

## Energie Solaire Photovoltaïque et Stockage par Supercondensateurs.

Objectifs de ce Tp:

- Caractériser un panneau photovoltaïque sous différents rayonnement lumineux
- Comprendre les potentialité et les contraintes inhérentes à cette technologie.
- Comprendre l'intérêt d'un système de stockage de l'énergie lorsqu'on utilise une source renouvelable naturellement intermittente.

**Les parties avec un trait à gauche sont à préparer obligatoirement avant votre venue en TP.  
L'ensemble du TP est à lire avant de venir en TP.**

Dans ce TP consacré à l'énergie solaire photovoltaïque, vous aurez à utiliser un **panneau photovoltaïque** MSX-005 au silicium polycristallin de marque BP Solar.

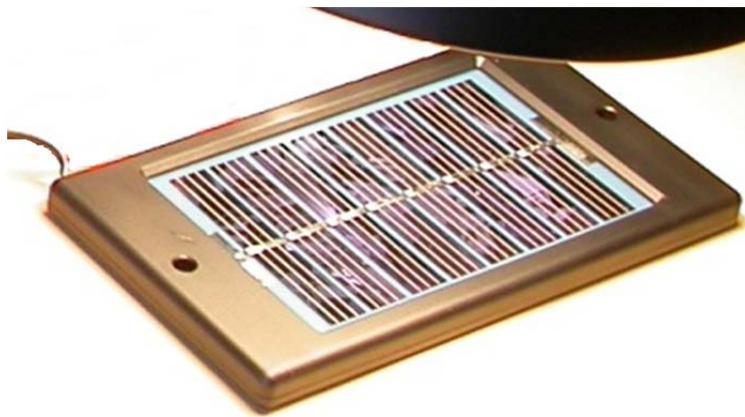


Photo 1 Panneau solaire MSX-005 éclairé par une lampe de bureau



Photo 2 pyranomètre SP-Lite

### Partie I - Simulateur de soleil.

Pour simuler le soleil, vous utiliserez une **lampe halogène** alimentée par une **alimentation stabilisée** en tension continu de 12 volts (le courant électrique vaut alors 4 ampères). Cette lampe simule le soleil.

Le rayonnement lumineux est appelé aussi *irradiation ou puissance surfacique* et il s'exprime en watt/unité de surface : ( $W/m^2$ ). C'est la quantité d'énergie lumineuse qui arrive par seconde sur une surface de  $1 m^2$ . Par très beau temps à Toulouse le soleil donne au maximum au sol une puissance surfacique de  $1000 W/m^2$ , temps nuageux :  $200 W/m^2$ , par temps pluvieux d'hiver :  $25 W/m^2$ , un éclairage d'intérieur donne une irradiation inférieure ou voisine de  $1 W/m^2$ .

Comment se replacer dans des conditions d'ensoleillement typiques (grand beau, temps nuageux, mauvais temps) avec la lampe?

Pour se placer dans des conditions d'irradiation données, vous réglerez la distance entre la lampe et le panneau solaire.

L'irradiation est notée **G** et exprimée en  $W/m^2$ . La mesure d'irradiation est effectuée à l'aide d'un **pyranomètre**. Il délivre une tension  $V_{PYRA}$ , lue sur un **voltmètre**, directement proportionnelle à l'irradiation que vous souhaitez mesurer. Sa sensibilité (notée  $S_{PYRA}$ ) est d'environ  $71 \mu V/(W/m^2)$  (vous prendrez cette valeur pour la suite du TP). L'irradiation G et la tension délivrée par le capteur sont reliées par la relation :

$$V_{PYRA} = S_{PYRA} \cdot G \quad (Eq.1)$$

La tension délivrée par le pyranomètre est lue sur un **voltmètre** (borne bleu du pyranomètre sur COM , borne rouge sur V, voltmètre en DC, calibre 200mV)



**Photo 3** Etalonnage du "soleil artificiel". Le voltmètre indique l'irradiation vue par le pyranomètre qui est éclairé par la lampe.

**Q-** Quelle valeur de tension doit-on lire sur le voltmètre pour retrouver les conditions météorologiques proposées suivantes? Compléter le tableau.

