

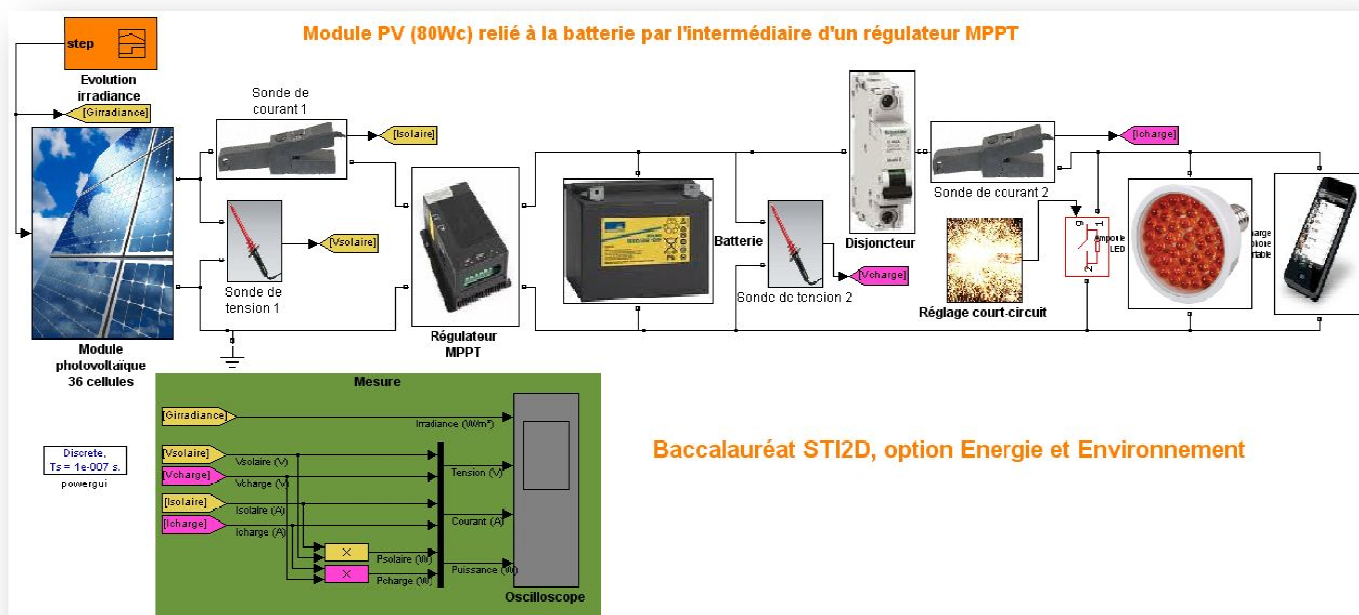


Sciences et technologies

de l'Industrie et du développement durable

Spécialité : Energie et Environnement

Installation photovoltaïque autonome



Objectifs

- Définir la chaîne d'énergie d'une installation photovoltaïque autonome.
- Valider le comportement énergétique d'une installation photovoltaïque autonome par simulation et comparaisons des résultats avec des expérimentations sur site.
- Analyser, comprendre et optimiser les échanges d'énergie entre la source et la charge par simulation.
- Valider par simulation la protection de la charge contre les surcharges et les courts-circuits.

Contexte

Les installations photovoltaïques autonomes sont de plus en plus nombreuses, nous les trouvons :

- Dans des installations isolées où le réseau est inaccessible : plaisance, camping, chalet en montagne, bouée en mer, station météo...
- Dans des installations où l'énergie PV est suffisante et évite de creuser des tranchées pour les relier au réseau : horodateurs solaires, panneaux de signalisation, bornes lumineuses solaires, lampadaires...
- Applications spatiales, alimentation des satellites, station spatiale internationale
- Applications dans le domaine de la recherche : voiture solaire, avion solaire...

Outils

- Matlab Simulink avec :
 - SimElectronics
 - SimPowerSystems
 - Stateflow
- Dossier ressource
- Vidéos flash sur la présentation des modèles Matlab
 - Presentation_Simulation_Matlab_Partie1 (durée 5 minutes)
 - Presentation_Simulation_Matlab_Partie2 (durée 10 minutes)

Pour les essais sur site :

- Un module photovoltaïque mono ou polycristallin
- Une batterie solaire
- Un rhéostat de 100Ω
- Un solarimètre
- Un thermomètre infrarouge
- Un tableur
- Multimètre et pince Ampéremétrique RMS
- Un régulateur MPPT

Durée

Activité 1 : Approche fonctionnelle → 1 heure

Activité 2 : Etude d'une installation solaire photovoltaïque autonome sur site → 2 heures

