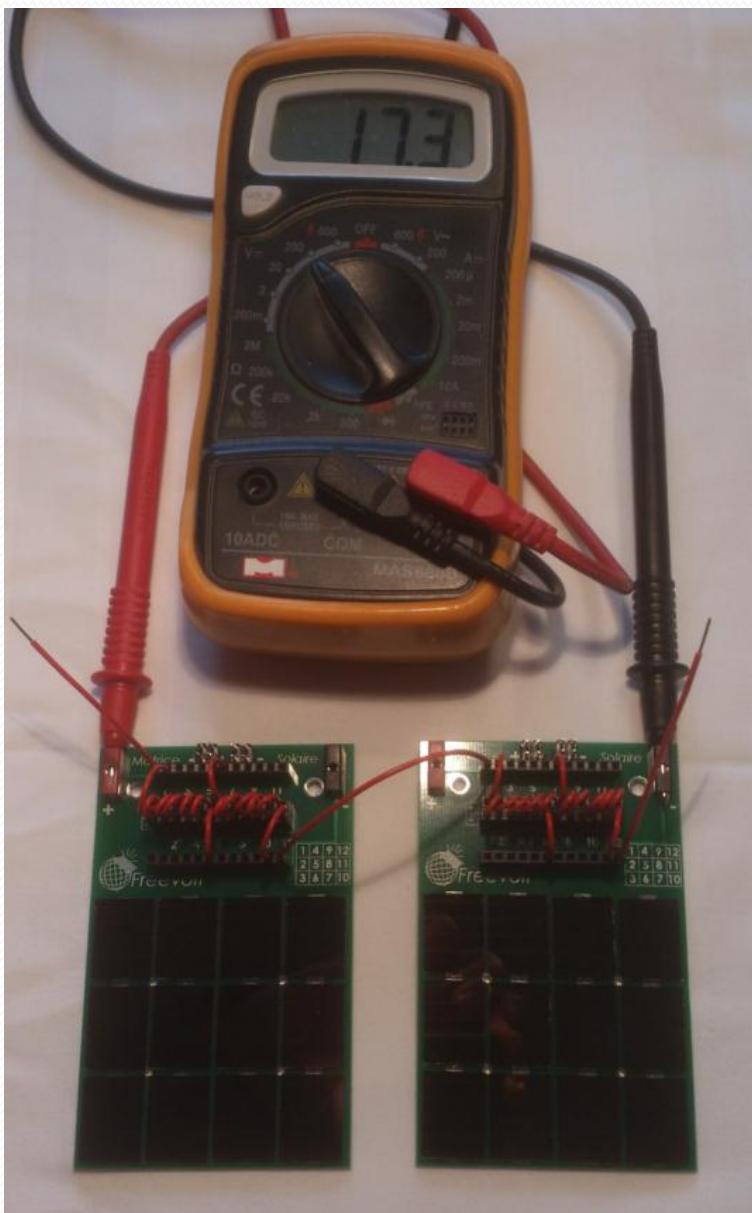


La Matrice et ses applications

Câblez vos propres capteurs photovoltaïques et testez-les.



L'ensemble des travaux pratiques développés
ici sont réalisables en salle de classe,
indépendamment des conditions météorologiques externes.

Table des matières

(Energies renouvelables, électronique/électrotechnique, capteurs solaires)

• 1) Les spécifications de la carte	p3
• 2) les équipements nécessaires	p6
• 3) Les conditions de travail et approximations	p7
• 4) Comment câbler la carte	p8
• 5) Travail sur la cellule (caractériser une cellule).....	p10
• 6) Travail sur la cellule (caractérisation sous différentes irradiations).....	p14
• 7) La centrale solaire (le Point Maximum de Puissance : MPP).....	p17
• 8) Travail sur les cellules (Montage série).....	p18
• 9) Travail sur les cellules (Montage parallèle).....	p22
• 10) Travail sur les cellules (Montage série + parallèle).....	p26
• 11) Travail sur les cellules (les écarts dûs à la qualité des cellules).....	p28
• 12) Travail sur le capteur (Influence d'un ombrage sur le fonctionnement)...	p33
• 13) Travail sur le capteur (les diodes by-pass).....	p38
• 14) La centrale solaire (Introduction au câblage d'une centrale en fonction d'un onduleur).....	p45
• 16) La centrale solaire (choix entre différents onduleurs).....	p49
• 17) Annexes (Feuilles de TP vierges élèves).....	p51
• 18) Conclusion	p68

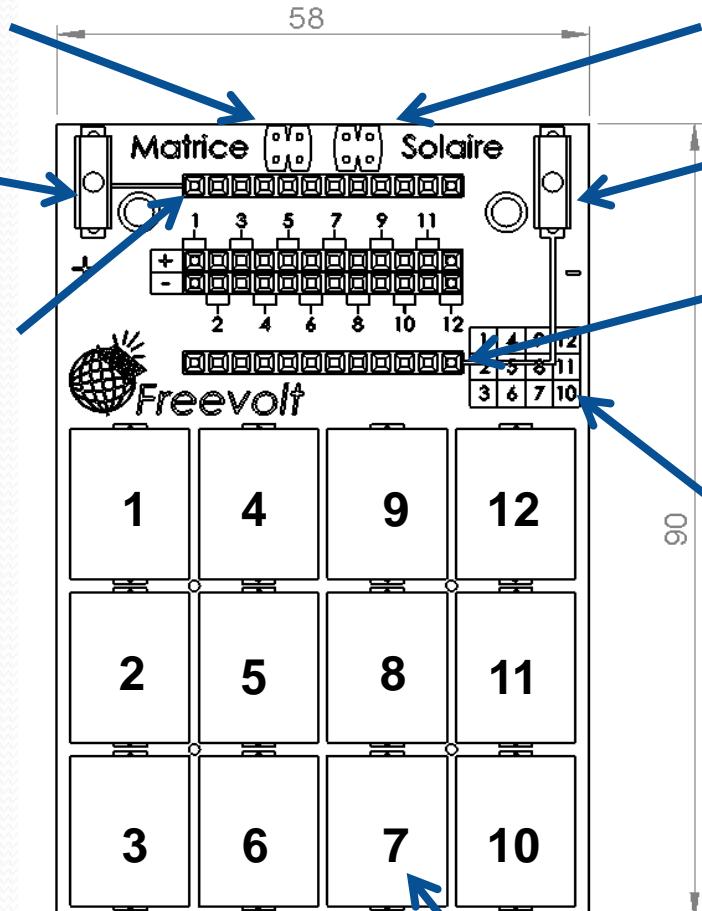
Les spécifications de la carte

Autre solution de connecteur Positif

58

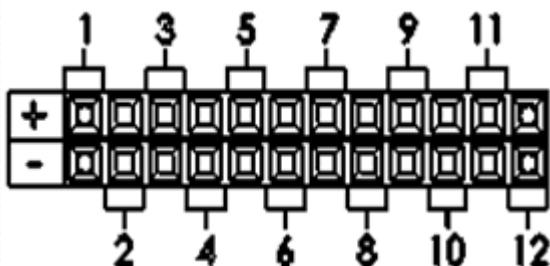
Autre solution de connecteur négatif

Connecteur 2mm
Positif

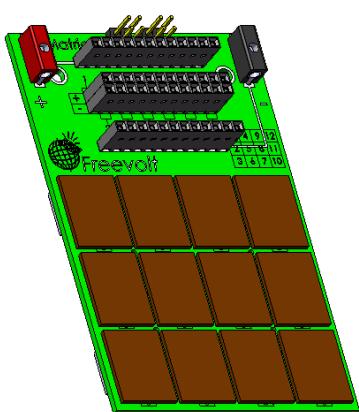


12 Cellules

Toutes les bornes des cellules
sont ramenées sur ce connecteur.
les (+) en haut / les (-) en bas

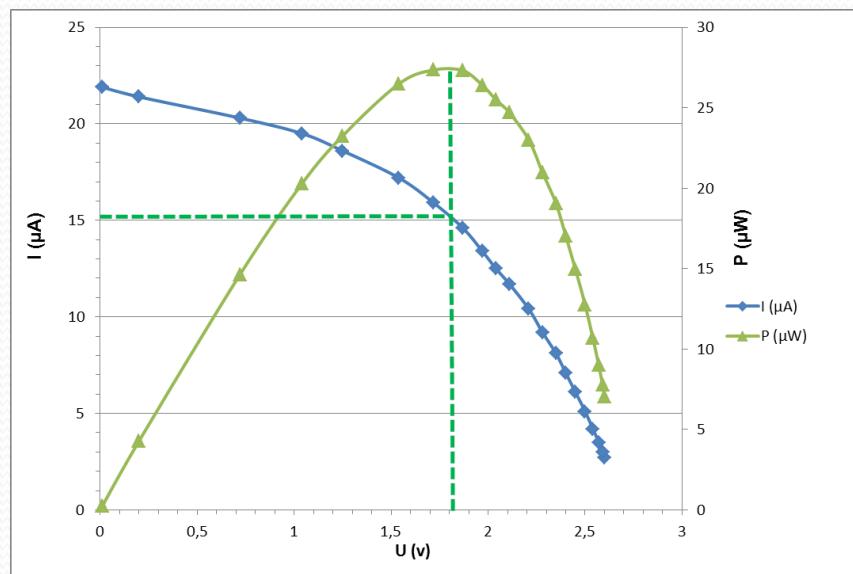
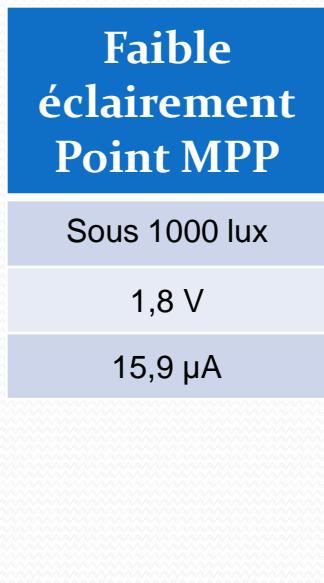


Les chiffres correspondent au N° de cellule
et sont organisés suivant le tableau
d'organisation des cellules

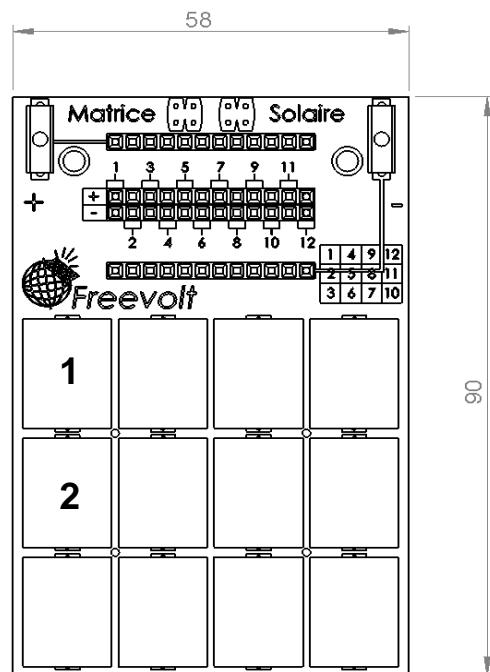
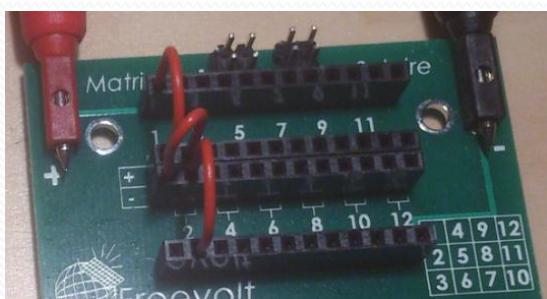
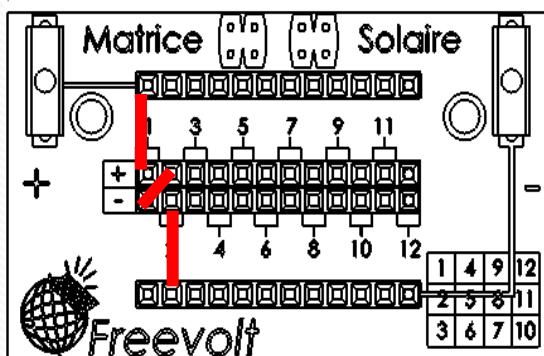


Les spécifications de la carte

Courbe d'une cellule

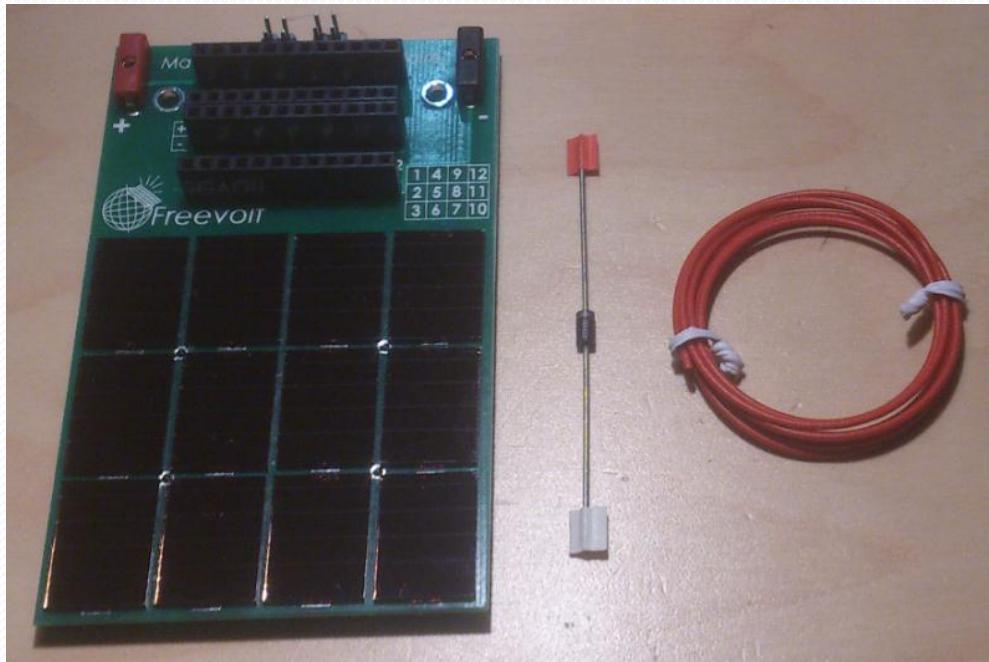


Exemple de câblage des cellules 1 et 2 en série



Les spécifications de la carte

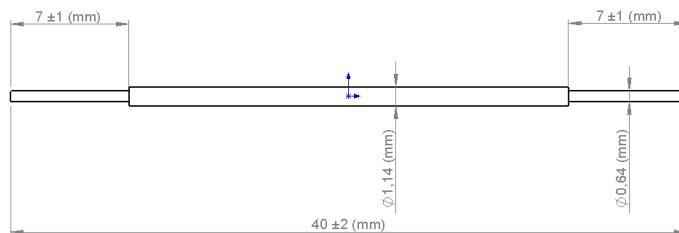
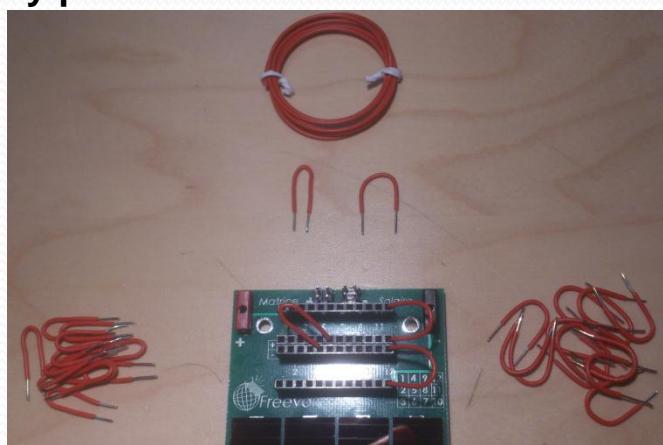
Contenu du sachet



1 carte matrice

1 m de câble pour former les cavaliers

1 Diode by-pass



Formez les cavaliers

Les équipements nécessaires

Les indispensables



+ Une boîte à décade, ou plusieurs potentiomètres de $1 \text{ M}\Omega$ avec une Breadboard.