Conditions	Irradiation (W/m <sup>2</sup> )	V <sub>PYRA</sub> (mV)
Très beau temps		
Beau	500	
Nuageux		
temps pluvieux d'hiver		
un éclairage d'intérieur		
nuit sans lune		

**Tableau 1** relation entre l'irradiation et la tension délivrée par le pyranomètre.

## Partie II - Caractérisation du panneau photovoltaïque.

### Analyse des panneaux et de la doc technique

*Analyse de la doc technique fournie.*

**Q-** Rappellez le le type de technologie de ce panneau.

Pour pouvoir comparer les différents panneaux photovoltaïques du marché, ils sont tous testés dans les mêmes conditions expérimentales **STC (Standard Test Conditions)** qui sont : une température de 25°C, une irradiation de 1000 W/m<sup>2</sup> et un spectre solaire correspondant à AM 1.5 (ce qui correspond au spectre du soleil à 42° par rapport à l'horizontal).

Dans les **STC** (conditions standards de test), la documentation donne :

**V<sub>oc</sub>** = 4,6V : tension en circuit ouvert -Open Circuit- (c'est-à-dire la tension obtenue quand le courant est nul )

**I<sub>sc</sub>** = 160 mA : courant de court-circuit -Short Circuit- (c'est-à-dire le courant obtenu quand la tension est nulle)

**V<sub>opt</sub>** = 3,3 V : valeur de tension pour laquelle la puissance électrique récupérée est maximale.

**I<sub>opt</sub>** = 150 mA : valeur de courant pour laquelle la puissance électrique récupérée est maximale.

**P<sub>max</sub>** = valeur maximale de la puissance = V<sub>opt</sub> x I<sub>opt</sub>

Q- Calculez P<sub>max</sub>.

Q- La figure 1 vous donne les allures caractéristiques des courbes I(V) et P(V) d'un panneau solaire. A partir des spécifications données ci-dessus, retracez dans votre compte rendu la forme des courbes I(V) et P(V) et complétez avec les valeurs de V<sub>oc</sub>, I<sub>sc</sub>, P<sub>max</sub>, V<sub>opt</sub>, I<sub>opt</sub> dans les STC.

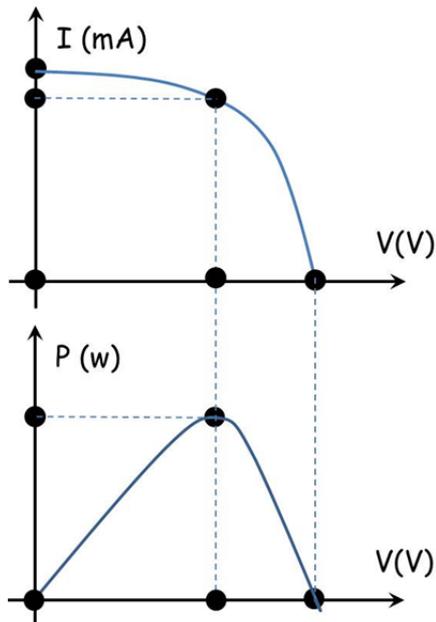


Figure 1. Courbes caractéristiques d'un panneau solaire.



Photo 4. Une cellule élémentaire du panneau étudié.

Il faut noter que **la forme** de ces courbes reste la même quand l'ensoleillement ou la température varient.

#### Analyse visuelle

La photo 4 représente une cellule élémentaire. Sur la surface de silicium on note les contacts aluminisés nécessaires pour collecter les électrons.

Q- Combien de cellules élémentaires sont en série sur ce panneau?

Q- Quelles sont les dimension d'une cellule élémentaire (largeur et longueur). On note S<sub>CELL</sub> la surface d'une cellule. Que vaut S<sub>CELL</sub>? (en cm<sup>2</sup> et en m<sup>2</sup>)

On remarque que les cellules sont montées en série? (le contact (zone aluminisée) avec la face avant d'une cellule va au dessous de la cellule suivante. ⇒ les tensions de chacune des cellules s'additionnent pour donner la tension totale du panneau.

#### Premières manipulations

##### Lien entre irradiation et distance lampe-panneau

Q- Reportez les valeurs du tableau 1 dans le tableau 2, et à l'aide du pyranomètre déterminez expérimentalement les distances panneau-lampe correspondantes aux différentes conditions. Reportez les valeurs de distances obtenues dans le tableau 2.

##### Influence de l'irradiation sur V<sub>oc</sub>, I<sub>sc</sub> et sur p<sub>max</sub>.

On relie le panneau photovoltaïque à un ampèremètre (borne bleue sur COM, borne rouge sur mA, calibre : DC 200mA). La résistance de l'ampèremètre est quasi nulle, le panneau est donc en court-circuit.