Activité 3 : Simulation d'une installation solaire photovoltaïque autonome → 1 heure 30

Activité 4 : Simulation d'un court-circuit sur une batterie → 0 heure 30

Activité 5 : Rédiger des documents pour les élèves → 1 heure

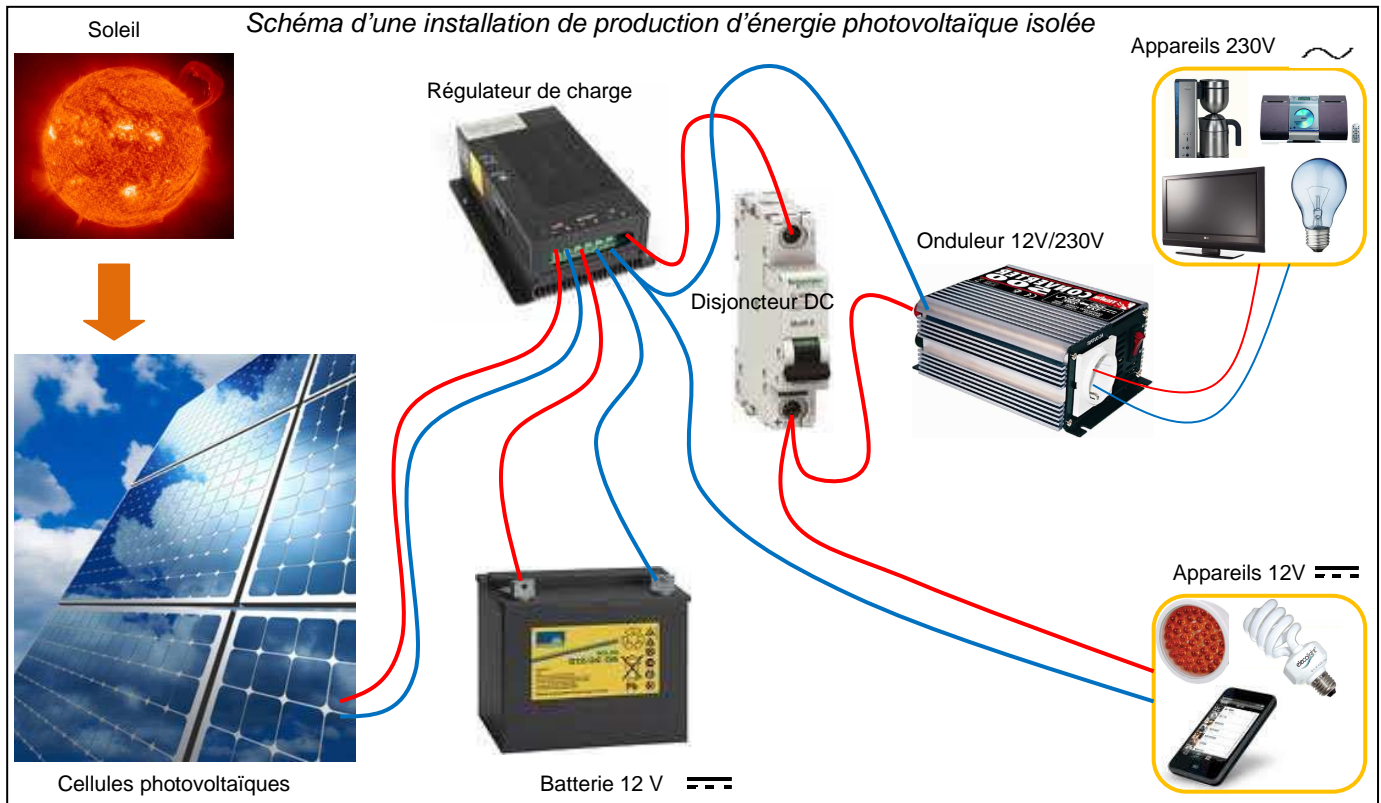
6 heures sont nécessaires pour effectuer le TP complètement, 4 heures si la partie expérimentation sur site n'est pas effectuée.

Pré-requis

Les enseignements transversaux avec notamment :

- ET21 : Constituants d'un système
 - Module ET212 : Produire, stocker et distribuer l'énergie électrique
- ET24 : Modèle de comportement d'un système
 - Module ET243 : Simulation comportementale
 - Module ET244 : Validation de performance/ Mesure d'écart modèle /réel.

ACTIVITE 1 : Approche fonctionnelle.