Les optionnels



Il est possible de faire sans, mais il est tout de même plus pratique de savoir à quel niveau d'éclairement sont exposées les cellules

Les conditions de travail et approximations

Il est évident que nous ne pouvons pas travailler dans les conditions CSTC de test de vrais capteurs.

Pour tester des capteurs solaires tels que dans des unités de productions ou des laboratoires, il faut : une lampe Solar Spetrum 1000W, une lampe Solar Spetrum 800W, Une Lampe Solar Spectrum 500W, travailler dans une enceinte climatisée à 25°C étanche à la lumière extérieure, avec des cellules contrôlées en température, et une chaîne d'acquisition plus précise qu'un simple multimètre.

Ce sont des équipements très onéreux à ne pas laisser entre toutes les mains. Seuls les universités, laboratoires de recherche et constructeurs de cellules disposent de matériels aussi performants.

Toutefois, comme vous allez le constater, avec notre méthode (une simple lampe de bureau, 2 multimètres, une résistance variable et des cartes matrices) nous pourrons effectuer des mesures suffisamment fiables et compréhensibles pour que les élèves puissent découvrir et apprécier toutes les problématiques liées à un capteur solaire photovoltaïque et à une centrale solaire (et ceci en salle de classe).

Il ne s'agit pas ici de vulgarisation, les matrices ont été conçues pour développer des électroniques autonomes de très faible consommation.

Nous allons l'utiliser autrement pour la considérer comme un capteur solaire.

Ainsi pour dire que nous sommes à 1000W/m², nous allons positionner la lampe de telle façon à mesurer 1000 lux ; pour 800W/m²: 800 lux ; 500W/m² : 500 lux.

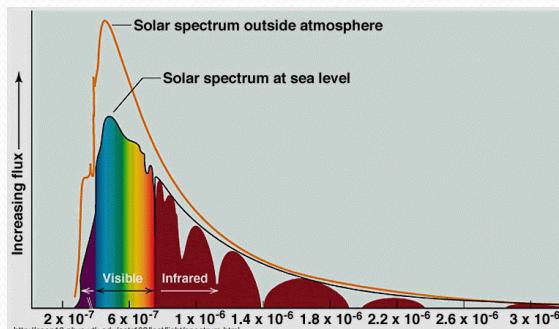
La relation que nous faisons entre les W/m² et les lux est complètement interdite, et fausse (à 1000 lux nous n'avons pas 1000W/m²).

Mais il serait contre-productif pour les élèves de tenter de leur expliquer la différence entre ces deux unités, nous ne nous attacherons pas d'ailleurs à la détailler ici.

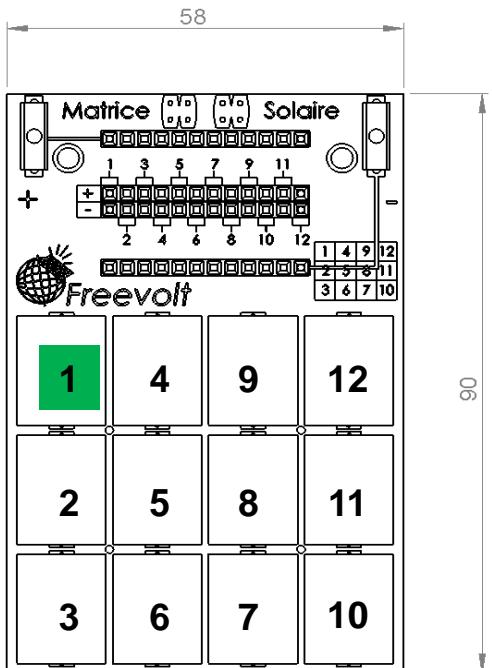
Le but des ces travaux pratiques est de montrer le fonctionnement, et les pièges à éviter avec des capteurs photovoltaïques.

Si nous sommes capables de les mesurer sous 1000 lux, à 1000W/m² les pertes de rendement n'en seront que plus importantes.

Enfin nous rappelons que ceci n'est pas un cours sur le solaire photovoltaïque, mais toute une série de TP sur la matrice solaire pour illustrer le fonctionnement de capteurs solaires.



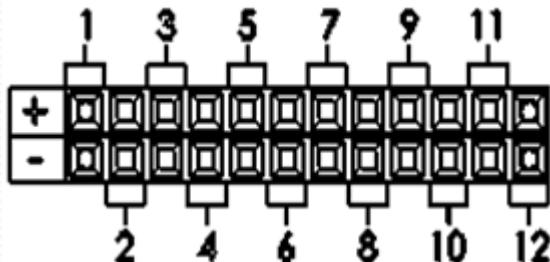
Comment câbler la carte



Nous avons déjà aperçu un début de câblage dans les spécifications.

Toutes les sorties des cellules sont ramenées sur le connecteur central.

les (+) en haut / les (-) en bas



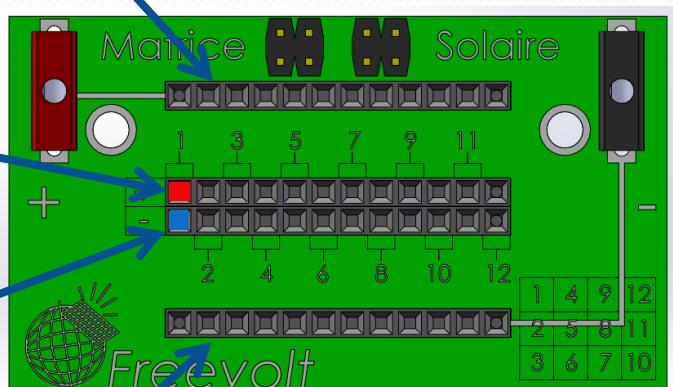
Les chiffres correspondent au N° de cellule et sont organisés suivant le tableau d'organisation.

Barrette commun (+)

(+) de la cellule 1

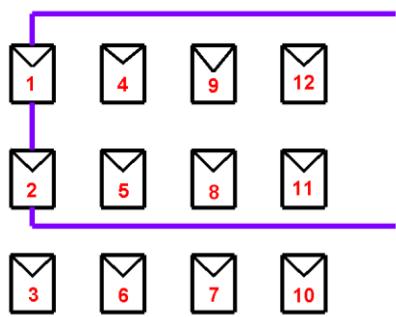
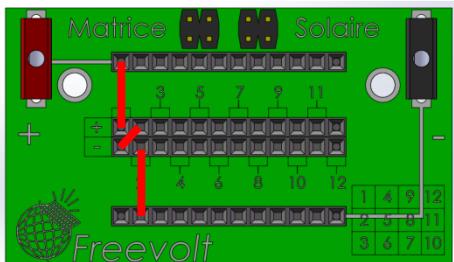
(-) de la cellule 1

Barrette commun (-)

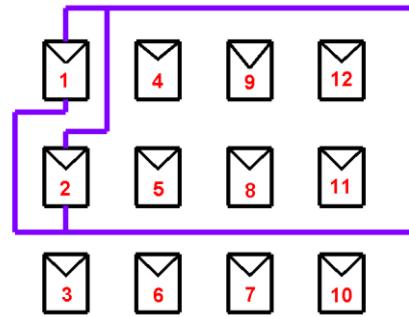
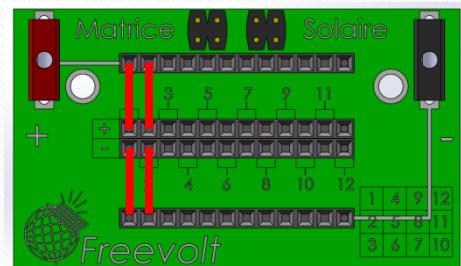


Comment câbler la carte

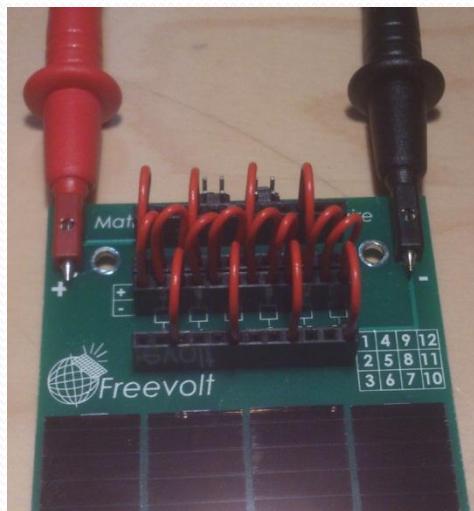
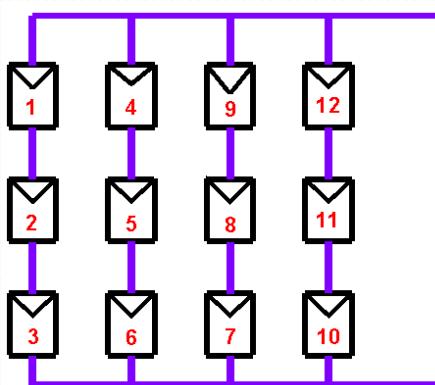
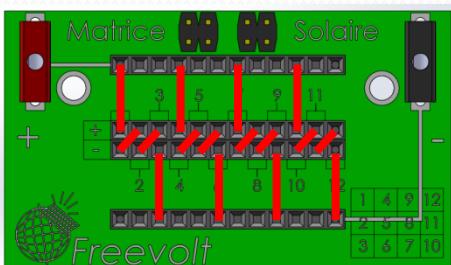
cellules 1 et 2 en série



cellules 1 et 2 en parallèle



Exemple de câblage série/ parallèle



Travail sur la cellule

(caractériser une cellule)

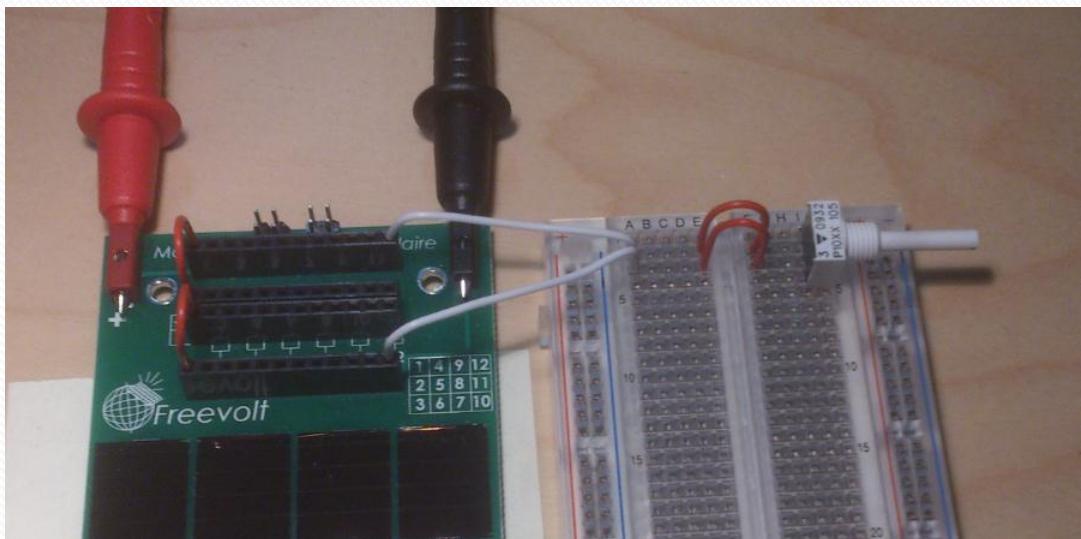
Positionner la lampe de façon à obtenir 1000 lux au niveau de la table.



Câbler la cellule 1.
Monter en parallèle une boîte à décade ou un potentiomètre $1M\Omega$.



Nous allons dans notre cas utiliser une breadboard avec 1 potentiomètre de $1M\Omega$.

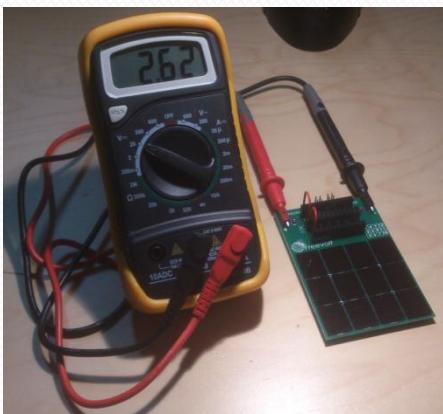
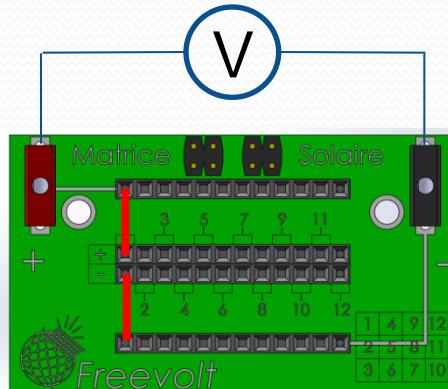


Travail sur la cellule

(caractériser une cellule)

Nous allons travailler sur la cellule 1.

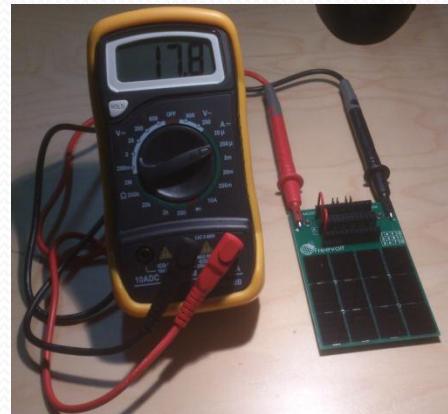
Ponter la cellule sur les borniers (+) et (-) de la carte et brancher le multimètre sur les sorties.



Mesurer le Voltage.

Vous venez de déterminer la tension en circuit ouvert (Voc) de la cellule sous 1000 lux.

Ici : **Voc=2,7 V**

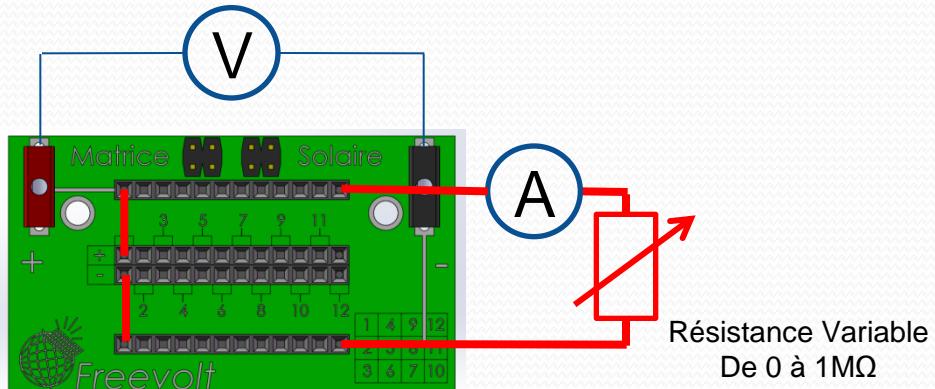


Mesurer l'ampérage.

Vous venez de déterminer le courant de court-circuit (Icc) de la cellule sous 1000 lux.

Ici : **Icc=22,8 μ A**

Brancher une charge variable pour pouvoir retracer la courbe $I=f(U)$



Comme nous l'avons évoqué nous utilisons une breadboard avec une résistance variable de 1MΩ (comme illustré page 10). Vous êtes libres de faire autrement, la carte offrant suffisamment de solutions de câblage.

