

Ce TP en distanciel est à préparer et à rendre à l'adresse suivante : vboitier@laas.fr

Objectifs de ce TP :

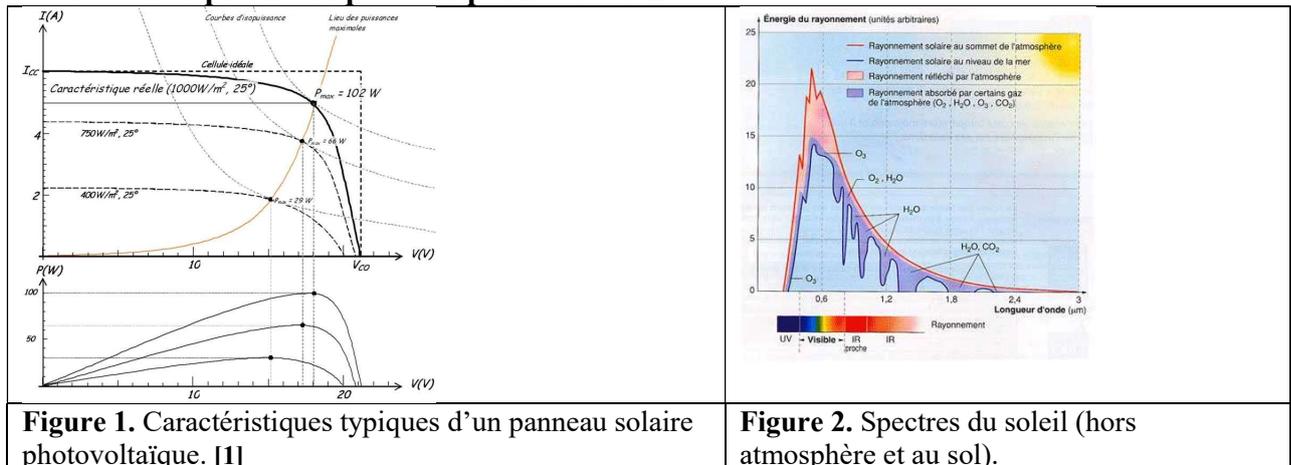
- analyser les caractéristiques de modules photovoltaïques de différentes technologies.
- comprendre comment l'irradiance, la température, les ombres modifient ces caractéristiques.
- comprendre l'intérêt d'intercaler un convertisseur DC/DC entre le générateur photovoltaïque et la charge continue.
- analyser les fonctionnalités d'un régulateur du commerce.

Les trois panneaux étudiés seront : panneau photowatt PW6-110 **multicristallin**, Free Energy Europe FEE-5-12C **amorphe** souple, Solbian SP 50L **monocristallin** cellule technoback contact, doc fournies en fichiers joint.

Les parties avec un trait sur la gauche attendent une réponse de votre part.

1. RAPPEL ET COMPLEMENTS SUR LES PANNEAUX SOLAIRES PV

a/Caractéristique théorique d'un panneau solaire.



La partie supérieure de la figure 1 donne la forme des caractéristiques $I(V)$ d'un panneau solaire pour différents ensoleillements (exprimés en W/m^2). La partie inférieure présente les caractéristiques $P(V)$ correspondantes. Un panneau se comporte comme un générateur de tension près de la tension de circuit-ouvert et comme un générateur de courant près du courant de court-circuit. Différents spectres solaires sont donnés figure 2.

b/ Notations :

Courant de court-circuit : I_{sc} (A),

Tension de circuit ouvert : V_{oc} (V)

Ensoleillement (ou irradiance): G (W/m^2). Une irradiance de $1000 W/m^2$ est obtenue à Toulouse vers midi au mois de juin, il est rare d'avoir plus (cf figure 5).

AM: Air Masse (précise les conditions spectrales d'ensoleillement). Le spectre du soleil (cf figure 2) à la surface de la Terre dans les conditions standard est noté AM 1,5. AM 0 correspond au spectre du soleil hors atmosphère et AM 1 au spectre du soleil au zénith. Si on note φ , l'angle d'élévation du soleil (azimut), on a approximativement :

$$AM = \frac{1}{\sin(\varphi)} \quad \text{Eq. 1}$$

Soit $\varphi = 42^\circ$ pour $AM = 1,5$ *Température* : T (°C) *STC*: Standard Test Conditions : (1000 W/m², AM1,5 , 25°C). La fiche technique d'un panneau donne ces performances dans les STC.

Puissance max : P_{MAX} (W)

Puissance crête : P_C (P_P). (W_C -Watt crête- ou W_P -Watt peak-) P_{MAX} récupérée dans les STC.