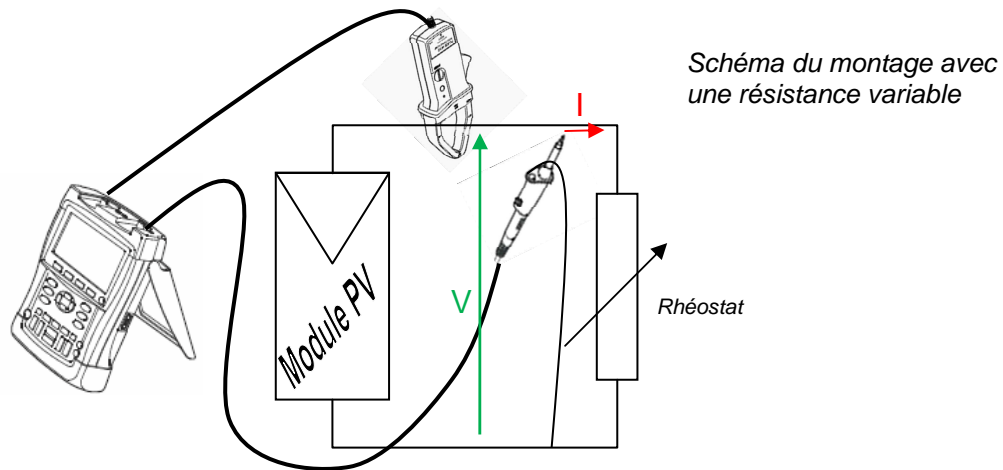


1. A partir du schéma ci-dessus et du dossier ressource compléter le document réponse N°1 « Chaîne d'énergie d'une installation photovoltaïque autonome » avec le nom des composants qui réalisent les différentes fonctions.
2. Indiquer sur le document réponse N°1 la nature de l'énergie :
 - Energie rayonnante
 - Energie électrique continue
 - Energie électrique alternative
3. Sur le document réponse N°1 indiquer par une flèche rouge le transfert de l'énergie de la source aux charges pendant la journée.
4. Sur le document réponse N°1 indiquer par une flèche bleue le transfert de l'énergie de la source aux charges pendant la nuit.

ACTIVITE 2 : Etude d'une installation solaire photovoltaïque autonome sur site.

Relever de la caractéristique $I=f(V)$ d'un module PV

5. Câbler le schéma de mesure ci-dessous afin de relever la caractéristique $I=f(V)$ du module PV.



6. Relever et tracer la caractéristique $I=f(V)$, préciser l'irradiance et la température du module sur la caractéristique.

Procédure à suivre pour relever la caractéristique $I=f(V)$

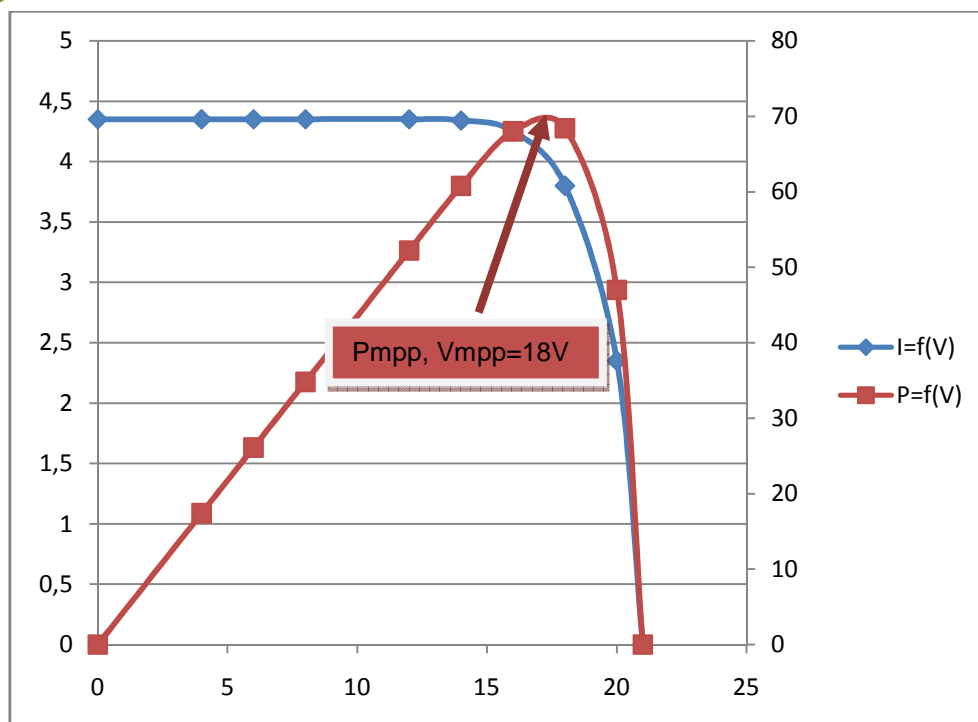
- Relever l'irradiance à l'aide d'un solarimètre
- Relever la température du module avec un thermomètre infrarouge
- Faire varier V_{module} avec le rhéostat et reporter V_{module} et I_{module} dans un tableau
- Préciser la valeur de V_{oc} et I_{sc}