Travail sur la cellule

(caractériser une cellule)



Faire varier la résistance et mesurez U et I .
 P sera recalculé.

Faible éclairement Point MPP

Sous 1000 lux

$U_{MPP} = 1,8 \text{ V}$

$I_{MPP} = 15,9 \mu\text{A}$

$P_{MPP} = 28,62 \mu\text{W}$

Faire plusieurs points de mesure.
 Tracez la courbe $I=f(U)$ en bleu
 Tracez la courbe $P=f(U)$ en rouge

Vous venez de tracer la caractéristique d'une cellule solaire sous 1000 lux.

Projeter le point max de la courbe $P=f(U)$ ici **$U_{max}=1,8V$**

À l'intersection de la courbe $I=f(U)$, projeter le point sur l'ordonnée ici **$I_{max}=15,9\mu\text{A}$**

Reprendre la carte, avec la boite à décade positionner vous à $U=1,8V$ / $I=15\mu\text{A}$

Mesurer la résistance, ici $R=122\text{K}\Omega$.

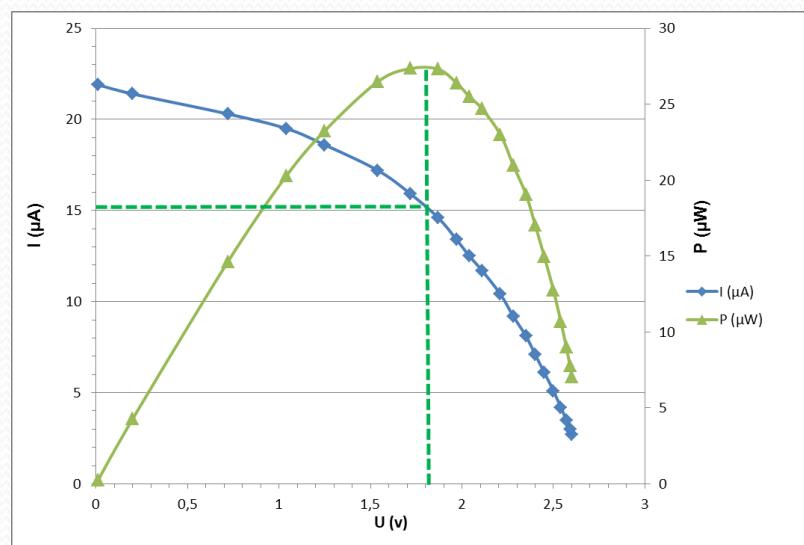
Félicitations,

Vous venez de retracer la courbe caractéristique de cette cellule sous 1000 lux
 avec une point de puissance max (Power point max MPP) à $1,8V/15\mu\text{A}$.

C'est donc avec une résistance de $122\text{K}\Omega$ qu'elle sera au meilleur rendement
 pour un éclairage de 1000 lux.

U (V)	I (μA)	P (μW)
2,61	2,7	7,047
2,57	3,8	9,766
2,53	4,9	12,397
2,49	5,8	14,442
2,44	6,9	16,836
2,4	7,8	18,72
2,35	8,8	20,68
2,28	10,1	23,028
2,22	11,1	24,642
2,12	12,6	26,712
2,05	13,6	27,88
1,98	14,5	28,71
1,86	15,8	29,388
1,74	16,9	29,406
1,62	18	29,16
1,48	19	28,12
1,22	20,2	24,644
1,06	20,8	22,048
0,8	21,6	17,28
0,58	21,9	12,702
0,37	22,3	8,251
0,21	22,7	4,767

Attention, en solaire, U est en abscisse et I en ordonnée.
 Ceci est une convention.

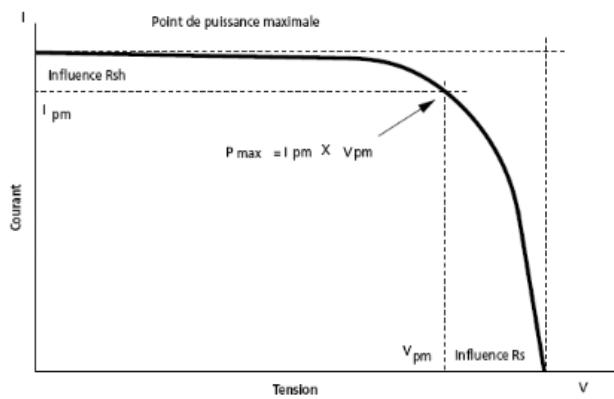


Chaque cellule a son comportement propre, il est peu probable que vous retrouviez exactement les mêmes valeurs d'une carte à l'autre (nous en verrons les raisons plus tard).

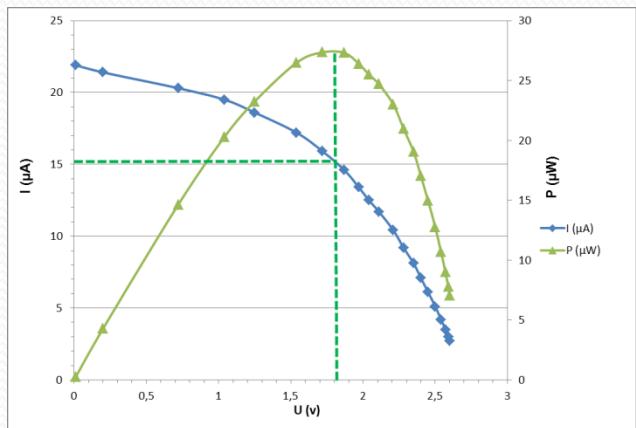
Travail sur la cellule

(caractériser une cellule)

Comparaison entre la mesure et la théorie.



Courbe caractéristique d'un capteur solaire



Courbe mesurée

Nous voyons bien que sur la figure de droite (mesure effectuée), nous retrouvons la forme de la courbe théorique d'une cellule.

Par conséquent, nous avons bien retracé la courbe caractéristique d'une cellule solaire.

Toutefois, si notre tracé ne marque pas aussi bien la chute d'ampérage que sur le graphique de gauche, ceci est principalement dû au niveau d'énergie avec lequel nous travaillons.

Nous travaillons avec une lampe halogène sous 1000 lux, alors que les courbes caractéristiques de cellules sont faites sous 1000W/m² avec une lampe solar spectrum (courbe de gauche).

Travail sur la cellule

(caractérisation sous différentes irradiations)

Positionnez la lampe de façon à obtenir **800 lux** au niveau de la table.



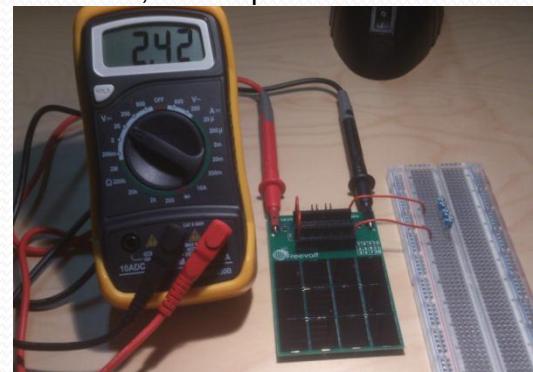
Sur la courbe nous voyons que la cellule a un peu perdu en puissance, car P_{mpp} est passée de $28,6\mu\text{W}$ à $22,5\mu\text{W}$.

U_{mpp} est restée constante et I_{mpp} a chuté.

De plus, lorsque que nous mesurons la résistance au point MPP, elle a changé $R = 143\text{K}\Omega$

U (V)	I (μA)	P (μW)
2,55	2,6	6,63
2,51	3,6	9,04
2,45	4,6	11,27
2,4	5,7	13,68
2,34	6,7	15,68
2,28	7,7	17,56
2,22	8,5	18,87
2,12	9,8	20,78
2,02	10,8	21,82
1,92	11,7	22,47
1,78	12,8	22,79
1,64	13,8	22,64
1,49	14,7	21,91
1,28	15,4	19,72
1,09	16,1	17,55
0,86	16,6	14,28
0,66	17	11,22
0,47	17,4	8,18
0,23	17,8	4,1
0,12	18	2,16

Câblez la cellule 1.
Montez en parallèle soit une boîte à décade, soit un potentiomètre $1\text{M}\Omega$.



Recherchez V_{oc} et I_{cc} $P(11)$.
(ici : $V_{oc} = 2,66\text{V}$; $I_{cc} = 18,2\mu\text{A}$)

Retracez la courbe $I=f(U)$
comme nous l'avons fait dans
l'exercice précédent (P12).

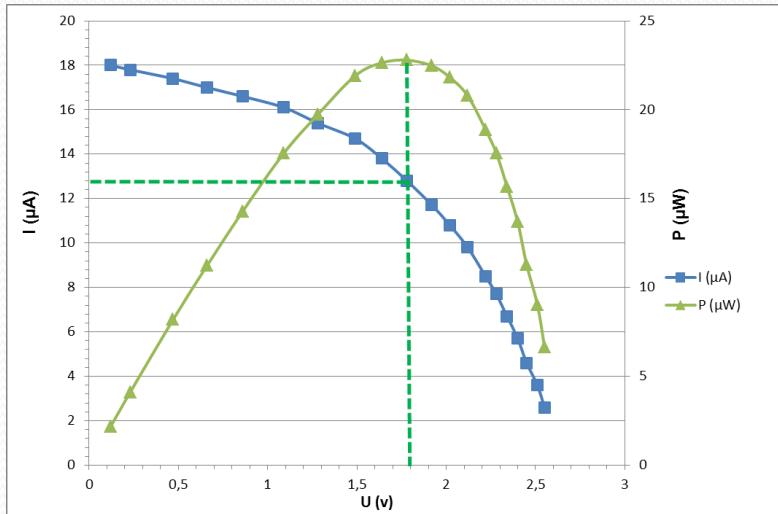
Faible éclairement Point MPP

Sous 800 lux

$U_{mpp} = 1,8\text{ V}$

$I_{mpp} = 12,5\mu\text{A}$

$P_{mpp} = 22,5\mu\text{W}$



Chaque cellule a son comportement propre, il est peu probable que vous retrouviez exactement les mêmes valeurs d'une carte à l'autre (nous en verrons les raisons plus tard).

Travail sur la cellule

(caractérisation sous différentes irradiations)

Allons plus loin et traçons la courbe sous 500 lux, pour voir ce qu'il se passe.

Positionnez la lampe de façon à obtenir **500 lux** au niveau de la table.



Câblez la cellule 1.
Montez en parallèle soit une boîte à décade, soit un potentiomètre $1M\Omega$.



Recherchez V_{oc} et I_{cc} $P(11)$.
(ici : $V_{oc} = 2,58V$; $I_{cc} = 12,3\mu A$)

Retracez la courbe $I=f(U)$
Comme nous l'avons fait dans
l'exercice précédent (P12).

Sur la courbe nous voyons que la cellule a encore perdu en puissance, car P_{mpp} est passée de $22,5\mu W$ à $14,32\mu W$.

Et U_{mpp} est restée à peu près constante, c'est encore I_{mpp} qui a chuté.

De plus, lorsque que nous mesurons la résistance au point MPP, elle a encore changé $R = 253K\Omega$.

Faible éclairement Point MPP

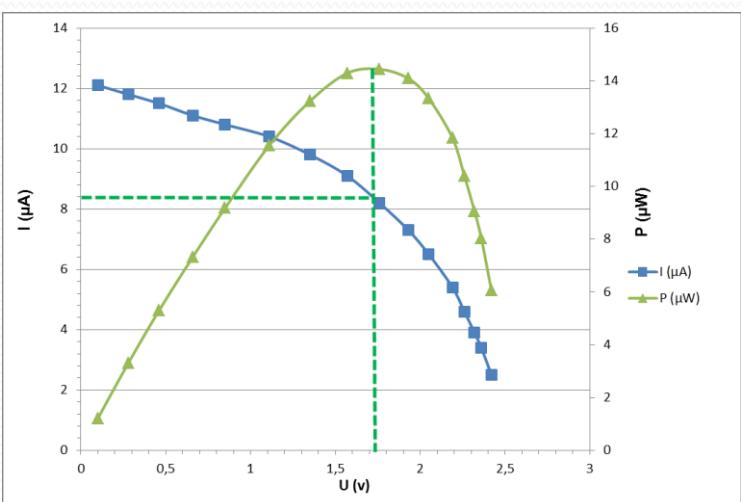
Sous 500 lux

$U_{mpp} = 1,76 V$

$I_{mpp} = 8,2 \mu A$

$P_{mpp} = 14,32 \mu W$

U (V)	I (μA)	P (μW)
2,42	2,5	6,05
2,36	3,4	8,024
2,32	3,9	9,048
2,26	4,6	10,396
2,19	5,4	11,826
2,05	6,5	13,325
1,93	7,3	14,089
1,76	8,2	14,432
1,57	9,1	14,287
1,35	9,8	13,23
1,11	10,4	11,544
0,85	10,8	9,18
0,66	11,1	7,326
0,46	11,5	5,29
0,28	11,8	3,304
0,1	12,1	1,21

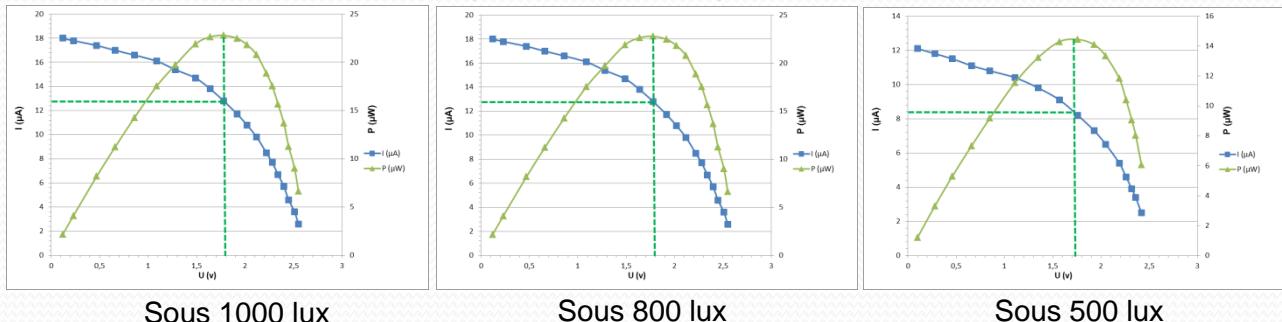


Chaque cellule a son comportement propre, il est peu probable que vous retrouviez exactement les mêmes valeurs d'une carte à l'autre (nous en verrons les raisons plus tard).

Travail sur la cellule

(caractérisation sous différentes irradiations)

Mais que s'est-il passé dans le comportement de la cellule?

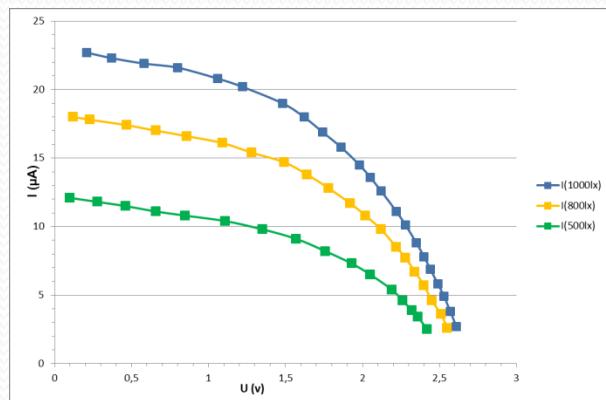


Sous 1000 lux

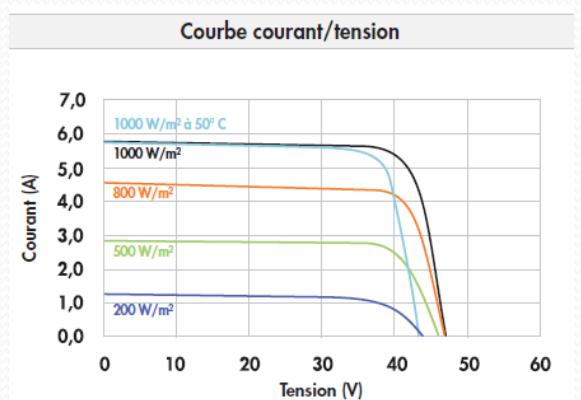
Sous 800 lux

Sous 500 lux

Et si nous superposions les courbes $I=f(U)$?



