power Point Tracking), et ce grâce à un hacheur.
- Comparer cette optimisation à une réelle faite par un régulateur industriel, et évaluer les écarts entre les deux.

Compétences visées par le TP dont certains critères sont à auto-évalués à chaque partie :

- A4 : Analyser les performances et les écarts.
- A3 : Analyser l'organisation fonctionnelle et structurelle.
- B1 : Choisir les grandeurs physiques et les caractériser.
- B2 : Proposer un modèle de connaissance et de comportement.
- B3 : Valider un modèle.
- D1 : Mettre en œuvre un système.
- D2 : Proposer et justifier un protocole expérimental.
- D3 : Mettre en œuvre un protocole expérimental.
- E1 : Rechercher et traiter des informations.
- E2 : Produire et échanger de l'information.

Support utilisé : Système « Module Photovoltaïque » dont les constituants sont :



Omar RAMI

Page 1

TP Module photovoltaïque autonome / CPGE PTSI

Contexte :

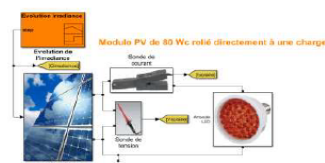
Les systèmes photovoltaïques produisent de l'énergie électrique à partir de l'irradiation solaire. Leur élément de base est la cellule PV. Un panneau PV est constitué de plusieurs cellules raccordées en série et/ou parallèle en fonction de la tension qu'il a à délivrer et/ou le courant absorbé par sa charge.

Par ailleurs, et comme on le verra par simulation, les caractéristiques courant/tension $I=f(V)$ et puissance/tension $P=f(V)$ aux bornes d'un module PV sont non-linéaires car elles dépendent de plusieurs paramètres comme son inclinaison angulaire, son irradiance, la propreté et l'ombrage de sa surface, etc ..., sans compter les conditions atmosphériques (ensoleillement, température, etc ...) qui peuvent aussi accentuer cette non-linéarité.

Ces caractéristiques mettent en évidence un point intéressant : Le point MPPT ou point de fonctionnement à puissance maximale lorsque le panneau alimente une charge. Son positionnement au sommet de celle de $P = f(V)$ est assuré, comme on le verra, grâce à un convertisseur Continu-Continu (ou hacheur) dans le cas d'une installation à module PV autonome. Le choix a été fait de faire cette optimisation grâce à un algorithme de contrôle de type poursuite « P&O » (Perturbation et Observation).

I. Simulation d'un module photovoltaïque grâce à MATLAB, et obtention de ses points de fonctionnement $P = f(V)$.

Nous disposons pour l'instant de la simulation d'un module PV connecté à une charge, et ce comme le montre la figure suivante :



I.1 Ouvrir le fichier MATLAB intitulé « SIMU_MOD » présent dans le dossier « TP PANNEAU PV » de votre répertoire de travail. Grâce à ce dernier, nous allons rechercher le P_{MP} (le Point Maximum de Puissance) avec une température du module de 25°C, et pour une irradiance de 800 W/m².

Proposer un protocole de mesure permettant de tracer les caractéristiques électriques de ce module, à savoir son courant I et sa puissance P transmise à l'ampoule, et ce en fonction de sa tension V .

Omar RAMI

Page 2

Références :

[1]: Exploitation pédagogique basée sur l'étude de l'installation photovoltaïque avec stockage de 1 MWc , O. Rami-Yahyaoui, 2026, https://sti.eduscol.education.fr/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/exploitation-pedagogique-basee-sur-letude-dinstallation-pv-avec-stockage

I.2 Appliquer ce protocole dans le modèle de l'installation PV considéré, et compléter le tableau ci-dessous en le simulant :

[illegible]

Quelle est la tension V permettant d'obtenir la plus grande puissance P_M transmise à la LED par le module PV ?

I.3 Ce point de fonctionnement (V_M , P_M) correspond-il à un maximum de l'une des courbes $P=f(V)$ du document réponse plus bas ?

I.4 Tracer, sur le même document, une droite d'équation $V = 18 \text{ V}$. Placer les points de ses intersections avec les caractéristiques pour différentes irradiances. Que constatez-vous ?

1.5 Quelle(s) solution(s) pourriez-vous proposer pour améliorer le placement de ces points ?

Compétences auto-évaluées	Critères d'évaluation	Oui/Non
B2	Le modèle multiphysique MATLAB donné de l'installation PV a été bien complété et simulé	
B3	L'association de ce modèle aux composants des chaînes fonctionnelles a été menée.	
D2	Le relevé des points de fonctionnement optimaux du modèle multiphysique en fonction de la consommation de sa charge est fait.	
F1	Le protocole choisi répond bien à l'objectif visé. La recherche d'information dans le document d'accompagnement donné du TB a été faite.	