Facteur de forme : FF
$$FF = \frac{P_{MAX}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \quad \text{Eq. 2}$$

c/ Influence de l'irradiance :

A partir de la figure 3 (si nécessaire, la même figure est donnée en plus grand dans le document *doc_panneaux_rigides_PW110.pdf* joint avec ce TP), relever le courant de court-circuit pour les différentes irradiance. Tracer, soit sur Excel soit sur une feuille $G = f(I_{sc})$? NB il est évident que si $G=0$ alors $I_{SC}=0$, rajouter ce point. Que pouvez-vous en conclure ? En donner un modèle mathématique simple ?

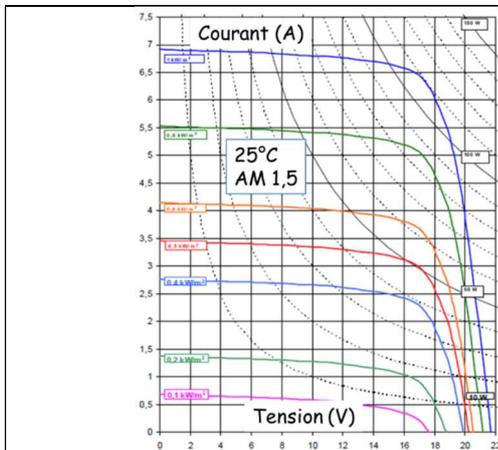


Figure 3. Caractéristiques I(V) du panneau Photowatt PW6 pour différentes irradiances.

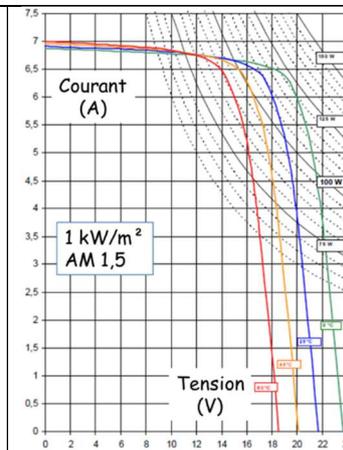


Figure 4. Caractéristiques I(V) du panneau Photowatt PW6 pour différentes températures.

Le soleil est aussi une grandeur variable sur la journée comme le montre la figure 5.

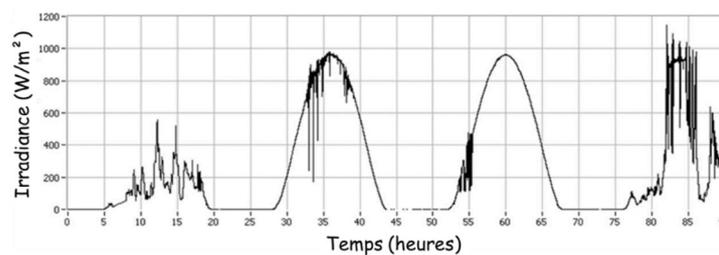


Figure 5. Relevé de l'irradiance à Toulouse entre le 11 juin 0h et le 14 juin 17h 2009 -données fournies aimablement par le Laboratoire d'Aérodologie de Toulouse-.

d/ Influence de la température :

La figure 4 montre l'influence de la température.

Quantitativement, dans le cas du panneau PW6-110 (Tab 1), le courant de court-circuit augmente d'environ $\alpha = 2,085 \text{ mA}/^\circ\text{C}$ et la tension de circuit ouvert décroît de $\beta = -79 \text{ mV}/^\circ\text{C}$.

La baisse globale de puissance est d'environ $\gamma = 0,43 \text{ \%}/^\circ\text{C}$. Ainsi, plus la température augmente et moins la cellule est performante.

On rappelle :

$$I_{SC}(T) = I_{SC}(25) + \alpha \cdot (T - 25)$$

$$V_{OC}(T) = V_{OC}(25) + \beta \cdot (T - 25)$$

$$(P_{MAX}(T) - P_{MAX}(25)) / P_{MAX}(25) = \gamma \cdot (T - 25)$$

2. ANALYSE DE LA DOC DU PANNEAU PW6-110

Un des panneaux que vous allez utiliser est un Photowatt PW6-110 avec **90 Wc**.
 Ce panneau est composé de 4x9 cellules polycristallines chacune de 150 mm x 150 mm.
 La taille du panneau est de 1424 mm x 655 mm x 45mm
 Le tableau ci-dessous donne ses spécifications techniques : (**colonne 90 W** pour puissance typique).

CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES				
PW6-110		Configuration 12 V		
Puissance typique	W	90	100	110
Puissance minimale	W	85	95,1	105,1
Tension à la puissance typique	V	16,4	16,7	17,2
Intensité à la puissance typique	A	5,5	6,0	6,4
Intensité de court circuit	A	6,1	6,5	6,9
Tension en circuit ouvert	V	21,1	21,5	21,7
Tension maximum du circuit	V	1000V DC		
Coefficients de température		a = +2,085 mA/°C ; β = -79 mV/°C ; γ P/P = - 0,43 % /°C		
Spécifications de puissance à 1000 W/m ² : 25°C : AM 1,5				

Tableau 1 Extrait de la notice technique du panneau Photowatt PW6.