Nos tracés



Tracé d'un capteur

Que pouvons-nous en conclure?

Bien que l'irradiation influence peu le voltage mais joue énormément sur l'ampérage.

De ce fait, sur un capteur solaire en cas de temps couvert, c'est l'ampérage qui chute alors que le voltage reste à peu près constant.

Regardons si cela se vérifie avec V_{oc} et I_{cc} .

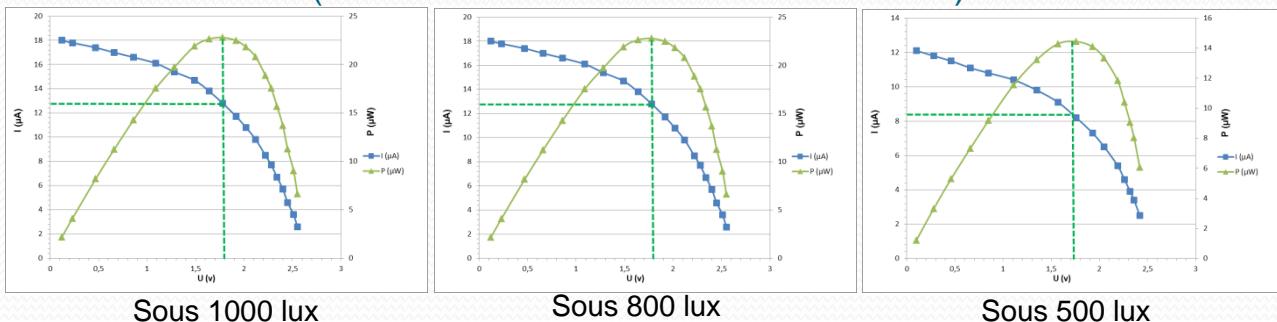
Sous 1000 lux	Sous 800 lux	Sous 500 lux
$V_{\text{oc}} = 2,7 \text{ V}$	$V_{\text{oc}} = 2,66 \text{ V}$	$V_{\text{oc}} = 2,58 \text{ V}$
$I_{\text{cc}} = 22,8 \mu\text{A}$	$I_{\text{cc}} = 18,2 \mu\text{A}$	$I_{\text{cc}} = 12,3 \mu\text{A}$

Nous retrouvons bien la même tendance.
U reste à peu près constante alors que I s'écroule.

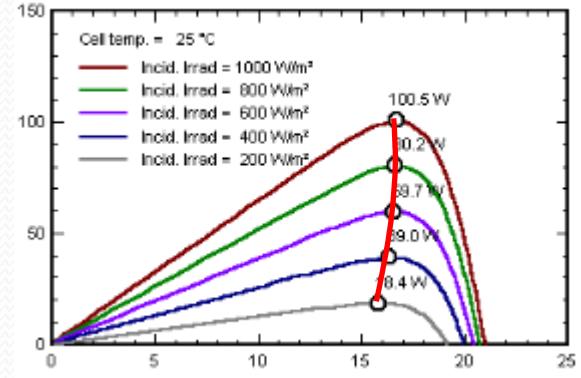
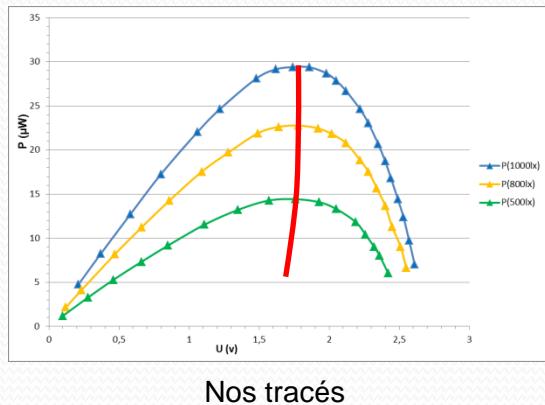
Chaque cellule a son comportement propre, il est peu probable que vous retrouviez exactement les mêmes valeurs d'une carte à l'autre (nous en verrons les raisons plus tard).

Travail sur la cellule

(le Point Maximum de Puissance: MPP)



Et si nous superposons les courbes $P=f(U)$?



Ici, nous retrouvons la forme caractéristique de des courbes de puissance d'un capteur.

Et si l'on relie entre eux les points max, comme sur la courbe de droite, nous retrouvons bien la courbe caractéristique de la variation des MPP en fonction de la puissance de rayonnement.

Que pouvons-nous en conclure?

Quelque soit la puissance en W/m^2 , un capteur solaire aura un point MPP qui va se situer à peu près à un voltage constant.

Vérifions-le en reprenant les valeurs de MPP que nous avons trouvées.

Sous 1000 lux	Sous 800 lux	Sous 500 lux
$V_{mpp} = 1,8 \text{ V}$	$V_{mpp} = 1,8 \text{ V}$	$V_{mpp} = 1,76 \text{ V}$
$I_{mpp} = 15,9 \mu\text{A}$	$I_{mpp} = 12,5 \mu\text{A}$	$I_{mpp} = 8,2 \mu\text{A}$
$R = 113 \text{k}\Omega$	$R = 143 \text{k}\Omega$	$R = 253 \text{k}\Omega$

N'oublions pas que pour trouver ces points MPP, nous avons fait varier la résistance de charge : $R(\Omega)$.

Donc si l'on souhaite récupérer le maximum d'énergie d'un capteur solaire, il faut veiller à toujours rester sur le point MPP. Pour cela il faut que notre électronique soit capable de faire varier une résistance pour trouver ce fameux MPP.

Tiens, mais au fait, dans un onduleur, n'y a-t'il pas une fonction qui s'appelle : recherche de MPP?

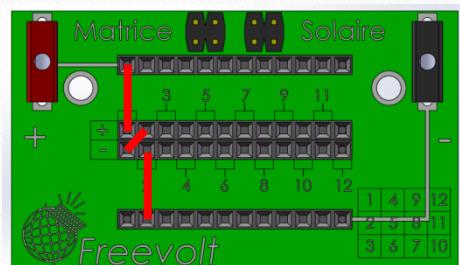
Travail sur la cellule

(Montage série)

Positionnez la lampe de façon à obtenir 1000 lux au niveau de la table.



Câblez les cellules 1 et 2 en série.



Nous allons refaire exactement le même TP que sur les pages 11 et 12 mais cette fois-ci avec 2 cellules en série.

Recherchez V_{oc} et I_{cc} P(11).



Ici : $V_{oc} = 5.26 \text{ V}$
(C'est presque le double)



Ici : $I_{cc} = 23,9 \mu\text{A}$
(ici, cela n'a quasiment pas bougé)

Nous pouvons presque déjà conclure que en série les tensions s'additionnent mais pas les ampéragés.

Retraçons la courbe de ce couple de cellule.

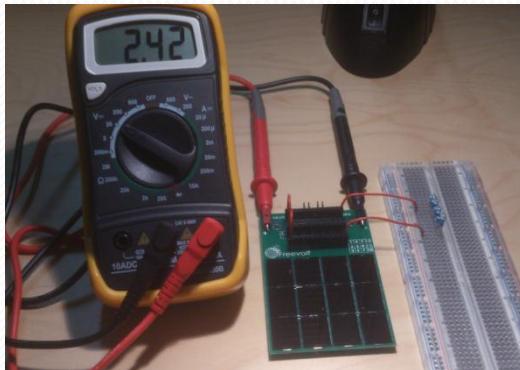
Chaque cellule a son comportement propre, il est peu probable que vous retrouviez exactement les mêmes valeurs d'une carte à l'autre (nous en verrons les raisons plus tard).

Travail sur la cellule

(Montage série)

Tracez la courbe caractéristique de deux cellules en série.

Montez en parallèle soit une boîte à décade, soit un potentiomètre de $2M\Omega$.



Faible éclairement Point MPP

Sous 1000 lux

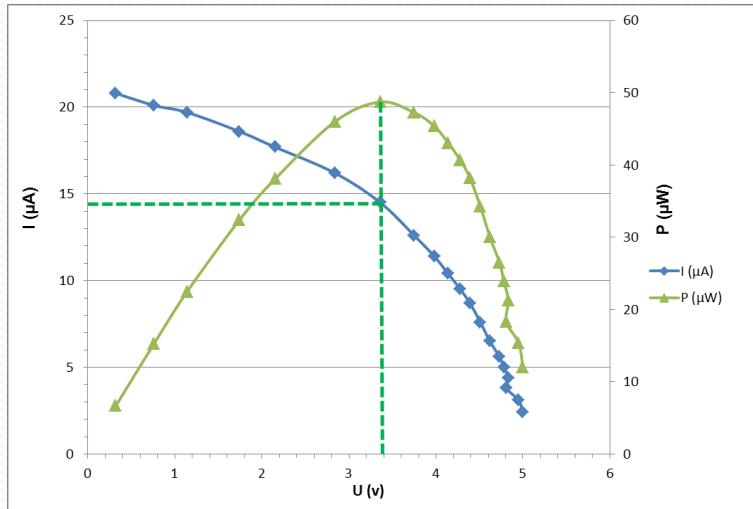
$U_{MPP} = 3,36 \text{ V}$

$I_{MPP} = 14,5 \mu\text{A}$

$P_{MPP} = 48,72 \mu\text{W}$

Faites un relevé de points pour tracer
La courbe $I=f(U)$.

$U \text{ (V)}$	$I \text{ (\mu A)}$	$P \text{ (\mu W)}$
5	2,4	12
4,95	3,1	15,345
4,81	3,8	18,278
4,83	4,4	21,252
4,78	5	23,9
4,73	5,6	26,488
4,62	6,5	30,03
4,51	7,6	34,276
4,39	8,7	38,193
4,28	9,5	40,66
4,14	10,4	43,056
3,98	11,4	45,372
3,75	12,6	47,25
3,36	14,5	48,72
2,84	16,2	46,008
2,15	17,7	38,055
1,74	18,6	32,364
1,14	19,7	22,458
0,76	20,1	15,276
0,32	20,8	6,656



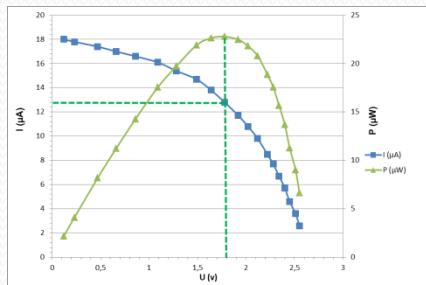
Regardons ce qu'il s'est passé.

Chaque cellule a son comportement propre, il est peu probable que vous retrouviez exactement les mêmes valeurs d'une carte à l'autre (nous en verrons les raisons plus tard).

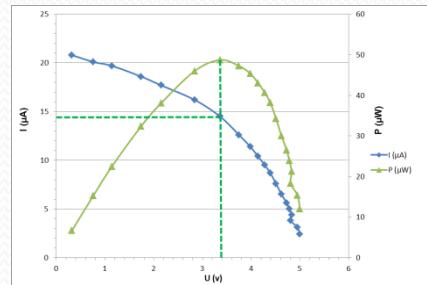
Travail sur la cellule

(Montage série)

Mais que s'est-il passé dans le comportement des cellules?

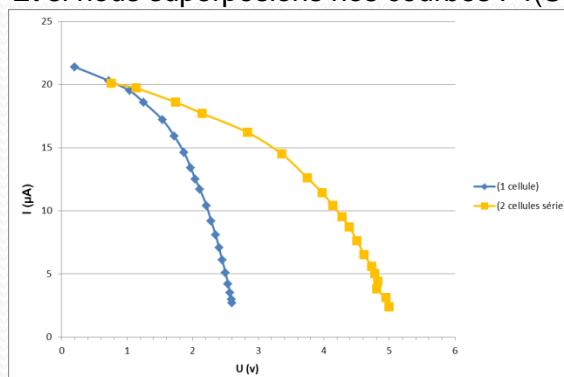


1 cellule sous 1000lux



2 cellules en série sous 1000lux

Et si nous superposions nos courbes $I=f(U)$?



Que pouvons-nous en conclure?

Comme nous l'avions pressenti, les tensions s'additionnent et les ampérages ne s'additionnent pas.

Qu'en est-il maintenant au niveau du MPP ? Comparons :

1 cellule sous 1000 lux	2 cellules en série sous 1000 lux
$V_{MPP} = 1,8 \text{ V}$	$V_{MPP} = 3,36 \text{ V}$
$I_{MPP} = 15,9 \mu\text{A}$	$I_{MPP} = 14,5 \mu\text{A}$
$P_{MPP} = 28,62 \mu\text{W}$	$P_{MPP} = 48,72 \mu\text{W}$

On constate que la tension MPP a presque doublé, que le courant MPP est à peu près équivalent (*) et que la puissance a presque doublé.

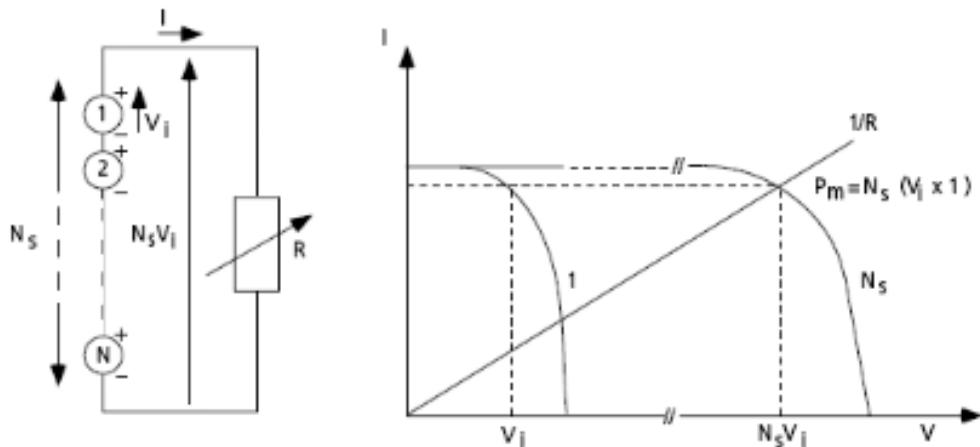
(*) N'oublions pas que nous faisons des mesures sous de très faibles niveaux. De plus nous rappelons qu'obtenir deux cellules absolument identiques est techniquement impossible, nous expliquerons le phénomène plus loin.

Chaque cellule a son comportement propre, il est peu probable que vous retrouviez exactement les mêmes valeurs d'une carte à l'autre (nous en verrons les raisons plus tard).

Travail sur la cellule

(Montage série)

Qu'en est-il de la théorie?