II. Solution pour le placement des points de fonctionnement sur le maximum des caractéristiques $P=f(V)$: Le hacheur MPPT, traqueur des points optimaux de puissance.

Nous allons insérer un hacheur (convertisseur DC/DC) MPPT entre le module PV et la batterie. Le régulateur MPPT va nous permettre, comme on va le voir par simulation sous MATLAB, de soutirer la puissance maximale au module quelle que soit son irradiance.

Nous disposons ainsi toujours du module PV connecté à sa charge, mais cette fois-ci à travers ce régulateur et ce comme le montre la figure suivante :

- Lorsque S_{MLI} est à 1, le transistor est fermé pendant un temps $t_H = \alpha T$.
- Lorsqu'il est à 0, il s'ouvre pendant $t_B = T - t_H = (1-\alpha)T$ (T : Période de hachage).

II.1.1 Donner la forme d'onde de la tension instantanée v aux bornes du module, sachant que $E = \text{Cste}$ (on considère l'irradiance fixée à une certaine valeur, et une chute nulle dans l'inductance de $23 \mu\text{H}$) :



II.1.2 Grâce à la méthode des aires, donner la valeur moyenne $V = \langle v \rangle$ en fonction de E , V_{oc} et α (Tension en circuit ouvert, « Open Circuit », du module pour une irradiance de 800 W/m^2).

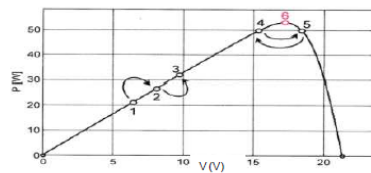
$$Y =$$

II.1.3 En déduire son expression en fonction de α , sachant que $E = 12 \text{ V}$.

$$Y =$$

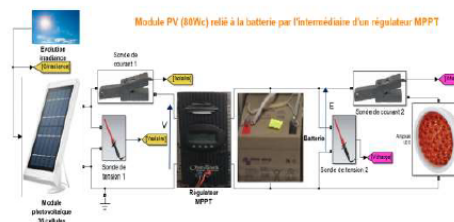
II.2 Principe d'une régulation MPPT réalisée grâce à un algorithme :

La commande MPPT consiste à déplacer le point de fonctionnement (V, P) de la caractéristique $P = f(V)$ en fonction du signe de sa dérivée $f'(V)$ afin de le placer au point (V_M, P_M) comme le montre la figure suivante :



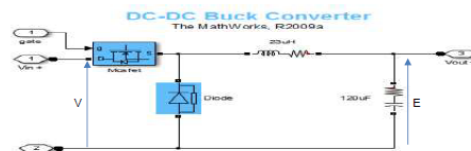
Au final, il va osciller, en temps réel, autour de la puissance maximale.

Compléter l'algorithme P&O du fonctionnement de la commande MPPT suivant (k : Indice de l'échantillon de mesure actuel, et $k-1$ celui de la mesure précédente) :



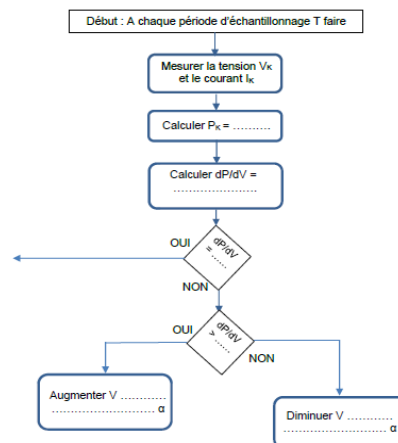
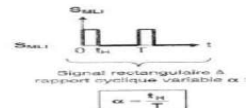
II.1 Principe de fonctionnement général d'un hacheur « dévolteur » :

L'objectif général du hacheur « dévoltageur » (ou « buck » en anglais) est de découpler la tension de sortie V du module PV de la fem E de la batterie, et ce afin d'assurer ensuite V indépendamment des fluctuations de la charge et de l'irradiance sur le module, et du coup d'être donc toujours, à travers un algorithme, au Point de fonctionnement Maximum de Puissance (PMP). Pour ce faire, il est obligatoire de rajouter un étage de puissance grâce à un convertisseur DC/DC ou hacheur. Ce dernier est un convertisseur de puissance qui, dans notre application, est de type abaisseur, et dont la structure générale est la suivante :



Hypothèses d'étude :

- Le transistor MOSFET et la diode seront considérés comme des interrupteurs idéaux, et qui fonctionneront en cellule de commutation (quand l'un est ouvert l'autre est fermé, et vice-versa).
- Le MOSFET est commandé en tension, à travers une carte, par un signal S_{MI} .
Modulé en Largeur d'Impulsions, et de rapport cyclique α , dont la forme d'onde est :



II.3 Lancer maintenant le fichier de simulation intitulée « SIMU_MOD_MPPT_BAT » présent aussi dans le dossier « TP PANNEAU PV » :

II.3.1 Compléter de la même façon l'implémentation de votre algorithme en entrant dans le bloc « Régulateur MPPT » -> « Sml1 » -> « Programme P&O ».