$G=900\text{W/m}^2$, $T_{\text{module}}=35^\circ\text{C}$

V_{module}	21	20	18	16	14	12	8	6	4	0
I_{module}	0	2.35	3.8	4.25	4.34	4.35	4.35	4.35	4.35	4.35
P_{module}	0	47	68.4	68	60.8	52.2	35	26	17.4	0

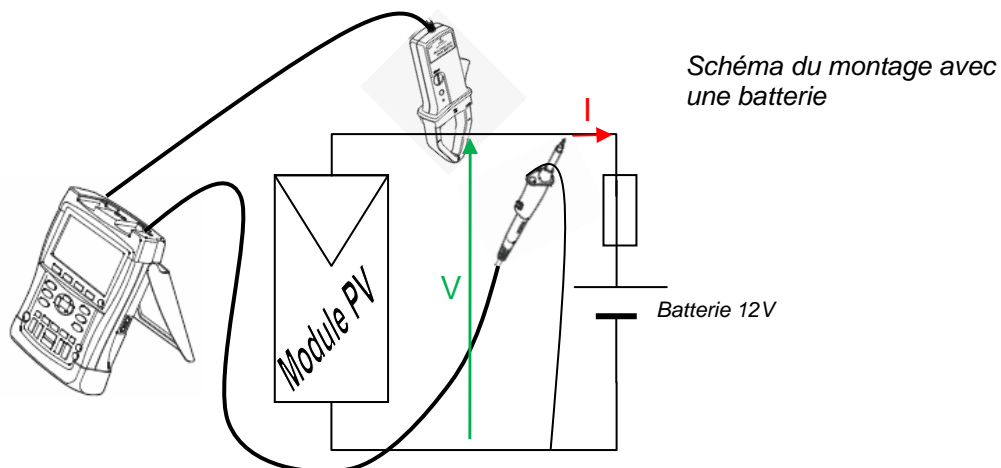
$V_{\text{oc}}= 21\text{V}$ et $I_{\text{sc}}=4.35\text{A}$

7. A partir des relevés $I=f(V)$ tracer la caractéristique $P=f(V)$. Indiquer sur ces caractéristiques le point de fonctionnement optimal, c'est-à-dire celui pour lequel les cellules délivrent la puissance maximale. Pour quelle valeur de tension obtient-on la puissance maximale ?



Point de fonctionnement de l'ensemble source-charge

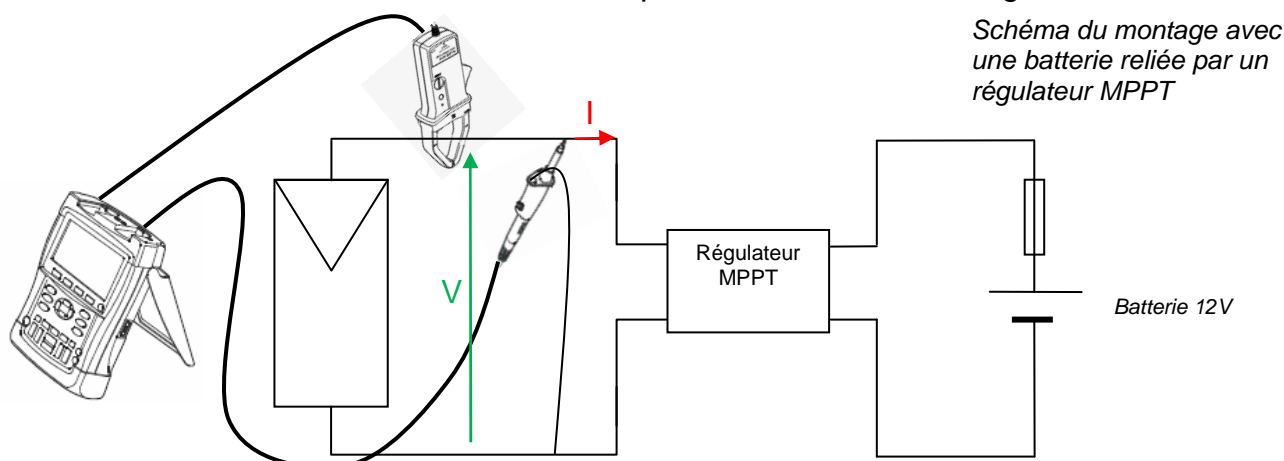
La batterie est directement reliée au module photovoltaïque



8. Câbler le schéma de mesure ci-dessus.
9. Relever V et I, calculer P, reporter le point de fonctionnement sur la caractéristique $P=f(V)$.