Q- Complétez la colonne I<sub>sc</sub> (courant de court-circuit) dans le tableau 2.

On relie maintenant le panneau photovoltaïque à un voltmètre (borne bleu sur COM, borne rouge sur V, calibre : DC 20 V). La résistance du voltmètre est très grande, le panneau est donc en circuit ouvert (pas de courant débité par le panneau).

Q- Complétez la colonne **Voc** (tension de circuit ouvert) dans le tableau 2.

conditions	Irradiation G (W/m <sup>2</sup> )	V <sub>PYRA</sub> (mV)	Distance entre le panneau et le bas de la lampe (cm)	Isc (mA)	Voc (V)
Très beau temps					
Beau	500				
Nuageux					
temps pluvieux d'hiver					
un éclairage d'intérieur					
nuit sans lune					

Tableau 2 Caractérisation du panneau sous différentes irradiations.

Q- Tracez sur une feuille petit carreau la courbe Isc (mA) en fonction de l'irradiation G (W/m<sup>2</sup>)  
échelle abscisse: 1cm ↔ 100 W/m<sup>2</sup>, échelle ordonnée 5 mm ↔ 10 mA.

On considère généralement que l'on peut modéliser le courant de court-circuit sous la forme :

$$I_{SC} = (k \cdot S_{CELL}) \cdot G \quad (\text{Eq.2})$$

Q- Tracez la droite passant le mieux par les points expérimentaux.

(k · S<sub>CELL</sub>) représente la pente de cette droite.

Q- Quelle valeur (en mA/(W/m<sup>2</sup>)) trouvez-vous ?

Q- Tracez sur une feuille petit carreau la courbe Voc (V) en fonction de G (W/m<sup>2</sup>).

échelle abscisse: 1cm ↔ 100 W/m<sup>2</sup>, échelle ordonnée 1 cm ↔ 1 V

On considère généralement que la tension de circuit ouvert varie peu avec l'irradiation. Sur quelle plage d'irradiation cette affirmation est-elle valide à 10% près (c.a.d G tel que Voc > Vocmax. 0,9).

Un modèle simple donne que I<sub>opt</sub> est proportionnel à Isc et de même V<sub>opt</sub> est proportionnelle à Voc. Nous avons vérifié dans les questions précédentes que Isc proportionnel à G et que Voc est indépendant de G dès que l'irradiation est suffisante.

$$I_{opt} = k_1 \cdot I_{sc} \text{ et } I_{sc} = k_2 \cdot G \Rightarrow I_{opt} = k_1 \cdot k_2 \cdot G$$

$$V_{opt} = k_2 \cdot V_{oc} \text{ et } V_{oc} = Cte' \quad \forall G > G_{min} \Rightarrow V_{opt} = Cte' \quad \forall G > G_{min}$$

$$\text{Or } P_{max} = I_{opt} \cdot V_{opt} \text{ donc } P_{max} = (Cte' \cdot k_1 \cdot k_2) \cdot G \quad \text{c.a.d. :}$$

La puissance maximale récupérable est proportionnelle à l'irradiation

On montre aussi que la puissance maximale diminue lorsque la température augmente (environ 5% de diminution par augmentation de la température de 10°C)

### Relevés des caractéristiques I(V) et P(V)

Nous avons regardé les extrémités des caractéristiques I(V), on étudie maintenant la caractéristique complète pour une irradiation de **1000 W/m<sup>2</sup>**. Laissez le panneau sous la lampe allumée pour que la température du panneau soit stabilisée.

On relie le panneau photovoltaïque a deux résistances variables en série (cf photo5). Un ampèremètre et un voltmètre permettent de relever le courant et la tension (cf figure 2).

Partant de R<sub>1</sub>+R<sub>2</sub> = 0 Ω, augmentez la résistance progressivement pour faire varier le point de fonctionnement du panneau (I,V) pour finir à R<sub>1</sub>+R<sub>2</sub> maximale. Le panneau est initialement en court-

## Sujet TP L1 SPI

circuit, on augmente  $R_1$  et  $R_2$  pour avoir des variations régulières de tension (vous noterez un point tout les 0,5 V environ) puis quand le courant diminue, il faut avoir des variations régulières de courant (vous noterez un point tout les 20 mA environ). Il faut aussi deux ou trois points dans le coude de la caractéristique  $I(V)$ .