II.3.2 Lancer la simulation. Ensuite, pour chaque irradiance, relever la puissance maximum $P_{MP} = V_{MP}.I_{MP}$ transmise par le module à la batterie et à la charge en complétant de nouveau le tableau ci-dessous :

G (W/m ²)	0	200	400	600	800	1 000	1 200
P _{MP} (W)							

II.3.3 Vérifier, sur les caractéristiques $P = f(V)$ plus bas, que les points de fonctionnement prélevés précédemment se situent bien aux P_{MP} . Donner aussi les valeurs des courants I_{MP} et des tensions V_{MP} correspondants.

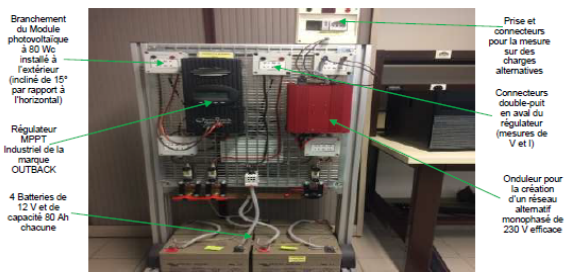
II.3.4 Conclure quant à l'efficacité d'une poursuite du point maximal de puissance de type MPPT avec l'algorithme « P&O ».

Compétences auto-évaluées	Critères d'évaluation	Oui/ Non
B2	La modélisation des convertisseurs statiques d'énergie a été bien appréhendée.	
B3	Le placement de ces points sur le maximum de ses caractéristiques est réalisé. L'implémentation d'un algorithme d'optimisation simulé est faite.	

III. Mesure des puissances réelles de fonctionnement en fonction de l'irradiance solaire G et évaluations des écarts entre celles simulées et mesurées.

III.1 Tracé des caractéristiques réelles en charge $I=f(V)$ et $P=f(V)$ du système « Module PV îloté »

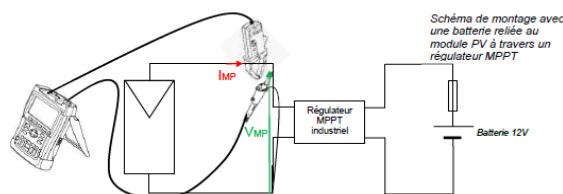
Vous avez à votre disposition le système « Module PhotoVoltaïque îloté » dont une photographie avec ses éléments constitutifs est la suivante :



Faire des mesures en suivant un protocole expérimental équivalent à celui qui a été suivi lors de la sous-partie I.1, et ce afin de tracer tout d'abord les mêmes caractéristiques mais cette fois-ci réelles, $I = f(V)$ et $P = f(V)$, grâce à ce système didactique.

III.2 Mesure des puissances de fonctionnement avec un régulateur MPPT additionnel :

Mesurer toujours le courant I_{MP} et la tension aux bornes du module V_{MP} en suivant le nouveau protocole de mesure suivant :



Ensuite, pour chaque irradiance, relever à 10 minutes d'intervalle la puissance maximum $P_{MP} = V_{MP} \cdot I_{MP}$ transmise par le module à la batterie en complétant le tableau ci-dessous :

G (W/m ²)	200	400	600	800	1 000
P _{MP} (W)					

III.3 Placer, comme pour le cas simulé, les points M_{MP} de votre étude expérimentale, et vérifier qu'ils se superposent à peu près sur ceux de la modélisée.

III.4 Evaluation des écarts relatifs entre l'optimisation simulée et réelle.

Calculer les écarts relatifs, en complétant le tableau ci-dessous, entre les puissances P_{MP} simulées du modèle MATLAB et réelles provenant des résultats de mesures précédents effectuées sur l'installation PV avec un régulateur MPPT industriel :

G (W/m ²)	200	400	600	800	1000
P _{MPs} (W)					
P _{MPR} (W)					
Écarts relatifs (%)					

III.5 Conclure quant à la validité de ce modèle par rapport à une optimisation réelle.

Compétences auto-évaluées	Critères d'évaluation	Oui/ Non
A3	Le placement réel des points optimaux du système est réalisé.	
A4	L'évaluation de l'écart entre l'optimum réel et simulé est faite.	
B1	L'identification et la mesure réelles des grandeurs physiques en faisant varier la charge de la maquette du système sont faites.	
D1	La mise en œuvre réelle de l'installation PV complète a été faite suivant un protocole	
D2	Le choix de la grandeur physique à mesurer avec le capteur ou l'appareil de mesure correspondant a été bien mené.	
D3	Le protocole expérimental mis en œuvre suit bien la démarche scientifique imposée par l'énoncé du TP à suivre.	