$V=13V$; $I=4.35A$; $P=56W$

La batterie est reliée au module par l'intermédiaire d'un régulateur MPPT



10. Câbler le schéma de mesure ci-dessus.
11. Relever V et I, calculer P, reporter le point de fonctionnement sur la caractéristique $P=f(V)$.

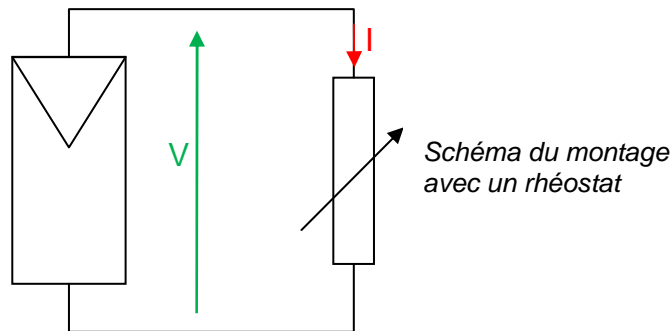
$V=13V$; $I=5.5A$; $P=72W$

12. Comparer les résultats, conclure.

La puissance récupérée est plus importante, 22% en plus. Le coût d'un régulateur MPPT peut-être rapidement rentabilisé grâce au gain énergétique qu'il procure.

ACTIVITE 3 : Simulation d'une installation solaire photovoltaïque autonome

Influence de l'irradiance sur un module photovoltaïque



13. A l'aide de la simulation Matlab intitulée SIMU_PV.mdl vous allez tracer les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$ pour différentes valeurs d'irradiance 200, 400, 600, 800 et 1000W/m² avec une température constante de 25°C. Vous pouvez imprimer vos courbes ou compléter le document réponse N°2 (les courbes sur le document réponse N°2 correspondent au module BP 380 de 80 Wc). Pour chaque courbe vous indiquerez I_{sc} , V_{oc} , P_{mpp} , V_{mpp} et I_{mpp} .

Voir document réponse N°2.

14. Que remarquez-vous ?

Le courant délivré par le module est proportionnel à l'irradiance.

La tension V_{oc} varie peu.

La puissance max est proportionnelle à l'irradiance. La tension à laquelle nous obtenons la puissance max varie peu, entre 16.7 et 18.2V dans notre cas.

Influence de la température sur un module photovoltaïque

15. Toujours avec la simulation SIMU_PV.mdl vous allez tracer les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$ pour différentes températures -15, 5, 25, 45 et 65°C avec une irradiance constante de 1000W/m². Vous pouvez imprimer vos courbes ou compléter le document réponse N°3 (les courbes sur le document réponse N°3 correspondent au module BP 380 de 80 Wc). Pour chaque courbe vous indiquerez I_{sc} , V_{oc} , P_{mpp} , V_{mpp} et I_{mpp} .

Voir document réponse N°3.

16. Que remarquez-vous ?

Influence très importante de la température sur les caractéristiques du module.

Le courant augmente légèrement lorsque la température augmente.

La tension V_{oc} varie de façon significative, plus la température est importante plus la tension diminue.

La puissance max diminue significativement lorsque la température augmente, l'augmentation de la température déplace le point de fonctionnement à P_{max} de façon importante.

17. Pour une irradiance de 1000W/m², calculer en pourcentage la perte de puissance du module pour une température de 0 et 65°C. Conclure.

$$100 - \left(100 * \frac{70}{86.9} \right) = 19.4\%$$

Plus la température du module est froide plus le module est efficace.

18. Exercice : Nous allons comparer la puissance fournie par le module lors d'une belle journée d'été et d'hiver. Les deux relevés sont effectués à midi solaire. Au mois de février nous relevons une irradiance de 923W/m^2 et une température du module de 5°C , au mois d'août nous relevons une irradiance de 982W/m^2 et une température du module de 60°C . Le P_{mpp} est-il obtenu au mois d'août ou au mois de février ?

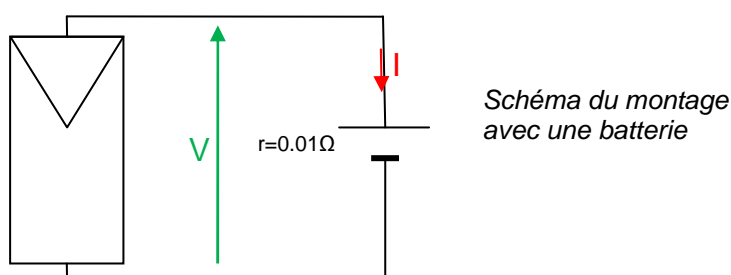
Nous obtenons un P_{mpp} de 79.92W au mois de Février et un P_{mpp} de 70.1W au mois d'août.