**Pour tous les tracés, faites une croix pour chaque point de mesure relevé (couple  $(I-V)$ ).**



Photo 5 groupe de deux résistances variables

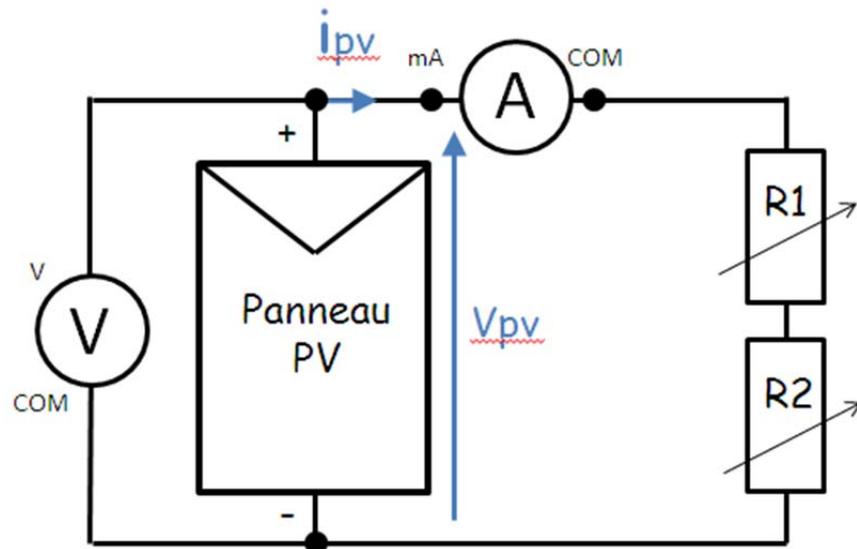


Figure 2 Montage pour relever  $I(V)$

**Q-** Remplissez un tableau de valeur et en même temps tracez la courbe  $I(V)$  sur du papier petit carreau.

échelle abscisse: 2,5 cm  $\Leftrightarrow$  1V, échelle ordonnée 1 cm  $\Leftrightarrow$  10 mA.

**Q-** A partir du tableau des valeurs relevées, tracez la courbe  $P(V)$

échelle abscisse: 2,5 cm  $\Leftrightarrow$  1V, échelle ordonnée 2 cm  $\Leftrightarrow$  0,1 W.

**Q-** Faites figurer les valeurs caractéristiques  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $V_{opt}$ ,  $I_{opt}$ ,  $P_{max}$  sur ces deux caractéristiques.

**Q-** Les résultats obtenus sont-ils voisins de ceux présentés dans la documentation technique du produit?

**Q-** A quelle valeur de tension faut-il faire travailler le panneau pour lui faire donner sa puissance max?

On définit le rendement photovoltaïque  $\eta_{PV}$  comme le rapport entre la puissance électrique maximale récupérable ( $P_{max}$ ) et la puissance fournie par le soleil sur le panneau ( $G \cdot S_{PAN}$ ).

$S_{PAN}$  est la surface utile du panneau, c'est-à-dire la surface totale des cellules photovoltaïques.

$$S_{PAN} = 8 \cdot S_{CELL} \quad (\text{Eq.3})$$

$$\eta_{PV} = \frac{P_{max}}{(G \cdot S_{PAN})} \quad (\text{Eq.4})$$

**Q-** Calculez le rendement photovoltaïque  $\eta_{PV}$  pour  $G$  de 1000 W/m<sup>2</sup>

**Q-** On dispose d'un panneau de même technologie que celui que vous étudiez avec une surface  $S_{PAN} = 1\text{m}^2$ , quelle serait la puissance électrique récupérable par très beau temps?

<b>Partie III - Récupération, stockage et utilisation de l'énergie photovoltaïque</b>
---

Après avoir étudié ce panneau photovoltaïque nous allons maintenant regarder comment il peut être utilisé comme source d'énergie pour alimenter divers systèmes.

#### Utilisation directe, au fil du soleil.

Le système (noté  $\Sigma$ ) est soit une radio, soit le ventilateur d'une casquette solaire. Reliez  $\Sigma$  au panneau puis placez le panneau sous le "soleil".

Q- Que ce passe-t-il? Le "soleil" est caché par un nuage, que se passe-t-il?

Q- Pour cette application est-il nécessaire d'avoir du stockage?