Pour le panneau PW6-110 déjà présenté avec une puissance de **90 Wc**, tracer les courbes théoriques $I(V)$ et $P(V)$ et rappelez sur les figures les grandeurs importantes et leurs valeurs.
 Calculez dans les STC : η_{PV} , FF:

Un jour de beau temps ($G=1000 \text{ W/m}^2$), la température est de 60°C sur ce panneau, quelle est la perte de puissance par rapport aux STC exprimée en %. Quelle sera la puissance max?

3. EXPERIMENTATIONS

On a fait des relevés sur des panneaux de différentes technologies.

a/ Relevé des caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ avec un traceur.

Le schéma de câblage est le suivant :

On relie le + du panneau au + du traceur (Langlois, VA200), le - du panneau au - du traceur. Il faut aussi à proximité un capteur de lumière (pyranomètre SP-Lite2 ou autre) et un thermomètre pour mesurer la température ambiante et la température à la surface des panneaux. La Figure 6 ci-dessous montre les panneaux testés.

Sur cette photo, la mesure de l'irradiance vue par le panneau est-elle correctement mesurée?

Les étudiants sont-ils bien placés par rapport au panneau ? Comment devraient-ils se placer pour ne pas fausser la mesure ?

La suite du texte vous guide pour les réponses à apporter.

Si l'on n'a pas de traceur, donner une solution technique permettant de relever la caractéristique $I(V)$ du panneau solaire. En faire un schéma de votre solution en incluant les appareils de mesures nécessaires.



Figure 6. Les 3 panneaux utilisés et les dispositifs de test.

Pour faire un relevé $I(V)$ et $P(V)$

Brancher le panneau au traceur en suivant la notice du traceur.

Brancher le traceur, mise en marche, puis Autoscan, touche I/V pour avoir $I(V)$ et non $V(I)$ si nécessaire. Attendre la fin du relevé et prendre une photo de la courbe et des mesures associées.

Vous ne ferez pas d'ombre sur le panneau. Si vous êtes trop près du panneau, vous modifiez le rayonnement diffus vu par le panneau => s'éloignez si possible du panneau.

Mesure de l'irradiance : Le pyranomètre est dans le même plan que le panneau.

Il est important d'effectuer les relevés à ensoleillement constant. Si le ciel est sans nuage, cela ne pose pas de problème, si le ciel est nuageux les changements d'irradiance sont rapides même si l'on ne le ressent pas "à l'œil"!

Il faut noter l'irradiance en début et en fin de relevé pour voir si elle a peu bougé. Si elle a trop bougé: refaire la manipulation.

Vous utiliserez le Splitte (sortie analogique) ou directement un pyranomètre à affichage numérique.

Mesure de la température: On utilise un thermocouple relié à un multimètre pour une lecture directe de la température.

a-1 Mesures de base (3 relevés)

Pour les 3 technologies de panneaux disponibles, on a fait les relevés (cf annexe) $I(V)$ et $P(V)$, le panneau étant face au soleil.

Relever sur les photos disponibles en annexes pour chaque technologie : V_{OC} , I_{SC} et P_{opt} , $V_{@P_{MAX}}$, $I_{@P_{MAX}}$, G , T_{amb} , $T_{panneau}$.

Présenter ces résultats sous forme d'un tableau.

Lorsque l'on fait ces essais, il faut aussi noter le jour, l'heure, les dimensions du panneaux l'irradiance, la température du panneau, la température ambiante et les conditions météorologiques (vent, nuages, pluie...)

a-2 Effet des ombrages (5 relevés).

Pour cette partie on utilise le panneau Polycristallin PW500 de la figure ci-dessous sur lequel on peut connecter ou non les diodes bypass (à l'aide de connecteurs amovibles). Sa documentation est donnée en annexe, $P_{max@STC} = 45Wc$ pour ce panneau.



Figure 7. Panneau PW500 polycristallin avec 2 diodes bypass amovibles dans la boîte de jonction .

Vous trouverez en annexes les relevés suivant :

Relevé initial : le panneau est orienté face au soleil, sans ombre dessus.

Puis, un relevé en cachant une cellule avec un carton noir de préférence (celle en bas à droite), puis en cachant deux cellules, (celle en bas à droite et celle en bas à gauche).

Puis, en déconnectant les diodes bypass.

Les mesures d'un groupe d'étudiants pour cette partie sont données en annexe. Vous disposez en plus d'un relevé avec des ombrages partiels ou totaux.

a-3 Effet de la température.

Vous trouverez en annexe les relevés suivant :

Relevé initial : le panneau est sous un carton (et donc à température ambiante). On enlève le carton et on démarre le relevé. Il est fait à température ambiante.

Deuxième relevé : Après 5 à 10 minutes, panneau en plein soleil on refait un relevé.

La température du panneau est mesurée avec un thermocouple fixé sur la partie supérieure du panneau pour avoir une idée de la température des cellules.