19. Comparer les caractéristiques réelles $I=f(V)$ et $P=f(V)$ relevées dans l'activité N°2 avec les caractéristiques obtenues avec la simulation.

Les résultats sont semblables.

Point de fonctionnement de l'ensemble source charge

Le module PV est directement relié à la batterie



20. Dans la simulation intitulée SIMU_PV_batterie nous allons constater l'influence de la tension d'une batterie sur la puissance délivrée par un module photovoltaïque. Nous rechercherons le P_{mpp} en faisant varier la tension de la batterie. La température du module est égale à 25°C et l'irradiance à 1000W/m^2 . Pour différentes valeurs de la tension de la batterie, mesurer la puissance transmise par le module PV à la batterie. Et compléter le tableau ci-dessous.

E batt	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ptransmise	49.15	53.94	58.72	63.47	68.15	72.67	76.81	80.09	81.45	78.73	68.26

21. Quelle est la fem de la batterie permettant d'obtenir la plus grande puissance transmise ?

18V

22. Placer ce point de fonctionnement sur la courbe $P=f(V)$ sur le document réponse N°2, les résultats sont-ils conformes à ceux attendus ?

Oui, nous retrouvons bien sur la courbe le point de fonctionnement à puissance maximum.

23. La tension de la batterie vaut environ 13V , le point de fonctionnement de l'ensemble batterie module est-il optimum ? Calculer le pourcentage de perte.

Le point de fonctionnement n'est pas optimum. L'association source charge n'est pas satisfaisante. La puissance délivrée par le module est de 63.47W au lieu de 81.3W soit 23% de perte.

24. Tracer sur les courbes $P=f(V)$ des documents réponses N°2 et N°3 une droite à $U_{bat} = 13V$, observer les points de fonctionnement pour différentes irradiances et températures, conclure?

Nous avons une mauvaise association source charge, ceci est d'autant plus vrai lorsque les températures sont basses, pour une température de $5^{\circ}C$ les pertes sont d'environ 30%.

25. Vérifier le point de fonctionnement obtenu lors des relevés expérimentaux de l'activité 2 avec la simulation

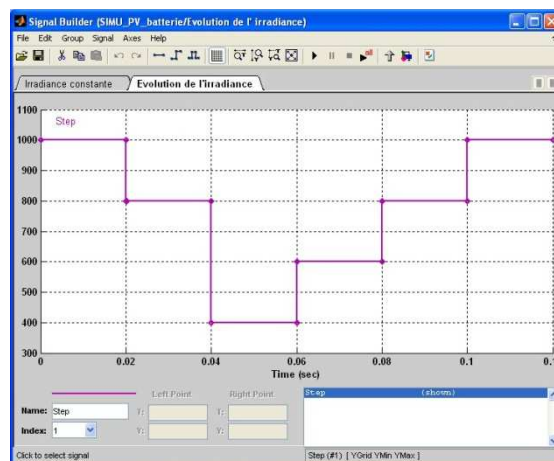
Nous retrouvons les mêmes résultats

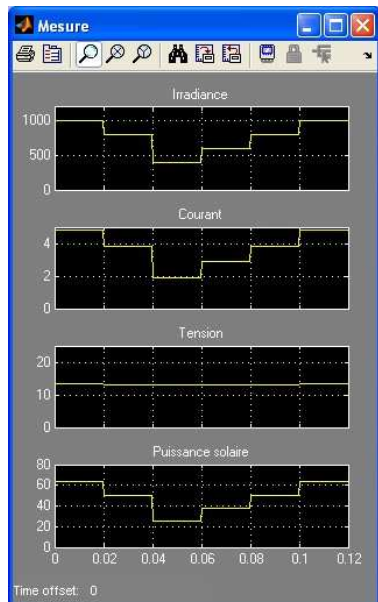
26. Quelles solutions pourrions-nous envisager pour améliorer le placement de ce point de fonctionnement ?

Une première solution consisterait à créer un module PV en associant des cellules afin d'obtenir une puissance nominale proche de celle nécessaire à l'utilisation. Dans notre cas il faudrait diminuer le nombre de cellules. Dans un pays chaud il faut augmenter le nombre de cellules. La solution n'est donc pas idéale car les caractéristiques d'un module PV sont fonctions des conditions météorologiques, nous aurions encore des pertes énergétiques.

L'autre solution (préconisée) consiste à utiliser un étage d'adaptation afin d'optimiser les transferts d'énergies. Dans notre cas nous pouvons utiliser un convertisseur type DC-DC appelé plus communément hacheur ou régulateur. Le hacheur sera commandé de manière à obtenir la puissance maximum du module quelque soit la température et l'irradiance reçu par le module. Ce type de régulateur s'appelle régulateur MPPT (Maximum Power Point Tracking).