#### Supercondensateur.

On souhaite maintenant stocker de l'énergie pour la restituer à la demande (éclairage, radio, ventilateur, appareil électronique, ...). On peut utiliser comme réservoir de stockage de l'énergie, des batteries ou des supercondensateurs. Nous avons choisi d'utiliser des supercondensateurs (condensateurs avec des valeurs de capacité importante).

On rappelle que pour un condensateur (ou un supercondensateur), l'énergie stockée s'exprime en fonction de la valeur de la capacité  $C$  (en Farad : F) et de la tension  $V$  aux bornes de la capacité (en volts : V) selon la relation :

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (\text{Eq.5})$$

On notera en abrégé SC pour supercondensateur.

Les SCs utilisés sont des PC10 de Mawell, de capacité 10 Farad :  $C=10F$ . Chaque PC10 accepte une tension maximale de 2,5 V. Nous avons mis deux PC 10 série.

Q- Quelle est la tension maximale admise par l'ensemble des deux condensateurs en série?

Q- Cette tension est-elle compatible avec la tension maximale du panneau photovoltaïque (4,6V)?

On rappelle que pour deux capacités en série la capacité équivalente est donnée par:

$$1/C_{\text{EQU}} = 1/C + 1/C \quad (\text{Eq.6})$$

Q- Quelle est la capacité  $C_{\text{EQU}}$  équivalente à l'ensemble des deux condensateurs en série?

#### Charge des supercondensateurs par le panneau photovoltaïque

##### Mise en place de la manipulation

On souhaite faire le relevé de  $V_C(t)$  et  $i_C(t)$ . Pour cela on réalise le montage présenté à la figure 4. Vous utiliserez la maquette fournie. Il reste à cabler le panneau, l'ampèremètre et le voltmètre.

Si lors de la charge la tension est négative, vous inverserez les bornes du voltmètre.

Si lors de la charge le courant est négatif, vous inverserez les bornes de l'ampèremètre. Dans un premier temps, la lampe est éteinte (distance lampe-panneau <1cm) et l'interrupteur K est fermé, ce qui permet de décharger complètement les SCs.

Quand la tension aux bornes des SCs est devenue nulle, ouvrez K, puis allumez la lampe : la charge commence.

temps (mn)	tension (V)	Courant (mA)	Puissance (mW).
0			
0,5			
...			

Tableau 3. Relevé de la charge des supercondensateurs

Q- Relevez  $I_C$  et  $V_C$  chaque 30s lors de la charge (elle dure environ 6minutes) et remplissez les colonnes "temps", "tension", "courant" d'un tableau similaire au tableau 3.  
On considère que la charge est terminée quand le courant est inférieur à 1mA. On a alors  $V_C$  voisin de  $V_{oc}$ .

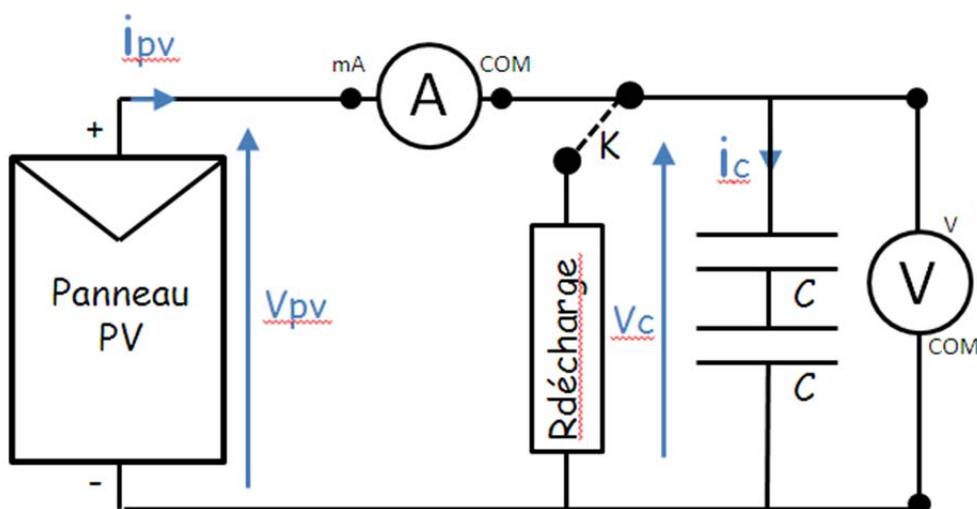


Figure 3. Montage pour analyser la charge des supercondensateurs par le panneau solaire.