4. EXPLOITATION DES MESURES:

Mesures de base

Pour les courbes relevées sans ombrage, tracez l'allure des courbes $I(V)$ et $P(V)$.

Calculer FF , η_{PV} (rendement du panneau) et η_{Cell} (rendement de la cellule solaire)

Relier ces valeurs aux valeurs fournies par la documentation. (Les documentations des panneaux vous sont fournis en fichier joint). Les résultats sont-ils cohérents ?

Effet des ombrages

Analyser les courbes avec effet d'ombrage, avec ou sans diode bypass et avec ombrages partielles.

Calculer les coefficients α, β, γ et comparer avec les valeurs données dans la doc du panneau PW500.

5. CONVERTISSEUR DC/DC

On souhaite montrer dans cette partie les fonctionnalités courantes d'un régulateur de charge solaire. Le régulateur est interconnecté entre le générateur photovoltaïque, la batterie et la charge.

Etude préparatoire

En annexe, vous trouverez la fiche technique du solarix MPPT 1010 de STECA.

A partir de cette doc et de la doc fournie en annexe, retrouvez les fonctionnalités d'un tel chargeur.

Pour vous aider :

- Quels sont les mode de charges : MPPT, tension constante, tension constante, courant constant ?

- Que signifie pour la batterie les charges types floating, bulk ou equalization ?

- Quelles sont les protections indispensables pour la batterie ?

- Il fait beau, la batterie n'est pas pleine, la tension du panneau sera-t-elle égale à la tension de batterie ?

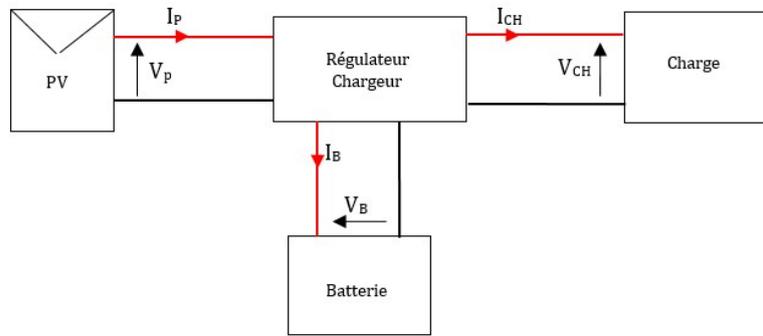
- La nuit le régulateur consomme-t-il ? est-ce gênant ?

Mise en œuvre.

Peut-on utiliser le régulateur **solarix MPPT1010** avec un panneau PW6-110, la batterie **UCG 100-12 12V 100AH** (cf doc en annexe) et la lampe proposée ci-dessous. (niveaux de tension, de courant ?)

Je souhaite récupérer 2 fois plus de puissance, je dois mettre les 2 panneaux en série ou en parallèles ou les deux solutions sont possibles, expliquez.

Faire le schéma sur le papier: PV- régulateur – batterie – charge, en rajoutant les voltmètres et ampèremètres nécessaires pour visualiser les tensions et les courants (6 appareils nécessaires)



Impossible de faire les questions suivantes à distance, cette partie n'est donc pas à faire.

Branchement : avec l'enseignant (un seul panneau et batterie de 12V)

Mesures :

Bon fonctionnement ? (Partage du courant)

Quel type de commande ? (PWM avec ou sans MPPT ? régulateur série ou parallèle ?)

Rendement ?

Consommation à vide ? Consommation la nuit.

Que se passe-t-il si la batterie est trop chargée ? (pas toujours réalisable)

ANNEXE DOC D'UNE LAMPE LED

<https://www.solarboutik.com/home/563-ampoule-led-12v-24v-3w-e27.html>

	<p>AMPOULE LED 12V 24V 3 WATTS E27 Ampoule idéale pour l'éclairage des sites isolés alimentés par batteries 12V ou 24V. Bateau, cabane de pêche ou chasse, abri de jardin... Culot : E27 Puissance : 3W Flux lumineux : 320lm (+ ou - 10%) Température de couleur : 2700-3200K (Blanc chaud) Fonctionne en 12V et 24V / 13,20 € TTC</p>
---	---

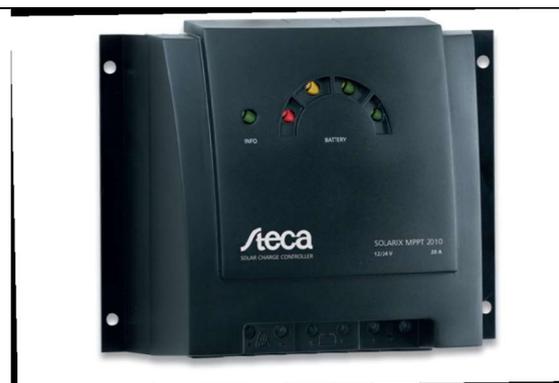
Extrait de la doc du SOLARIX de STECA.