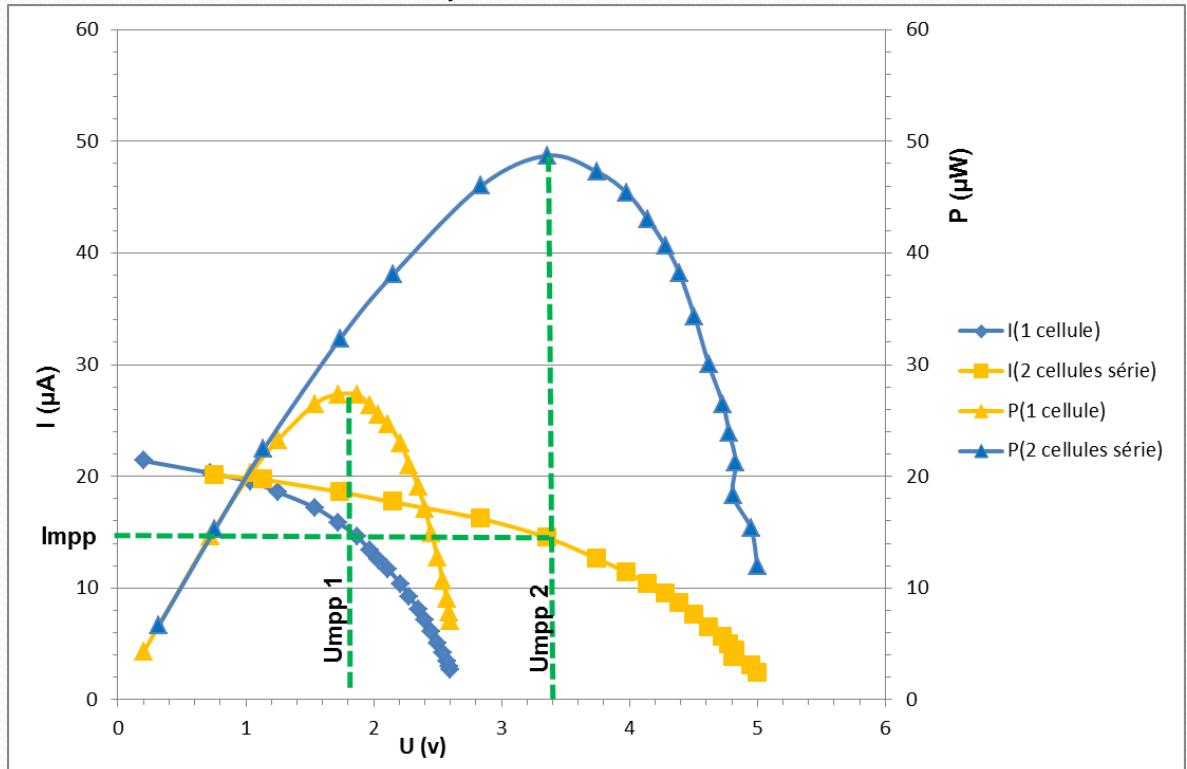


Et bien oui !

Lorsque l'on monte deux cellules en série, les tensions s'additionnent et pas le courant.

Les tensions U_{mpp} s'additionnent et le courant I_{mpp} reste inchangé.

Voyons cela sur nos tracés :



Chaque cellule a son comportement propre, il est peu probable que vous retrouviez exactement les mêmes valeurs d'une carte à l'autre (nous en verrons les raisons plus tard).

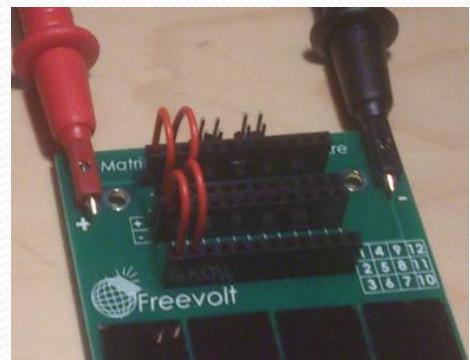
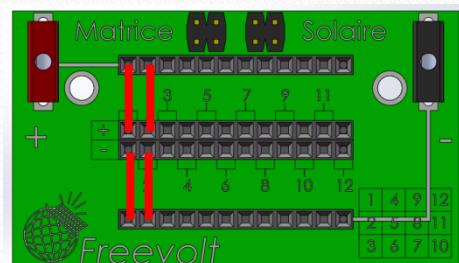
Travail sur la cellule

(Montage parallèle)

Positionnez la lampe de façon à obtenir 1000 lux au niveau de la table



Câblez les cellules 1 et 2 en parallèle



Nous allons refaire exactement le même TP que sur les pages 11 et 12 mais cette fois-ci avec 2 cellules en parallèle.

Recherchez V_{oc} et I_{cc} P(11).



Ici : $V_{oc} = 2,69 \text{ V}$
(ici, cela n'a quasiment pas bougé)



Ici : $I_{cc} = 48,3 \mu\text{A}$
(C'est presque le double)

Nous pouvons presque déjà conclure qu'en parallèle, les ampéragages s'additionnent mais pas les tensions.

Retraçons la courbe de ce couple de cellule.

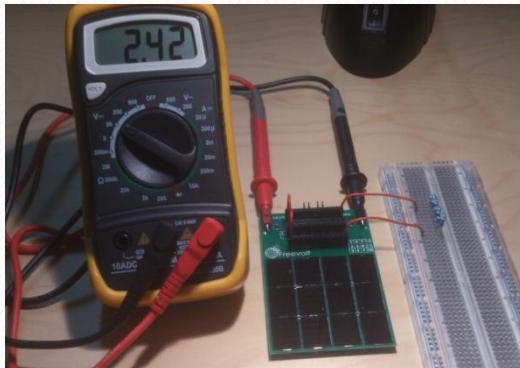
Chaque cellule a son comportement propre, il est peu probable que vous retrouviez exactement les mêmes valeurs d'une carte à l'autre (nous en verrons les raisons plus tard).

Travail sur la cellule

(Montage parallèle)

Tracez la courbe caractéristique de deux cellules en parallèle.

Montez en parallèle soit une boîte à décade, soit un potentiomètre de $1\text{M}\Omega$.



Faible éclairement Point MPP

Sous 1000 lux

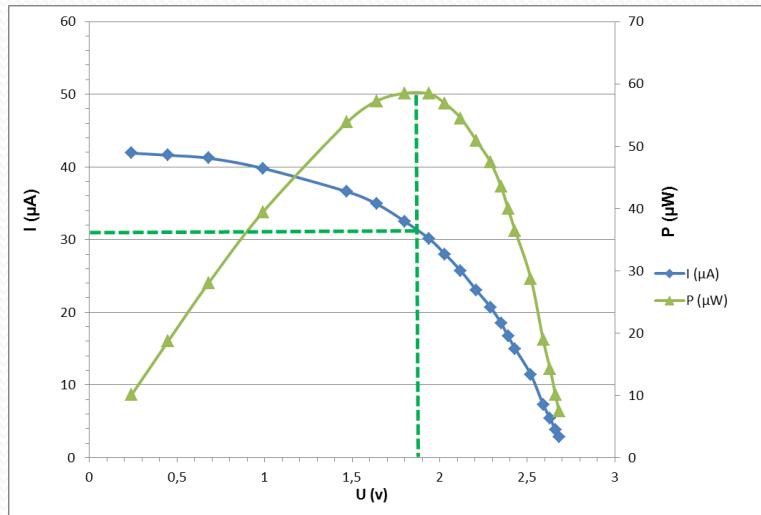
$U_{\text{MPP}} = 1,9 \text{ V}$

$I_{\text{MPP}} = 31,5 \mu\text{A}$

$P_{\text{MPP}} = 59,85 \mu\text{W}$

Faites un relevé de points pour tracer la courbe $I=f(U)$.

$U \text{ (V)}$	$I \text{ (\mu A)}$	$P \text{ (\mu W)}$
2,68	2,8	7,504
2,66	3,8	10,108
2,63	5,4	14,202
2,59	7,3	18,907
2,52	11,4	28,728
2,43	15	36,45
2,39	16,7	39,913
2,35	18,5	43,475
2,29	20,7	47,403
2,21	23	50,83
2,12	25,7	54,484
2,03	28	56,84
1,94	30,1	58,394
1,8	32,5	58,5
1,64	34,9	57,236
1,47	36,6	53,802
0,99	39,8	39,402
0,68	41,2	28,016
0,45	41,6	18,72
0,24	41,9	10,056



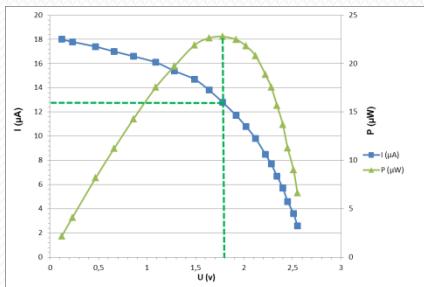
Regardons ce qu'il s'est passé.

Chaque cellule a son comportement propre, il est peu probable que vous retrouviez exactement les mêmes valeurs d'une carte à l'autre (nous en verrons les raisons plus tard).

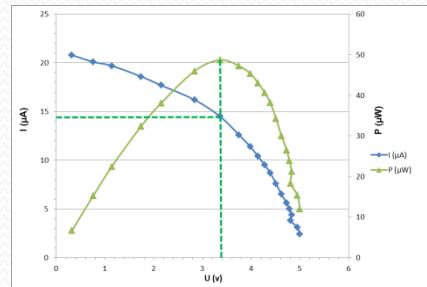
Travail sur la cellule

(Montage parallèle)

Que s'est-il passé dans le comportement des cellules?

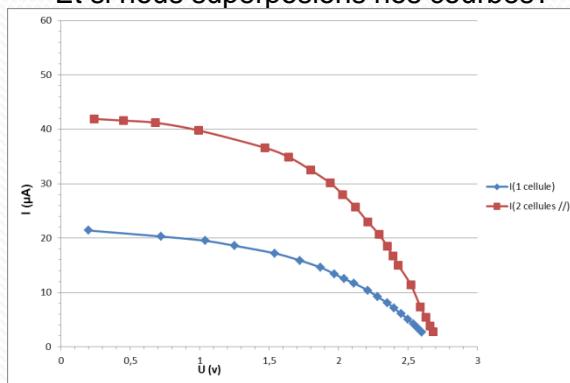


1 cellule sous 1000lux



2 cellules en parallèles sous 1000lux

Et si nous superposons nos courbes?



Que pouvons-nous en conclure?

Comme nous l'avions pressenti, les ampérages s'additionnent et les tensions ne s'additionnent pas.

Qu'en est-il maintenant au niveau du MPP ? Comparons :

1 cellule sous 1000 lux	2 cellules en série sous 1000 lux
$V_{MPP} = 1,8 \text{ V}$	$V_{MPP} = 1,9 \text{ V}$
$I_{MPP} = 15,9 \mu\text{A}$	$I_{MPP} = 31,5 \mu\text{A}$
$P_{MPP} = 28,62 \mu\text{W}$	$P_{MPP} = 59,85 \mu\text{W}$

On constate que l'ampéragage MPP a presque doublé, que la tension MPP est à peu près équivalente (*) et que la puissance a presque doublé.

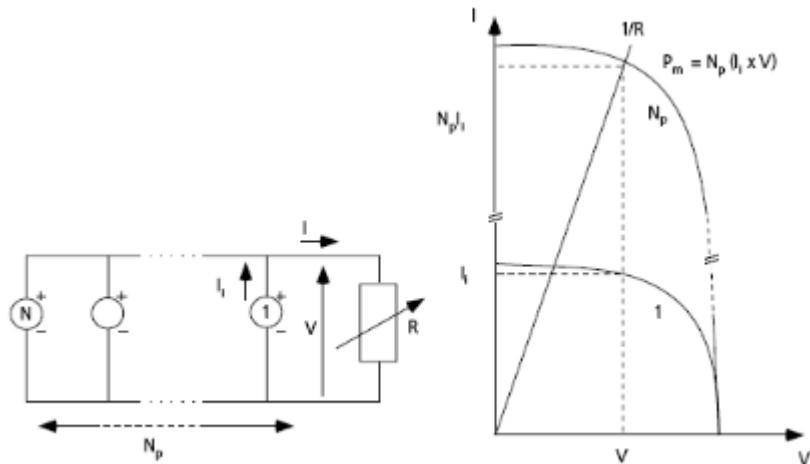
(*) N'oublions pas que nous faisons des mesures sous de très faibles niveaux. De plus nous rappelons qu'obtenir deux cellules absolument identiques est techniquement impossible, nous expliquerons le phénomène plus loin.

Chaque cellule a son comportement propre, il est peu probable que vous retrouviez exactement les mêmes valeurs d'une carte à l'autre (nous en verrons les raisons plus tard).

Travail sur la cellule

(Montage parallèle)

Qu'en est-il de la théorie?

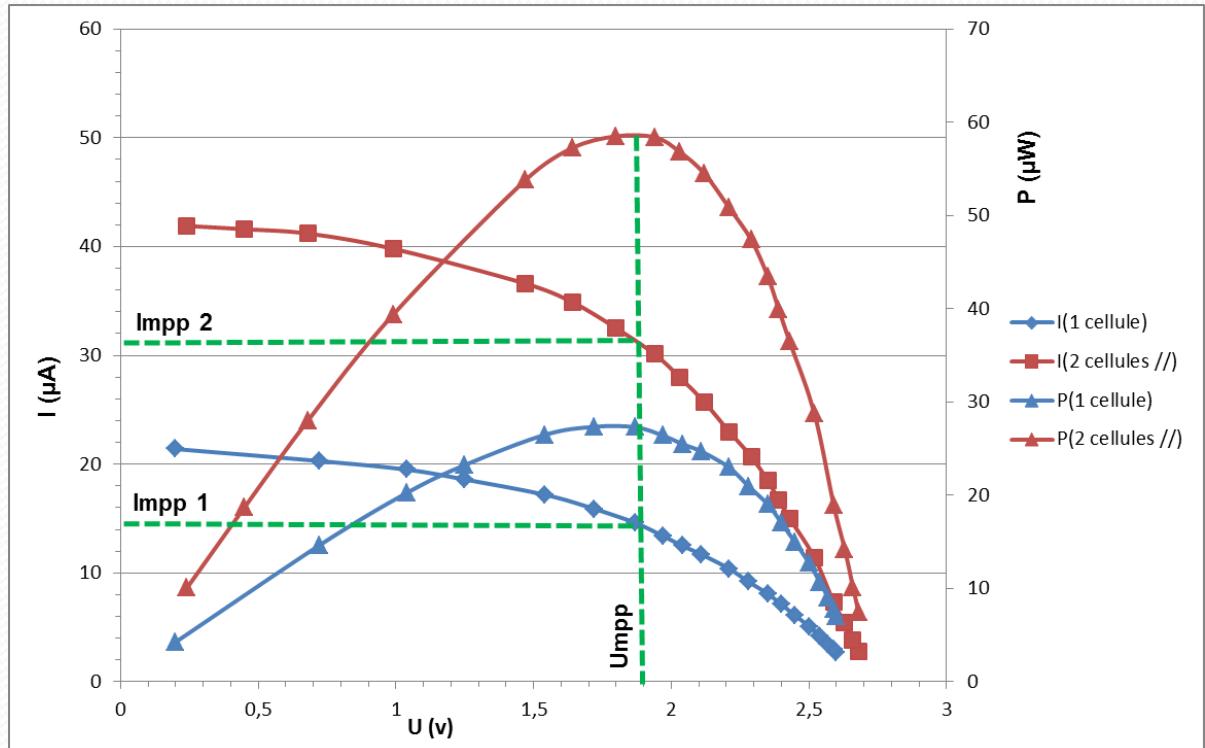


Et bien oui !

Lorsque l'on monte deux cellules en parallèle, les ampérages s'additionnent mais pas les tensions.

Les courants I_{mpp} s'additionnent et la tension U_{mpp} reste inchangée.

Voyons cela sur nos tracés :



Chaque cellule a son comportement propre, il est peu probable que vous retrouviez exactement les mêmes valeurs d'une carte à l'autre (nous en verrons les raisons plus tard).