27. La simulation dure 120ms, nous allons considérer que ces 120ms correspondent à 2 heures de temps réel. La température du module est de $25^{\circ}C$, $E_{batterie} = 13V$. Sur la simu double-cliquer sur le BP de commande afin de simuler le cycle ci-dessous. Lancer la simulation, pour chaque irradiance relever la puissance solaire.



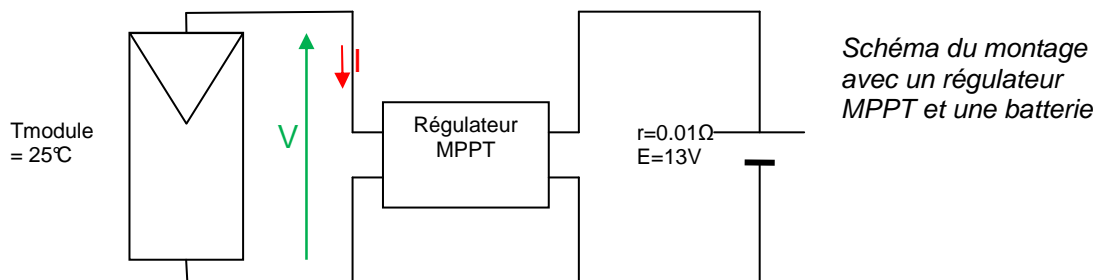


$G=1000\text{W/m}^2$	$P_{\text{solaire}}=63.5\text{W}$
$G=800\text{W/m}^2$	$P_{\text{solaire}}=50.6\text{W}$
$G=400\text{W/m}^2$	$P_{\text{solaire}}=25\text{W}$
$G=600\text{W/m}^2$	$P_{\text{solaire}}=38\text{W}$
$G=800\text{W/m}^2$	$P_{\text{solaire}}=50.6\text{W}$
$G=1000\text{W/m}^2$	$P_{\text{solaire}}=63.5\text{W}$

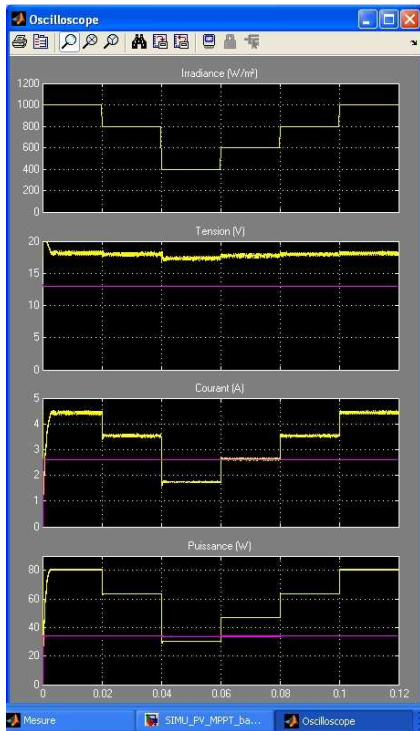
28. Calculer l'énergie fournie par le module PV sur un cycle de 2 heures.

$$63.5 * \frac{1}{3} + 50.6 * \frac{1}{3} + 25 * \frac{1}{3} + 38 * \frac{1}{3} + 50.6 * \frac{1}{3} + 63.5 * \frac{1}{3} = 97\text{Wh}$$

Le module PV est relié à la batterie par l'intermédiaire d'un régulateur MPPT



29. Dans la simulation intitulée SIMU_PV_MPPT_batterie nous avons inséré un régulateur MPPT entre le module PV et la batterie. Le régulateur MPPT permet d'obtenir la puissance maximum du module quelles que soient la charge, l'irradiance et la température du module PV. L'irradiance suit la même évolution que lors de l'activité précédente. Lancer la simulation. Pour chaque irradiance, relever la puissance solaire, vérifier sur les caractéristiques $P=f(U)$ que les points de fonctionnement se situent bien au Mpp.