Disponible sur : http://www.stecasolar.com/index.php?Steca_Solarix_MPPT_fr

Steca Solarix MPPT

MPPT 1010, MPPT 2010

Steca Solarix MPPT est un régulateur de charge solaire avec la fonction MPP Tracking. Il convient parfaitement à toutes les technologies de panneaux solaires courants et est idéal pour les systèmes solaires avec des tensions de panneaux solaires plus élevées que celle de la batterie. Le Steca Solarix MPPT est particulièrement adapté pour l'utilisation avec des panneaux solaires normalement prévus pour les installations couplées au réseau. L'algorithme perfectionné de la fonction « MPP Tracking » de Steca permet de disposer constamment de la puissance utile maximale du panneau solaire. Grâce à sa technologie de pointe, le Steca Solarix MPPT garantit une puissance maximale dans toutes les conditions d'utilisation, une protection professionnelle de la batterie, un design moderne et des fonctions de protection exceptionnelles.



Caractéristiques du produit

Dispositif de poursuite du point de puissance maximale (tracker MPP)

Régulation de tension et de courant

Régulation MLI

Déconnexion de consommateurs en fonction du courant

Reconnexion automatique du consommateur

Compensation de température

Charge d'entretien mensuelle

Fonctions de protection électroniques

Protection contre les surcharges

Protection contre les décharges profondes

Protection contre une polarité inversée des panneaux solaires, des consommateurs et de la batterie

Protection contre une polarité inversée par fusible interne

Protection contre les courts-circuits

Protection contre les surtensions sur l'entrée du panneau solaire

Protection contre circuit ouvert sans batterie

Protection contre courant inverse pendant la nuit

Protection contre surtempérature et surcharge

Déconnexion en cas de surtension de la batterie

Affichages

Afficheur à DEL multifonction

DEL multicolore

5 DEL indiquent les états de service

pour le service, l'état de charge, les messages de dysfonctionnement

Options

Fonction éclairage nocturne d'origine ou Steca PA RC 100 réglable

Paramétrage des valeurs de fonction via le Steca PA RC 100

Sonde de température externe

Certificats

Conforme aux normes européennes (CE)

Conforme à la directive RoHS

Fabriqué en Allemagne

Développé en Allemagne

Fabriqué selon les normes ISO 9001 et ISO 14001

	MPPT 1010	MPPT 2010
Caractérisation des performances de fonctionnement		
Tension de système	12 V (24 V)	
Puissance nominale	125 W (250 W)	250 W (500 W)
Efficacité max.	> 98 %	
Consommation propre	10 mA	
Côté entrée DC		
Tension MPP	15 V (30 V) < V _{panneau} < 75 V	15 V (30 V) < V _{panneau} < 100 V
Tension à vide du panneau photovoltaïque (à la température de service minimale)	17 V ... 75 V (34 V ... 75 V)	17 V ... 100 V (34 V ... 100 V)**
Courant du panneau	9 A	18 A
Côté sortie DC		
Courant de charge	10 A	20 A
Courant du consommateur	10 A	
Tension finale de charge*	13,9 V (27,8 V)	
Tension de charge rapide*	14,4 V (28,8 V)	
Charge d'égalisation*	14,7 V (29,4 V)	
Point de référence de réenclenchement (LVR)*	12,5 V (25 V)	
Protection contre la décharge profonde (LVD)*	11,5 V (23 V)	
Conditions de fonctionnement		
Température ambiante	-25 °C ... +40 °C	
Installation et construction		
Borne de raccordement (à fils fins / à un fil)	16 mm ² / 25 mm ² - AWG 6 / 4	
Degré de protection	IP 32	
Dimensions (X x Y x Z)	187 x 153 x 68 mm	
Poids	900 g env.	

* regardez options

Données techniques à 25 °C / 77 °F

**ATTENTION

Si la tension à vide du panneau photovoltaïque raccordé dépasse 100 V, le régulateur sera détruit. Lors de la sélection du panneau photovoltaïque, veillez à ce que la tension à vide ne dépasse jamais 100 V sur toute la plage de température. En cas d'utilisation de panneaux photovoltaïques dont la tension à vide max. (sur toute la plage de température) est comprise entre 75 et 100 V, l'ensemble de l'installation doit être réalisée selon la classe de protection II.