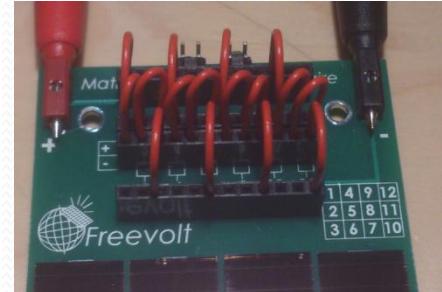
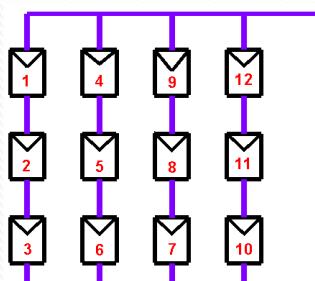
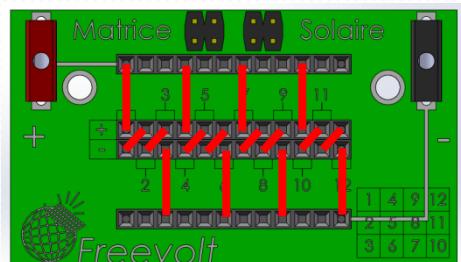
Travail sur la cellule

(Montage série + parallèle)

Positionnez la lampe de façon à obtenir 1000 lux au niveau de la table.



Câblez les 12 cellules comme indiqué.



Nous allons refaire exactement le même TP que sur les pages 11 et 12 mais cette fois-ci, en ayant câblé toutes les liaisons du capteur comme le schéma (mais vous pouvez en faire un autre).

Si vous faites travailler différents élèves en même temps, faites-les tous travailler sur le même schéma de câblage, vous mettrez leurs résultats en comparaison.

Recherchez V_{oc} et I_{cc} P(11).



Ici : $V_{oc} = 7 \text{ V}$
(3 en série: $2,7 \times 3 = 8,1 \text{ V}$) ?



Ici : $I_{cc} = 91,9 \mu\text{A}$
(4 en parallèle: $22,8 \times 4 = 91,2 \mu\text{A}$)

(*) N'oublions pas que nous faisons des mesures sous de très faibles niveaux. De plus nous rappelons qu'obtenir deux cellules absolument identiques est techniquement impossible, nous expliquerons le phénomène plus loin.

Chaque cellule a son comportement propre, il est peu probable que vous retrouviez exactement les mêmes valeurs d'une carte à l'autre (nous en verrons les raisons plus tard).

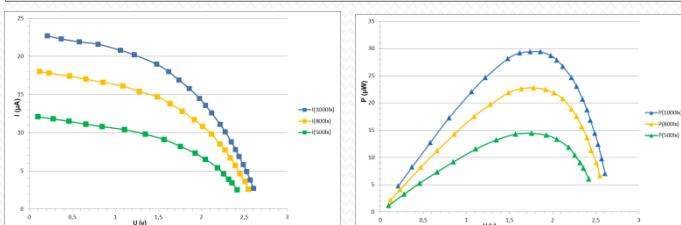
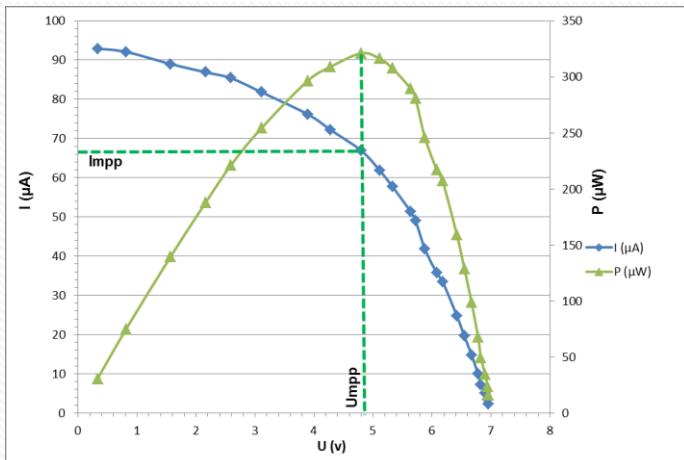
Travail sur la cellule

(Montage série + parallèle)

Tracez la courbe caractéristique de cette organisation.

Tracez la courbe.

Faites un relevé de points pour tracer la courbe $I=f(U)$.

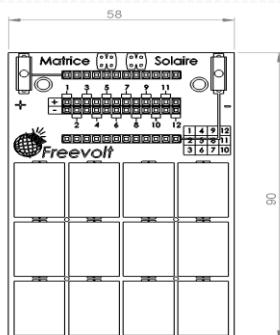
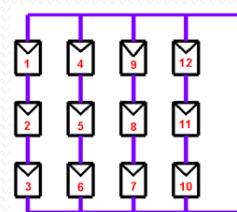


U (V)	I (μA)	P (μW)
6,95	2,3	15,99
6,94	3,4	23,6
6,9	5	34,5
6,83	7,2	49,18
6,78	10	67,8
6,67	14,8	98,72
6,55	19,6	128,38
6,42	24,8	159,22
6,18	33,5	207,03
6,08	35,7	217,06
5,88	41,8	245,79
5,72	49,1	280,86
5,64	51,3	289,34
5,33	57,7	307,55
5,11	61,9	316,31
4,8	66,9	321,12
4,28	72,2	309,02
3,89	76,2	296,42
3,11	81,8	254,4
2,59	85,4	221,19
2,16	86,9	187,71
1,57	89	139,73
0,81	92,1	74,61
0,33	92,9	30,66

Rappelez les conditions de test

Ecrivez vos résultats

Conditions de test	Test électrique
Sous 1000 lux	Puissance : 321μW
Température 20°C	$V_{mpp} = 4,8V$
Technologie Amorphe.	$I_{mpp} = 66,8 \mu A$
Nombre de cellules : 12	$V_{oc} = 7 V$
Câblage des cellules : strings de 3 cellules montées en parallèle	$I_{cc} = 91,9 \mu A$ Tension maximale admissible 100V



Félicitations,

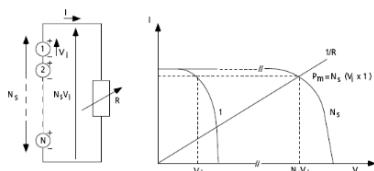
**Vous venez de câbler un capteur solaire de 321μW.
Et vous venez d'en faire le flash test sous 1000 lux à 20°C.**

Chaque cellule a son comportement propre, il est peu probable que vous retrouviez exactement les mêmes valeurs d'une carte à l'autre (nous en verrons les raisons plus tard).

Travail sur la cellule

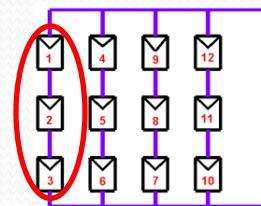
(les écarts dûs à la qualité des cellules)

Repronons la théorie.



Montage série, on additionne les tensions.

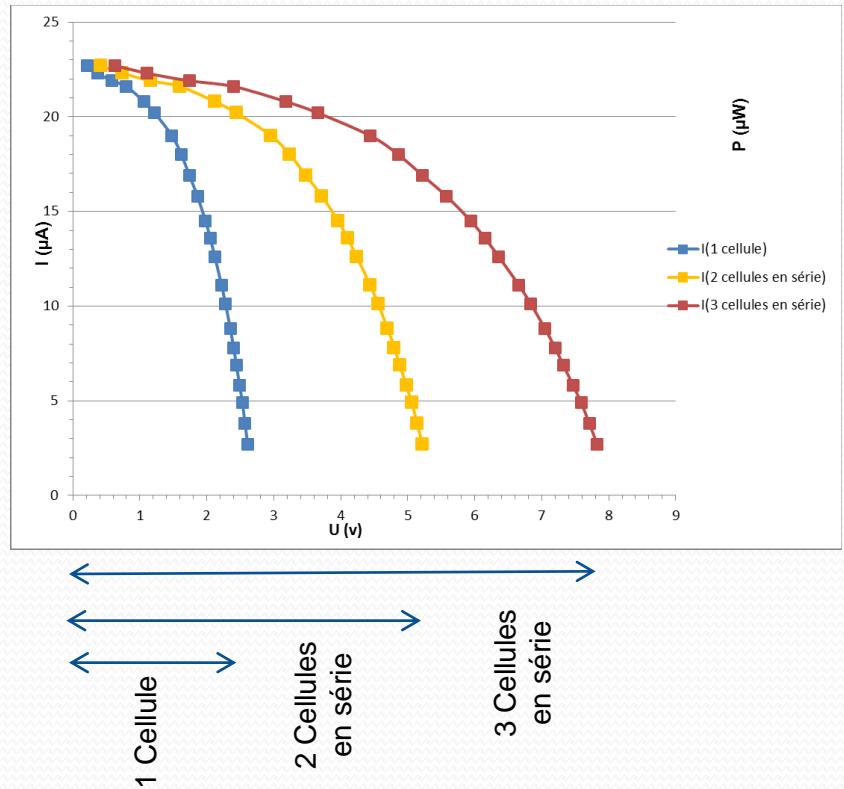
Comme nous avons monté 3 cellules en série, logiquement, si nous reprenons la courbe caractéristique d'une cellule et comme ce sont 3 fois les mêmes cellules, on peut additionner les 3 fois la tension d'une cellule.



Faisons-le!

Reprenez votre relevé pour une cellule et multipliez U par 3.

U (V)	I (μ A)	P (μ W)
7,83	2,7	21,141
7,71	3,8	29,298
7,59	4,9	37,191
7,47	5,8	43,326
7,32	6,9	50,508
7,2	7,8	56,16
7,05	8,8	62,04
6,84	10,1	69,084
6,66	11,1	73,926
6,36	12,6	80,136
6,15	13,6	83,64
5,94	14,5	86,13
5,58	15,8	88,164
5,22	16,9	88,218
4,86	18	87,48
4,44	19	84,36
3,66	20,2	73,932
3,18	20,8	66,144
2,4	21,6	51,84
1,74	21,9	38,106
1,11	22,3	24,753
0,63	22,7	14,301

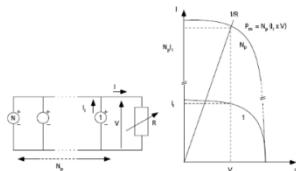


Nous avons maintenant la caractéristique pour 3 cellules en série courbe rouge.

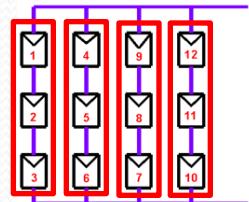
Travail sur la cellule

(les écarts dûs à la qualité des cellules)

Montons nos cellules en parallèle.



Montage parallèle, on additionne les courants.



Donc, comme nous avons monté 4x(3 cellules) en parallèle, logiquement, si nous reprenons la courbe caractéristique de 3 cellules et comme ce sont toutes les mêmes cellules, on peut additionner 4 fois l'ampérage de cette série de cellule.
(4x3=12)

Faisons-le!

Reprenez votre relevé pour 3 cellules et multipliez I par 4.

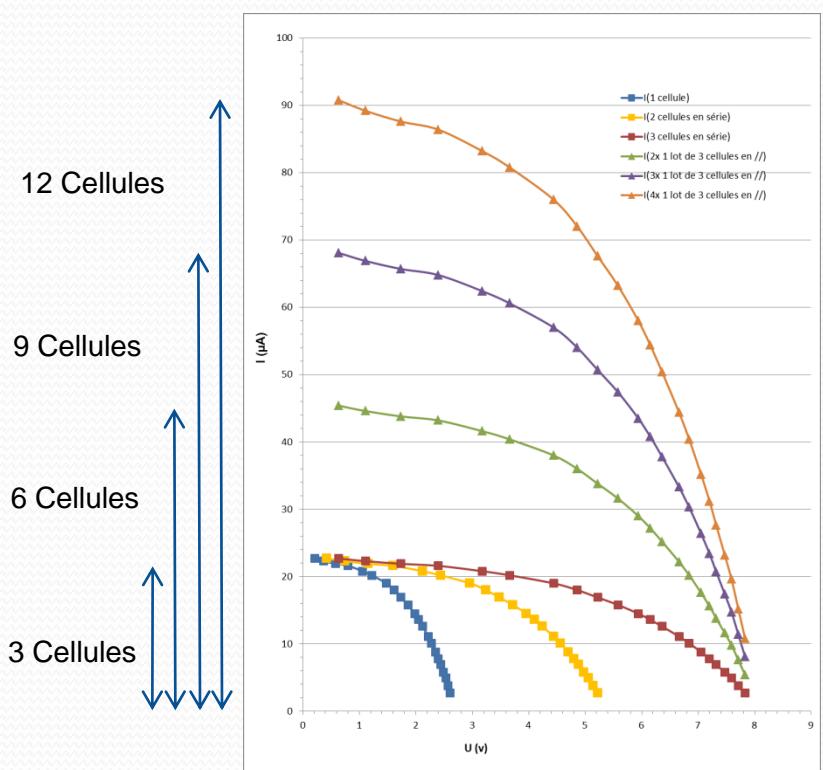
U (V)	I (µA)	P (µW)
7,83	10,8	84,564
7,71	15,2	117,192
7,59	19,6	148,764
7,47	23,2	173,304
7,32	27,6	202,032
7,2	31,2	224,64
7,05	35,2	248,16
6,84	40,4	276,336
6,66	44,4	295,704
6,36	50,4	320,544
6,15	54,4	334,56
5,94	58	344,52
5,58	63,2	352,656
5,22	67,6	352,872
4,86	72	349,92
4,44	76	337,44
3,66	80,8	295,728
3,18	83,2	264,576
2,4	86,4	207,36
1,74	87,6	152,424
1,11	89,2	99,012
0,63	90,8	57,204

12 Cells

9 Cells

6 Cells

3 Cells



Nous avons maintenant la caractéristique théorique pour 4x3 cellules en montage série / parallèle courbe orange.

Travail sur la cellule

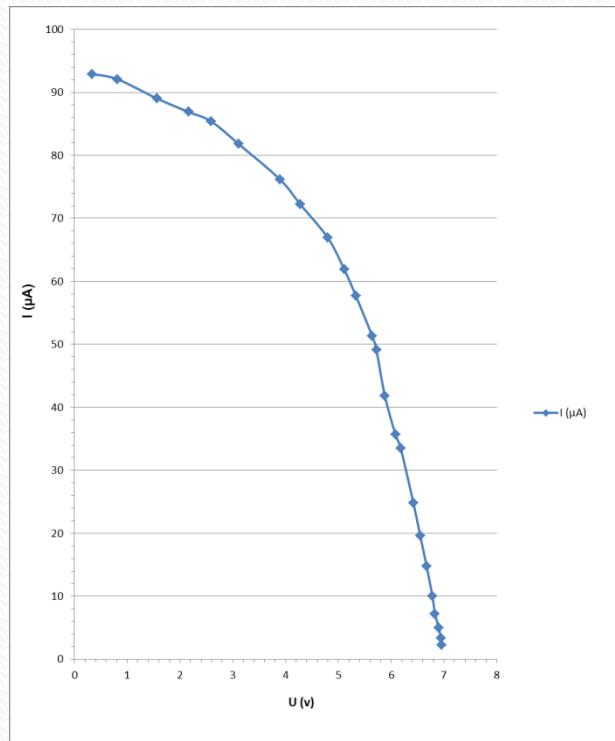
(les écarts dûs à la qualité des cellules)

Mesurons notre carte.

Pour cela, vous allez utiliser une résistance variable de $4M\Omega$.

Retracer la courbe $I=f(U)$

U (V)	I (μA)	P (μW)
6,95	2,3	15,99
6,94	3,4	23,6
6,9	5	34,5
6,83	7,2	49,18
6,78	10	67,8
6,67	14,8	98,72
6,55	19,6	128,38
6,42	24,8	159,22
6,18	33,5	207,03
6,08	35,7	217,06
5,88	41,8	245,79
5,72	49,1	280,86
5,64	51,3	289,34
5,33	57,7	307,55
5,11	61,9	316,31
4,8	66,9	321,12
4,28	72,2	309,02
3,89	76,2	296,42
3,11	81,8	254,4
2,59	85,4	221,19
2,16	86,9	187,71
1,57	89	139,73
0,81	92,1	74,61
0,33	92,9	30,66



Nous avons maintenant la caractéristique mesurée de notre carte, pour 4x3 cellules en montage série / parallèle.