Q- La lampe est allumée; que vaut le courant?

Q- Vous éteignez la lampe; que vaut le courant?

Q- Le panneau photovoltaïque non éclairé se comporte-t-il ici comme un générateur ou comme un récepteur d'énergie?

Pour éviter ce problème, on rajoute généralement dans le circuit une diode en série qui empêche le courant de retourner dans le panneau.

Analyse du tableau 3

Q- Quelle est l'énergie stockée à la fin dans les SCs (utilisez l'équation 5 )?

Q- Quelle a été la durée de la charge des SCs?

$$P_c(t) = V_c(t) \cdot I_c(t) \quad (\text{Eq.7})$$

Q- En utilisant Eq. (7), compléter la colonne "puissance" du tableau 3.

Q- Que vaut la puissance en début et en fin de charge?

Q- Quelle est la puissance maximale de charge des SCs?

Q- Utilise-t-on au mieux le panneau PV durant toute la charge?

Q- Tracez  $I_C$  en fonction de  $V_C$  en utilisant les mêmes échelles que lorsque vous avez tracé  $I(V)$  pour le panneau PV.

On constate que les points de fonctionnement (couples  $(I_C-V_C)$  suivent la caractéristique du panneau solaire.

Explications :

La figure 4 montre que pendant la charge :

$$V_{PV} = V_C \quad (\text{Eq.8})$$

et

$$I_C = I_{PV} \quad (\text{Eq.9})$$

A tout instant, l'énergie stockée dans les Scs fixe la tension  $V_C$  (cf Eq.5), cela fixe alors la tension  $V_{PV}$  (cf Eq. 8). Pour une tension  $V_{PV}$ , on en déduit le courant  $I_{PV}$  grâce à la caractéristique  $I_{PV}(V_{PV})$ . Compte tenu de l'Eq.9, le courant de charge  $I_C$  est alors imposé par le panneau. Le point de fonctionnement ( $I_C - V_C$ ) au court de la charge se "balade" donc sur la caractéristique  $I_{PV}(V_{PV})$  et la puissance reçue par les Scs suit la caractéristique  $P_{PV}(V_{PV})$ . On comprend alors pourquoi la puissance est pratiquement nulle en début ( $V_C = 0$ ) et en fin ( $V_C = V_{oc}$ ) de charge.

Pour des systèmes plus élaborés, on place entre le panneau et les Scs un convertisseur électronique qui force la tension du panneau à prendre la valeur  $V_{opt}$ , le panneau délivre alors  $P_{max}$  tout le temps désiré.

**Q-** Dans ce cas combien de temps aurait duré la charge?

### Décharge des supercondensateurs.

#### Décharge

On enlève le panneau solaire et on place un système consommateur (noté  $\Sigma$ ) à la place (ventilateur, radio). Les supercapas alimentent alors le système consommateur  $\Sigma$ .

Le courant  $i_C$  qui était positif lors de la charge devient négatif, la puissance  $P_C = V_C \cdot i_C$  reçue par les Scs aussi, c'est normal : les Scs fournissent de la puissance à  $\Sigma$ .

**Q-** Relevez le courant absorbé par  $\Sigma$  ( $i_\Sigma = -i_C$ ) et la tension aux bornes de ces charges ( $V_\Sigma = V_C$ ).

**Q-** En déduire la puissance consommée par  $\Sigma$ ?

**Q-** Si la puissance restait constante (ce n'est pas toujours le cas), en utilisant l'Eq.10 qui relie la puissance ( $P$  en joule), la durée de fonctionnement ( $T$  en seconde) et l'énergie ( $E$  en watt), quelle serait l'autonomie énergétique de ce système.

$$E = P \cdot T \quad (\text{Eq.10})$$

On souhaite alimenter 10 charges identiques à celle proposée.

**Q-** Que deviendrait la durée de fonctionnement?

**Q-** Comment pourrait-on l'augmenter?

On souhaite accélérer la charge des Scs et donc diminuer la durée de charge.

**Q-** Que peut-on faire? (sans changer le soleil!)

-----  
Ce Tp a eu pour but de vous faire découvrir les possibilités et les contraintes de l'énergie photovoltaïque et aussi d'aborder la problématique du stockage de l'énergie.  
-----