4. ANNEXE .MESURES AVEC LES TROIS PANNEAUX ETUDIES

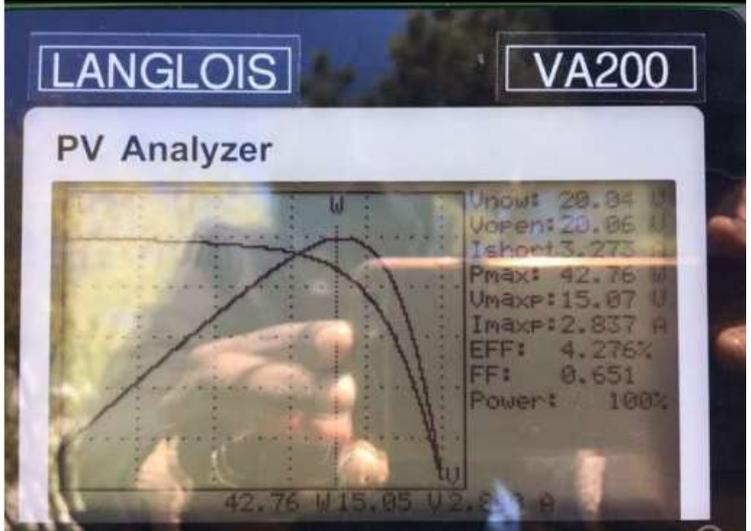
Voici un relevé des mesures faites par un groupe d'étudiants pour les 3 panneaux considérés. Ce relevé a été réalisé un jour de beau temps avec du vent. Les mesures ont été faites avec les panneaux à plat, le 19/04/2019 , :

	Solbian SP50L	PW6-110	FEE 5-12-C
Voc (V)	9,82	20,2	22,31
Isc (A)	4,73	4,97	0,27
Pmax (W)	33,91	61,12	3,85
V@pmax	7,78	15,88	16,91
I@pmax	4,29	3,84	0,22
G (W/m ²)	770	780	770
Tpanneau (°C)	47	48	46
Tamb (°C)	21	21	21

Tableau 2. Mesures expérimentales

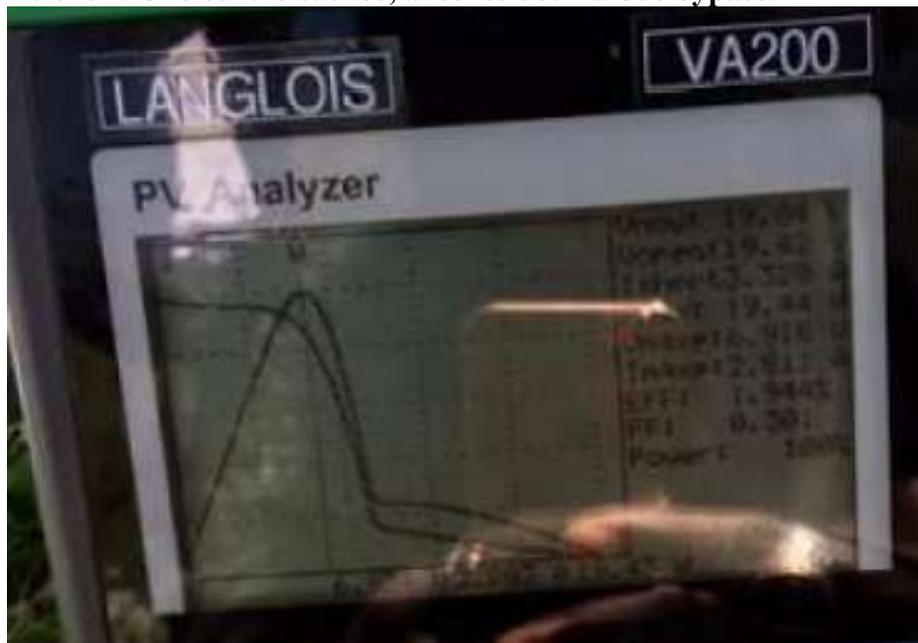
4. ANNEXE OMBRAGE partie 1.

Voici un relevé des mesures faites par un groupe d'étudiants avec le panneau PW500. Mesures réalisées par des étudiants le 05 avril 2019

<p>Mesure de l'irradiance : Irradiance mesure = 1031 W /m² Mesure de température : Température ambiante =19°c Température des panneaux=38°c</p>	<p>Relevé 1. Pas d'ombrage (avec ou sans diode bypass)</p>  <p>Relevé initial sans ombrage.</p>
--	---