Nous allons pouvoir comparer la théorique et la pratique.
(page suivante)

Travail sur la cellule

(les écarts dûs à la qualité des cellules)

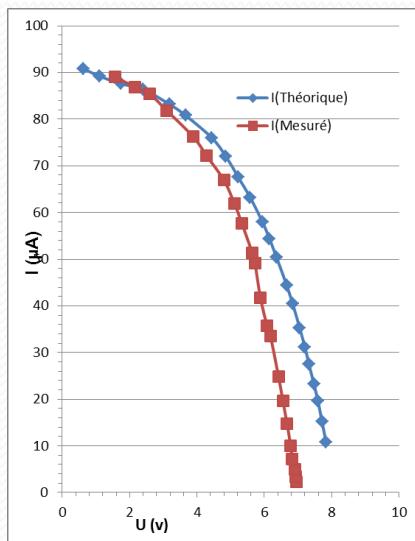
Comparons les résultats théoriques, et les résultats mesurés.

Résultats théoriques :

U (V)	I (μ A)	P (μ W)
7,83	10,8	84,564
7,71	15,2	117,192
7,59	19,6	148,764
7,47	23,2	173,304
7,32	27,6	202,032
7,2	31,2	224,64
7,05	35,2	248,16
6,84	40,4	276,336
6,66	44,4	295,704
6,36	50,4	320,544
6,15	54,4	334,56
5,94	58	344,52
5,58	63,2	352,656
5,22	67,6	352,872
4,86	72	349,92
4,44	76	337,44
3,66	80,8	295,728
3,18	83,2	264,576
2,4	86,4	207,36
1,74	87,6	152,424
1,11	89,2	99,012
0,63	90,8	57,204

Résultats mesurés (P30) :

U (V)	I (μ A)	P (μ W)
6,95	2,3	15,99
6,94	3,4	23,6
6,9	5	34,5
6,83	7,2	49,18
6,78	10	67,8
6,67	14,8	98,72
6,55	19,6	128,38
6,42	24,8	159,22
6,18	33,5	207,03
6,08	35,7	217,06
5,88	41,8	245,79
5,72	49,1	280,86
5,64	51,3	289,34
5,33	57,7	307,55
5,11	61,9	316,31
4,8	66,9	321,12
4,28	72,2	309,02
3,89	76,2	296,42
3,11	81,8	254,4
2,59	85,4	221,19
2,16	86,9	187,71
1,57	89	139,73
0,81	92,1	74,61
0,33	92,9	30,66



Que s'est-il passé?

Et bien c'est très simple : dans la réalité, il n'y a jamais deux cellules identiques.

Un panneau solaire est la somme des performances des cellules qui le compose, il y en a des bonnes et des moins bonnes, le tout s'équilibrant.

Mais alors, comment font les constructeurs pour fournir des capteurs à performances égales?

C'est encore une fois très simple, ils mesurent tous les capteurs et les trient en sortie de chaîne de montage.

C'est pourquoi il y a sur le marché une multitude de capteurs de différentes puissances.

Reprendons la mesure V_{oc} que nous avons faite p 26.

Nous avions mesuré $V_{oc} = 7V$, alors qu'en théorie nous aurions du avoir $V_{oc} = 8,1V$.

C'est pourquoi chaque capteur doit avoir un flash test afin d'être trié.

Ainsi, sur des centrales solaires, il faut s'assurer que les capteurs soient de performances à peu près égales.

Si dans le lot il y a un capteur moins performant, il va dégrader toute la production de la centrale.

Si vous câblez plusieurs matrices à l'identique, certaines auront des performances voisines, d'autres seront performantes, d'autres beaucoup moins pour les mêmes raisons.

Travail sur la cellule

(les écarts dûs à la qualité des cellules)

Pour illustrer, étudions nos matrices pour rechercher quelles sont les bonnes cellules, et les mauvaises.

Pour comparer les performances des cellules dans la matrice, nous n'allons pas retracer les caractéristiques de toutes les cellules, ce serait trop long, nous allons simplement mesurer le Voc et le Icc de chaque cellule.

Réglez la lampe de façon à obtenir 1000 lux et complétez le tableau

N° de Cellule	Voc (V)	Icc (μ A)	
Cellule N° 1	2,74	22,8	● ●
Cellule N° 2	2,73	21,7	● ●
Cellule N° 3	2,1	21,8	● ●
Cellule N° 4	2,75	22,1	● ●
Cellule N° 5	2,27	19,8	● ●
Cellule N° 6	2,66	19,1	● ●
Cellule N° 7	2,28	17,6	● ●
Cellule N° 8	2,62	19	● ●
Cellule N° 9	2,1	20,5	● ●
Cellule N° 10	2,09	18	● ●
Cellule N° 11	2,18	18,7	● ●
Cellule N° 12	2,1	18,6	● ●

Nous pouvons donc dire, dans notre cas :

- que la cellule N°1 est la meilleure cellule composant la matrice.

- que la cellule N°10 est la moins performante.

- que toutes les autres cellules se situent entre les deux.

(forcement pour bien illustrer les TP, nous avions choisi une carte où les cellules 1 et 2 étaient les plus performantes de façon à bien mettre en évidence les phénomènes)

Ainsi, quelque soit le câblage de notre capteur, il sera toujours la combinaison de ces cellules.

Nous avons fait ici le choix de travailler sur 4 lots en parallèle de 3 cellules en série.

Mais vous pouvez les faire sur une autre configuration, les conclusions resteront identiques.

Mais alors, que se passe-t'il lorsque le rendement d'une cellule est dégradé ?

Par exemple par un ombrage ?

Travail sur le capteur

(Influence d'un ombrage sur le fonctionnement)

Nous allons à partir de maintenant travailler à l'échelle du capteur.
Vous allez entendre régulièrement le terme "string" ou "chaîne".

Un string (chaîne) est un ensemble de capteurs montés en série.
Ainsi un string de 3 capteurs, veut dire 3 capteurs montés en série.

(nous ne reprendrons pas les explications du montage série / parallèle, nous considérons que cela a été acquis dans les exercices précédents).

Positionnez la lampe de façon à obtenir 1000 lux au niveau de la table.



Câblez 3 matrices et montez les en série.



Vous pouvez câbler les matrices comme bon vous semble, l'important est que les 3 capteurs soient câblés de la même façon.

Dans notre cas, nous sommes partis sur le même câblage que dans les exercices précédents, et en avons monté 3 en série :

(Pour bien illustrer le phénomène d'un capteur défaillant, il faut minimum deux matrices, mais avec trois cela est plus démonstratif)



Travail sur le capteur

(Influence d'un ombrage sur le fonctionnement)

Recherchez V_{oc} et I_{cc} P(11) de ce string.

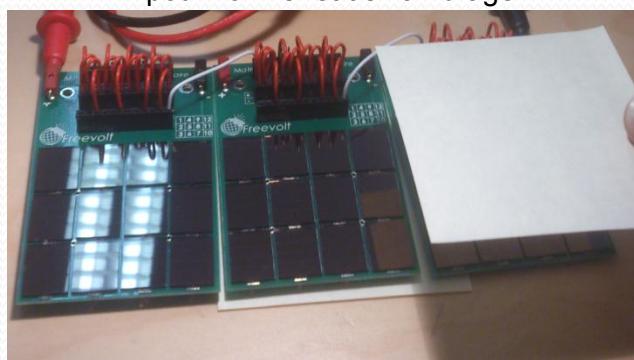


Ici : $V_{oc} = 20,8 \text{ V}$



Ici : $I_{cc} = 71,3 \mu\text{A}$

Prenez un post-it, posez le sur un capteur.
(il faut que le post-it laisse passer un peu de lumière)
pour voir l'effet de l'ombrage.



Nous n'allons pas dans ce TP, demander de retracer les courbes, ce serait trop long. De plus, vous n'arriverez jamais à quantifier le pouvoir occultant des ombrages que les élèves vont créer.

Nous allons leur demander de constater et de mesurer le phénomène, mais vous allez utiliser les courbes fournies ici pour leur expliquer ce qu'il s'est passé.



Ne posez pas un bloc opaque directement sur la matrice, car vous allez complètement occulter le capteur et constater des résultats aberrants et vous ne pourrez pas conclure sur le comportement du capteur.

À la rigueur vous pouvez le faire pour illustrer, mais si un jour, vous trouvez dans une centrale, un capteur qui va générer de telles pertes, pas la peine de chercher les ombrages, jetez-le, il est clairement défaillant.

Travail sur le capteur

(Influence d'un ombrage sur le fonctionnement)

Mesurez Voc et Icc:



Ici : $V_{oc} = 18,8 \text{ V}$



Ici : $I_{cc} = 27,1 \mu\text{A}$

Récapitulatif :

Sans ombrage	Avec ombrage
$V_{oc} = 20,8 \text{ V}$	$V_{oc} = 18,8 \text{ V}$
$I_{cc} = 71,3 \mu\text{A}$	$I_{cc} = 27,1 \mu\text{A}$

Que pouvons-nous en conclure ?

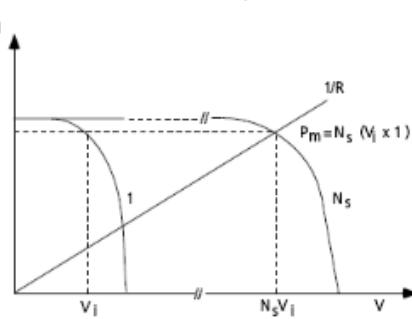
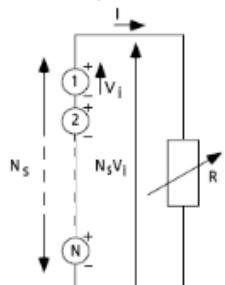
Que nous avons perdu un petit peu en voltage, mais rien de très choquant, sachant que nous occultons 1 panneau entier (matrice).

Par contre, en ampérage, nous avons **énormément** perdu.

Que s'est-il passé ?

Nous avons branché 3 capteurs en série, **et en théorie l'intensité devrait être restée constante !**

Ou perdre un peu, admettons, mais pas tant !



Travail sur le capteur

(Influence d'un ombrage sur le fonctionnement)

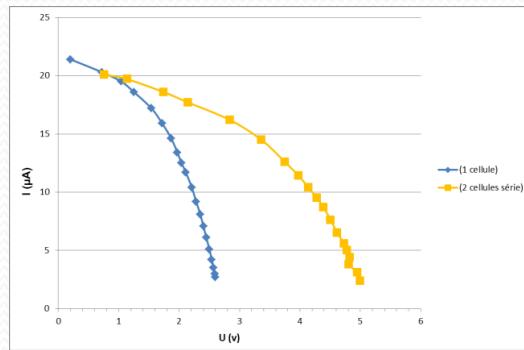
Le comportement des cellules dégradées.

Et bien oui, lorsque des cellules dégradées sont branchées en série, c'est toujours la cellule la moins performante qui va imposer son rythme.

Comme dans un relais 4x100m, c'est le coureur le moins rapide qui va faire perdre son équipe.

Comment cela se traduit-il?

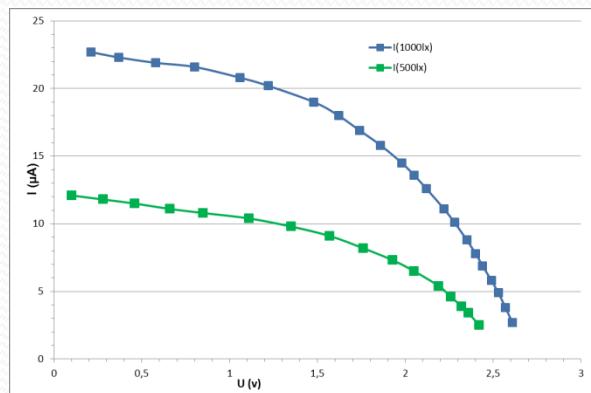
Reprendons la courbe caractéristique de deux cellules en série. Nous voyons bien que I ne s'additionne pas, seul U s'additionne.



Mais il s'agit là de deux cellules identiques, aucune n'est à l'ombre.

Si je considère que la première reçoit 1000 lux,
que la seconde reçoit 500 lux (car à l'ombre)

et si je reprends les courbes que nous avons tracé au début, j'obtiens ceci :



En bleu, la cellule sous 1000 lux,
en vert la cellule sous 500 lux.

Comment s'additionnent-elles?

Travail sur le capteur

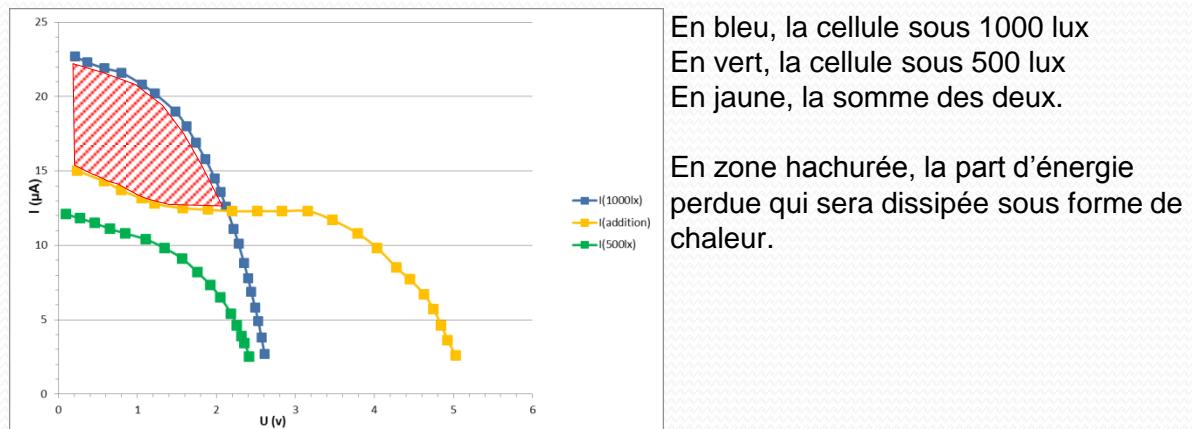
(Influence d'un ombrage sur le fonctionnement)

Quand deux cellules s'additionnent, et que le courant débité tend à devenir plus grand que le courant de court circuit de la cellule la plus faible, la cellule la plus faible devient le siège d'une tension négative et s'oppose à la croissance du courant.

En clair, impossible de dépasser le I_{cc} de la cellule la plus faible au point MPP. On a donc une perte d'énergie, et cette cellule se met à consommer le courant de ses voisines ; de plus, elle se met à chauffer formant ce que l'on appelle "un point chaud" aggravant encore les choses.

Graphiquement, cela se traduit comme ceci :

Avec I_{cc} sous 500 lux : $I_{cc} = 12,3 \mu A$



Nous avons regardé le phénomène sur une seule cellule dégradée. Mais plus il y a de cellules en série, plus le phénomène est important.

Que nous ayons 2, 5, 10, 15 ou plus encore de cellules en série, ce sera toujours la plus faible qui aura le dernier mot !

D'où les écarts que nous avons entre la théorie et la pratique lorsque que nous câblons les matrices !

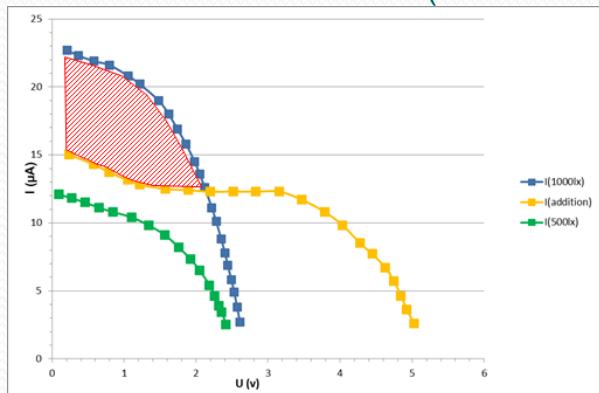
Nous comprenons maintenant l'impact d'un capteur dégradé par un ombrage sur la production d'une centrale solaire.