$G=1000\text{W/m}^2$
 $G=800\text{W/m}^2$
 $G=400\text{W/m}^2$
 $G=600\text{W/m}^2$
 $G=800\text{W/m}^2$
 $G=1000\text{W/m}^2$

$P_{\text{solaire}}=80.5\text{W}$
 $P_{\text{solaire}}=64\text{W}$
 $P_{\text{solaire}}=30.2\text{W}$
 $P_{\text{solaire}}=47\text{W}$
 $P_{\text{solaire}}=64\text{W}$
 $P_{\text{solaire}}=80.5\text{W}$

30. Nous considérons à nouveau que les 120ms de la simulation correspondent à 2h de temps réel, calculer l'énergie fournie par le module PV sur un cycle.

$$80.5 * \frac{1}{3} + 64 * \frac{1}{3} + 30.2 * \frac{1}{3} + 47 * \frac{1}{3} + 64 * \frac{1}{3} + 80.5 * \frac{1}{3} = 122\text{Wh}$$

31. Calculer le gain énergétique en pourcentage dû à l'utilisation d'un régulateur MPPT.

$$100 - \left(\frac{97 * 100}{122} \right) = 21\%$$

32. Vérifier le point de fonctionnement obtenu lors des relevés expérimentaux de l'activité 2 avec la simulation.

ACTIVITE 4 : Simulation d'un court-circuit sur une batterie

Toujours dans la simulation SIMU_PV_MPPT_batterie nous allons déclencher un court circuit sur la batterie à $t=40\text{ms}$ de la simulation. Pour cela double-cliquer sur l'icône réglage court-circuit et compléter de la façon suivante:



33. Par calcul estimer le courant de court-circuit.

$$I_{cc} = \frac{E_{bat}}{R_{interne\ batterie} + R_{oncourt-circuit} + R_{ondisjoncteur}} = \frac{13}{0.01 + 0.001 + 0.0001} = 1171\text{A}$$

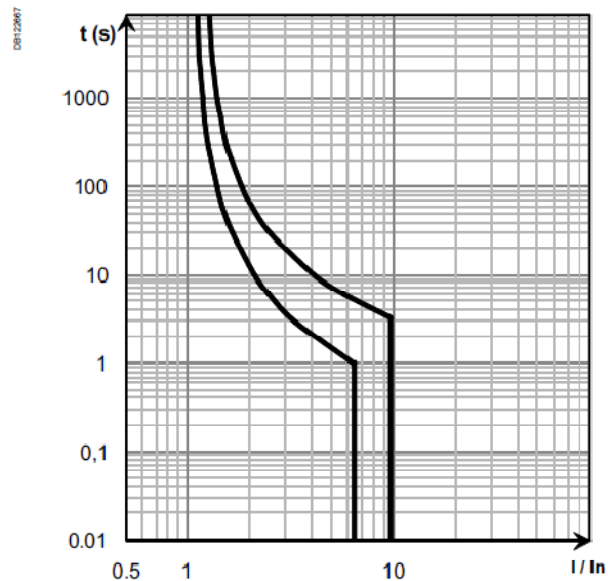
34. A l'aide de la courbe de déclenchement ci-dessous évaluer le temps de déclenchement du disjoncteur.

Courbes

Courbes de déclenchement

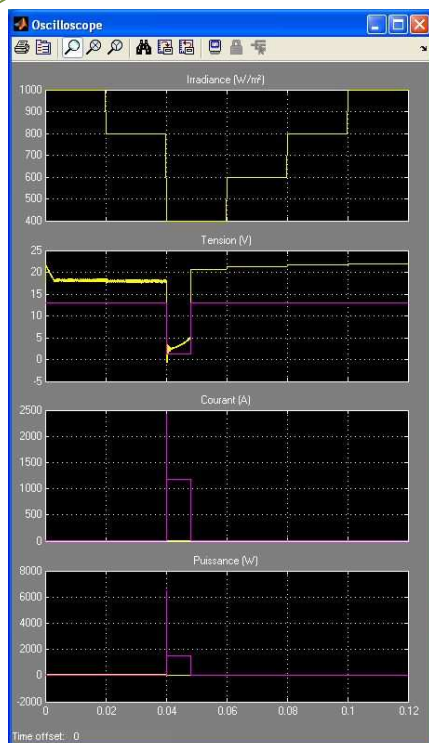
Courbe C suivant la norme CEI 60947-2

- La plage de fonctionnement du déclencheur magnétique est comprise entre $7 I_n$ et $10 I_n$.
- Les courbes représentent les limites de déclenchement thermiques à froid, pôles chargés et les limites de déclenchement électromagnétique, 2 pôles chargés.
- Elles s'appliquent sans déclassement.



Le temps de déclenchement du disjoncteur est compris entre 6.5 et 10ms

35. Lancer la simulation, mesurer le courant de court-circuit et le temps de déclenchement du disjoncteur. Pour visualiser le courant de court-circuit cliquer sur l'icône jumelle de l'oscilloscope afin d'adapter les échelles. Comparer avec les résultats théoriques.



Nous relevons 1171 A et un temps de déclenchement de 8ms, les résultats sont conformes.

ACTIVITE 5 : Rédiger des documents pour les élèves

Rédiger des fiches de formalisation des connaissances pour les élèves