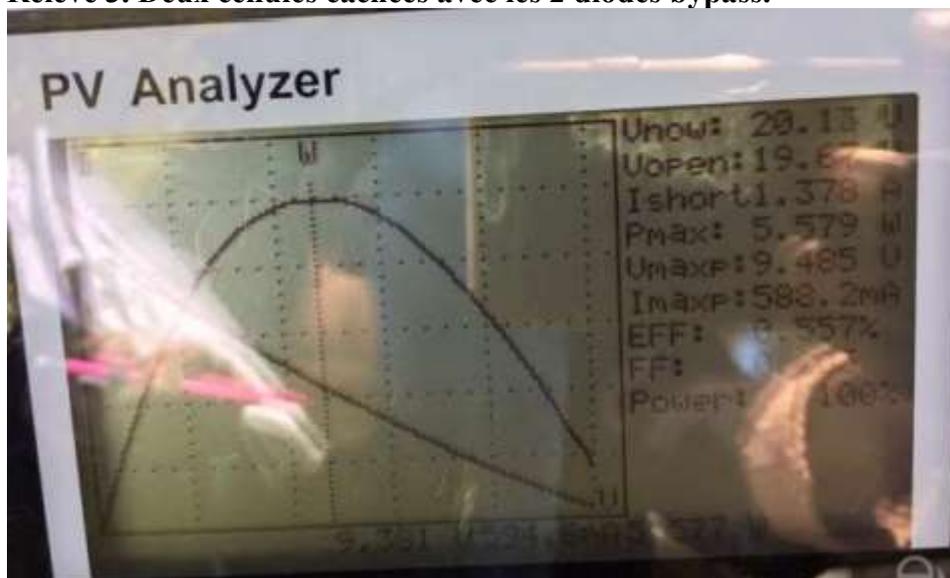
Sur la figure on prend en compte les valeurs Vopen = Voc, Ishort, Pmax, Vmaxp, Imaxp, la grandeur EFF n'a aucun sens car l'appareil ne connaît ni l'irradiance ni la surface du panneau
On obtient les même courbes avec ou sans les diodes bypass.

Relevé 2. Une cellule cachée, avec les deux diode bypass.



Panneau avec diodes bypass, la cellule en bas à droite est cachée.
On a $V_{open} = 19,42V$, $I_{sc} = 3,32A$, $P_{max} 19.98W$

Relevé 3. Deux cellules cachées avec les 2 diodes bypass.

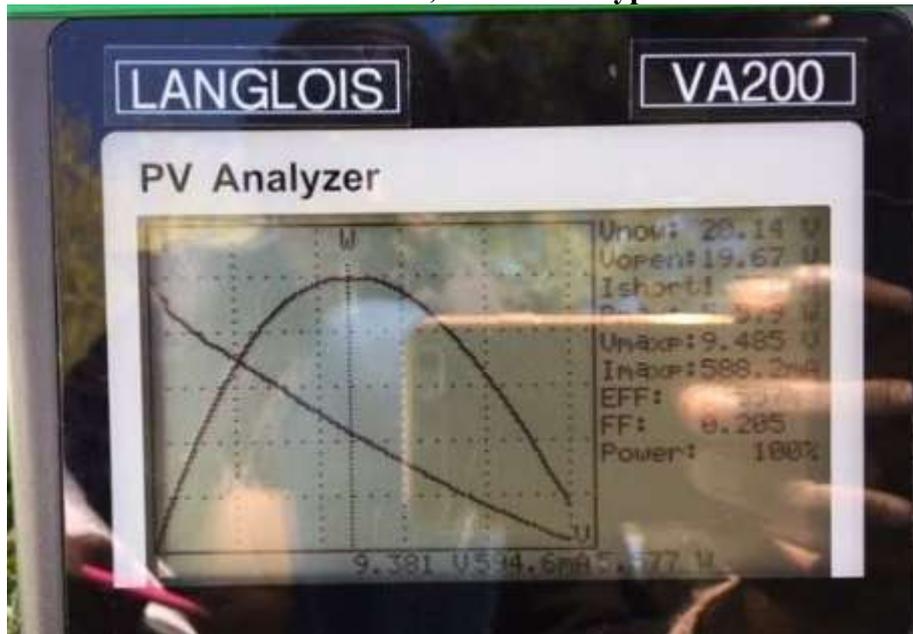


Panneau avec diodes bypass, 2 cellules sont cachées : celle en bas à droite et celle en bas à gauche.

On a $V_{open} = 19,67V$, $I_{sc} = 1,378A$, $P_{max} 5,579W$.

Remarque importante : les deux cellules cachées n'appartiennent pas au même groupe de cellule. Il y a 18 cellules pour une diode bypass et les 18 autres sont en parallèles avec une autre bypass, cela fait deux groupes de cellules.

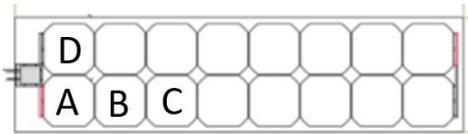
Relevé 3. Deux cellules cachées, sans diode bypass.



Le panneau sans diodes bypass est orienté face au soleil en cachant la cellule du bas à droite

4. ANNEXE OMBRAGE partie 2

Mesures réalisées le 04/07/2018 sur un panneau SP50L



Les ombres totales sont faites avec un carton, les ombres de la moitié des cellules sont faites « à l'œil » en déplaçant le carton pour avoir un masque d'une demi cellule.

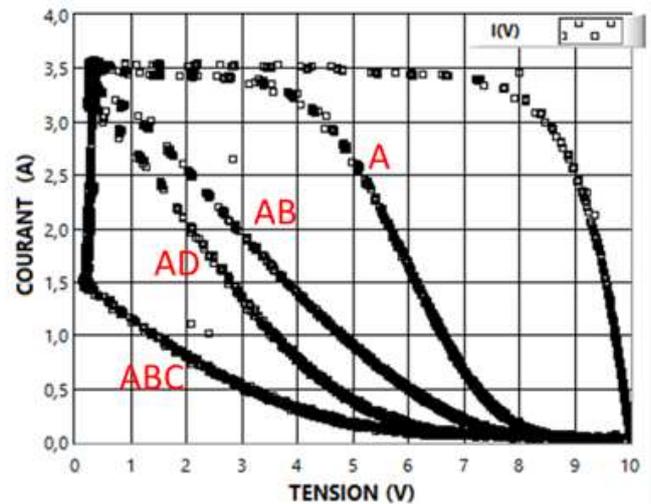
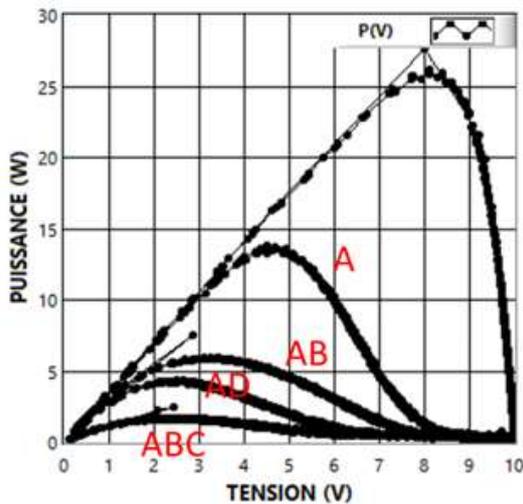
Mesures faites vers 10h30, environ 30°C de temp extérieure, panneaux laissés au soleil sur bâti alu => pas froid ! pour qu'ils soient tous à la même température (environ 40°C mais pas fait de mesures)

PANNEAU +- n° de série : 8762026819 38800053

Ombrages cellules entières

Pas ombrage, puis A, AB, ABC, AD

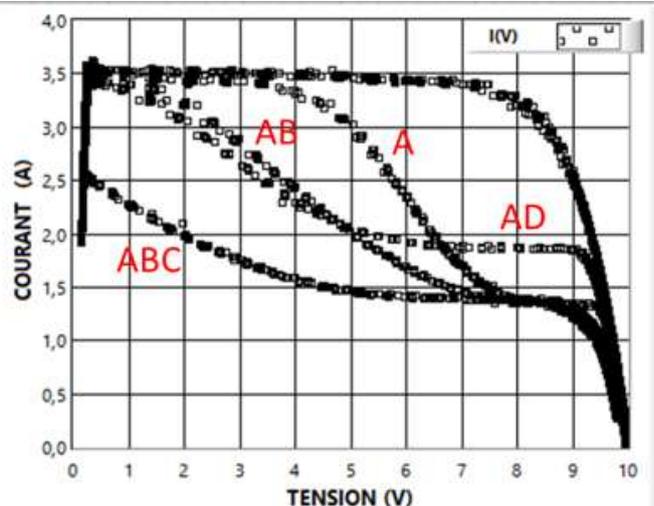
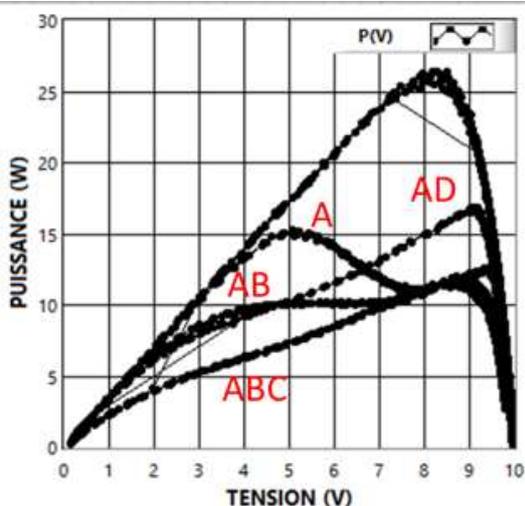
G = 640 W/m² constant. Rend max module 12,8%



PANNEAU +- Ombrages : par ≈1/2 cellules entières

no ombrage, A, AB, ABC, DA, puis no ombrage

G = 640 W/m² constant.



4. ANNEXE Effet de la température



Panneau PW500 utilisé avec diodes bypass.

Le panneau est installé face au soleil. Il est initialement caché du soleil par un carton, il est donc à température ambiante (30°C car mesures faites en juillet). On enlève le carton et on fait une première acquisition. 10 minutes plus tard, quand la température c'est stabilisé à 51°C, on refait une acquisition. La température est mesurée avec un thermocouple collé à la surface vitrée du panneau, ce n'est pas la température exacte des cellules, mais cela donne une mesure voisine de cette température.

Module PW500		
Température	30	51
G (W/m ²)	925	883
Voc (V)	20,3	19
Isc (A)	3,34	3,37
Pmax (W)	44,00	39,30