N'y a-t'il pas de moyens pour se prémunir de ce phénomène ?

Suffirait-il d'isoler la cellule dégradée pour s'en affranchir ?

Travail sur le capteur

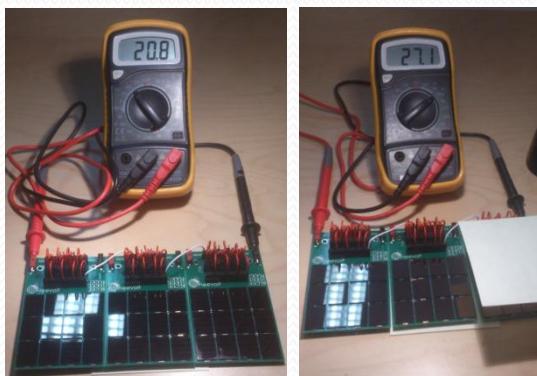
(les diodes by-pass)



Nous avons vu précédemment la perte générée par un ombrage sur un string de cellules.

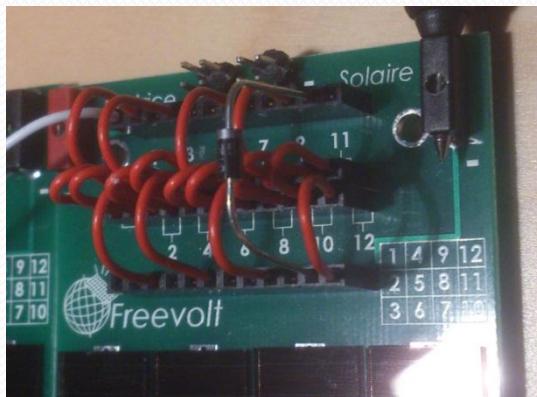
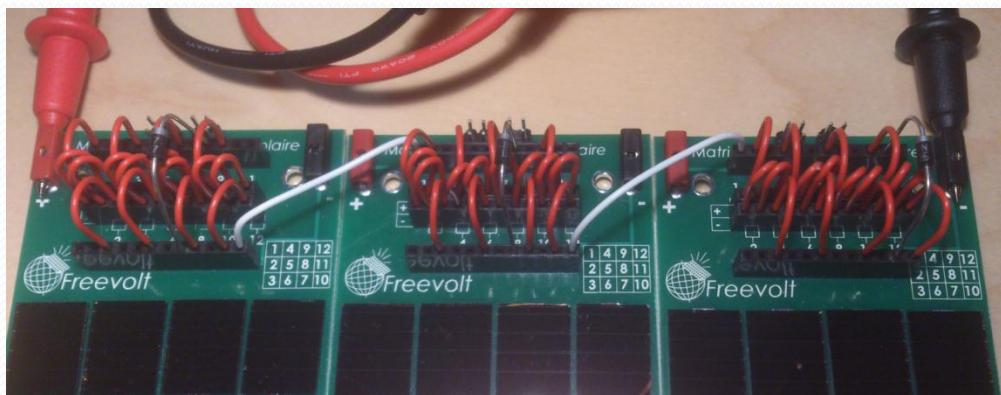
Nous allons voir maintenant comment les fabricants de capteurs font pour minimiser ce phénomène.

Reprendons les mesures que nous avions obtenues page 35.

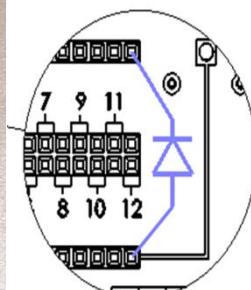


Sans ombrage	Avec ombrage
$V_{oc} = 20,8 \text{ V}$	$V_{oc} = 18,8 \text{ V}$
$I_{cc} = 71,3 \mu\text{A}$	$I_{cc} = 27,1 \mu\text{A}$

Nous allons maintenant monter des diodes by-pass en parallèle sur chaque matrice.



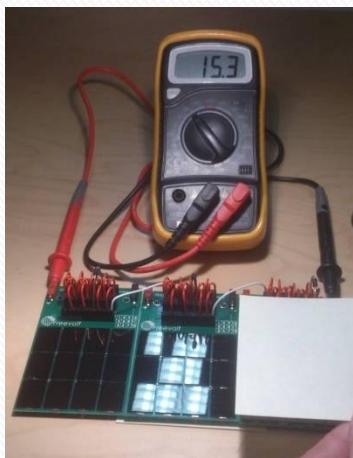
Montez les diodes comme indiqué.



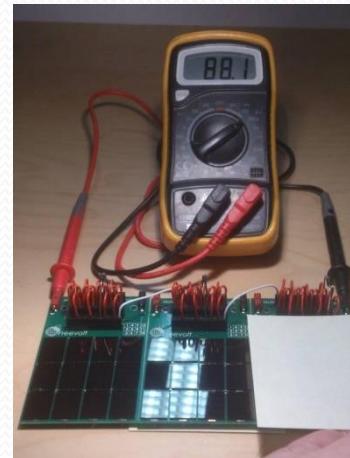
Travail sur le capteur

(les diodes by-pass)

Refaites un ombrage sur la une matrice et mesurez V_{oc} et I_{cc} .



Ici : $V_{oc} = 15,3 \text{ V}$



Ici : $I_{cc} = 88,1 \mu\text{A}$

Sans ombrage	Avec ombrage (sans diode)	Avec ombrage (avec diodes)
$V_{oc} = 20,8 \text{ V}$	$V_{oc} = 18,8 \text{ V}$	$V_{oc} = 15,3 \text{ V}$
$I_{cc} = 71,3 \mu\text{A}$	$I_{cc} = 27,1 \mu\text{A}$	$I_{cc} = 88,1 \mu\text{A}$

Que pouvons-nous constater?

Sans la diode, le courant s'est complètement écroulé car nous avons perdu presque les 2/3 de l'ampérage alors qu'avec la diode nous n'avons rien perdu, et même gagné un peu.

Par contre, le voltage avec la diode a chuté d'environ 5 V.

Maintenant, si nous mesurons indépendamment nos capteurs :

Le capteur de gauche



Ici : $V_{oc} = 7,67 \text{ V}$
 $I_{cc} = 96 \mu\text{A}$

Le capteur au centre



Ici : $V_{oc} = 7,56 \text{ V}$
 $I_{cc} = 79,8 \mu\text{A}$

Le capteur de droite



Ici : $V_{oc} = 6,89 \text{ V}$
 $I_{cc} = 66 \mu\text{A}$

Travail sur le capteur

(les diodes by-pass)

Interprétons nos résultats :

Le capteur de gauche



Ici : $V_{oc} (1) = 7,67 \text{ V}$
 $I_{cc} (1) = 96 \mu\text{A}$

Le capteur au centre



Ici : $V_{oc} (2) = 7,56 \text{ V}$
 $I_{cc} (2) = 79,8 \mu\text{A}$

Le capteur de droite



Ici : $V_{oc} (3) = 6,89 \text{ V}$
 $I_{cc} (3) = 66 \mu\text{A}$

Sans ombrage	Avec ombrage (sans diode)	Avec ombrage (avec diodes)
$V_{oc} = 20,8 \text{ V}$	$V_{oc} = 18,8 \text{ V}$	$V_{oc} = 15,3 \text{ V}$
$I_{cc} = 71,3 \mu\text{A}$	$I_{cc} = 27,1 \mu\text{A}$	$I_{cc} = 88,1 \mu\text{A}$

Il faut lire un peu entre les lignes, car le comportement dans notre cas n'est pas si simple.

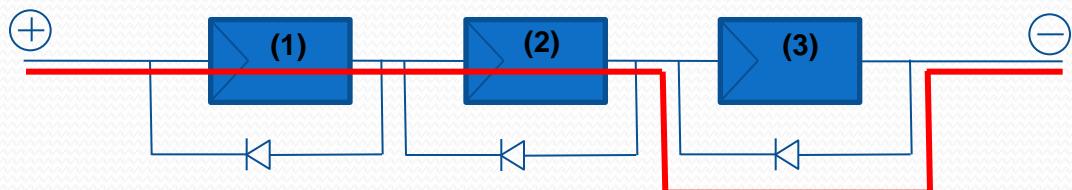
Nous avons vu tout à l'heure que dégradé et sans diodes c'est le capteur le moins performant qui impose son rythme.

Quand nous avons occulté celui de droite, il a perdu en performance et a consommé le courant de ses voisins, d'où la perte en ampérage.

Mais avec les diodes, pas de perte d'ampérage et le voltage est à 15,3V.

Si nous ne regardons que le voltage et faisons $V_{oc} (1) + V_{oc} (2) = 7,67 + 7,56 = 15,23 \text{ V}$
 Pas de perte d'ampérage !

Tiens, c'est comme si la diode avait isolé le capteur défaillant !



Nous ne détaillerons pas ici le fonctionnement d'une diode by-pass car ceci est hors cadre. Mais pour faire simple, lorsque qu'un capteur est dégradé, la tension aux bornes de la diode s'accroît jusqu'à dépasser son seuil, et elle devient alors passante et de fait elle détourne le courant, isolant ainsi le capteur défaillant.

Travail sur le capteur

(les diodes by-pass)

Illustration par rapport à un capteur.



Regardons derrière un capteur solaire.
Il y a une boîte de jonction.

Ouvrons-la.



Nous retrouvons bien nos diodes.

Il y en a 3 donc le capteur a 3 lots de cellules avec des diodes bypass.

Donc, s'il est partiellement ombragé, les diodes vont se comporter comme sur nos matrices en isolant la partie du capteur qui sera dégradée.

Travail sur le capteur

(les diodes by-pass)

Mais revenons à notre mystère de la page 39.

Pourquoi avec la diode, quand le capteur de droite est à l'ombre, le string de capteurs sort un courant plus fort de $16,8\mu\text{A}$?

Nous avons tout de même occulté 1/3 du string, ce n'est pas normal,
nous ne sommes pas sensés produire plus !!!!

Le capteur de gauche



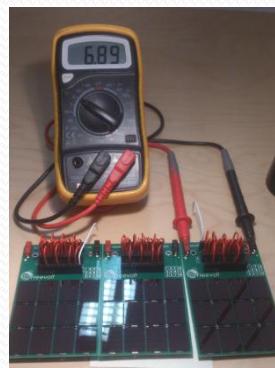
Ici : $\text{Voc} (1) = 7,67 \text{ V}$
 $\text{Icc} (1) = 96 \mu\text{A}$

Le capteur au centre



Ici : $\text{Voc} (2) = 7,56 \text{ V}$
 $\text{Icc} (2) = 79,8 \mu\text{A}$

Le capteur de droite



Ici : $\text{Voc} (3) = 6,89 \text{ V}$
 $\text{Icc} (3) = 66 \mu\text{A}$

Sans ombrage	Avec ombrage (sans diode)	Avec ombrage (avec diodes)
$\text{Voc} = 20,8 \text{ V}$	$\text{Voc} = 18,8 \text{ V}$	$\text{Voc} = 15,3 \text{ V}$
$\text{Icc} = 71,3 \mu\text{A}$	$\text{Icc} = 27,1 \mu\text{A}$	$\text{Icc} = 88,1 \mu\text{A}$

Rappelez-vous ce que nous avons dit précédemment sur le montage en série,
c'est toujours le capteur le moins performant qui impose son rythme !

Maintenant, regardez les mesures individuelles des capteurs : c'est clairement le capteur de droite le moins performant !

De ce fait, quand la diode a isolé le capteur le moins performant, les deux autres capteurs se sont débarrassés de celui qui les freinait et se sont mis, alors, à produire à leur plein régime.

Si cela avait été le meilleur capteur qui avait été à l'ombre, quand la diode aurait court-circuité le bon capteur, le maillon faible aurait encore été là à freiner son voisin.

Quelle conclusion pouvons-nous en tirer ?

Sur une centrale solaire, contrairement à ce que l'on pourrait penser,
si vous avez une zone d'ombre et que vous ne pouvez pas l'éviter,
n'y mettez surtout pas les meilleurs capteurs en pensant équilibrer la production.

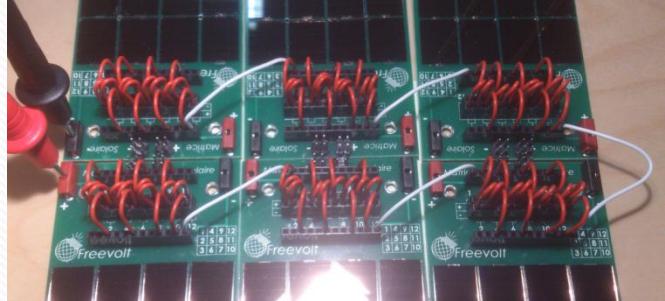
Au contraire, mettez y les plus mauvais, comme cela quand l'ombre viendra,
ce seront les moins performants qui seront court-circuités et vous perdrez moins d'énergie
car les autres restants à produire, pourront fonctionner à plein régime,
le mieux étant, bien sûr de n'avoir que des bons capteurs ☺. www.freevolt-cp.fr

Travail sur le capteur

(les diodes by-pass)

Vérifions nos conclusions sur un plus grand string.

Prenez 6 matrices avec les diodes et câblez-les en série.

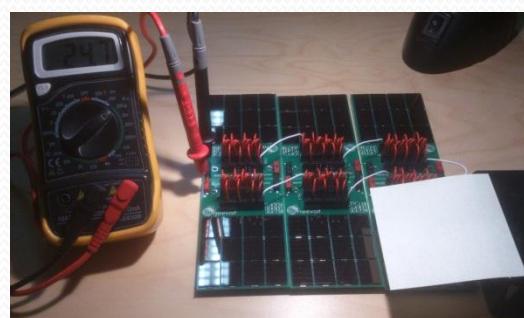
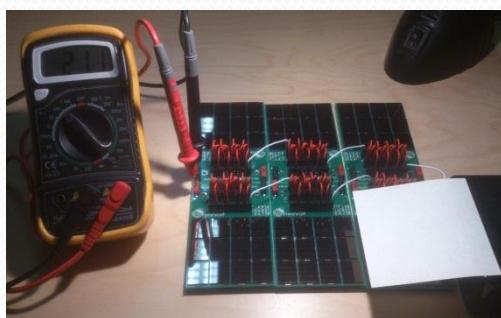


Mesurez Voc et Icc.



Ici : $V_{oc} (1) = 36,6 \text{ V}$ et $I_{cc} (1) = 66,5 \mu\text{A}$

Générez un ombrage sur l'un des capteurs et mesurez Voc et Icc.



Ici : $V_{oc} (1) = 21,7 \text{ V}$ et $I_{cc} (1) = 24,7 \mu\text{A}$

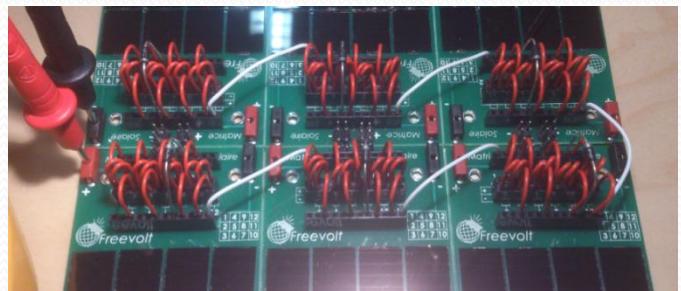
Sans ombrage	Avec ombrage (sans diode)
$V_{oc} = 36,6 \text{ V}$	$V_{oc} = 21,7 \text{ V}$
$I_{cc} = 66,5 \mu\text{A}$	$I_{cc} = 24,7 \mu\text{A}$

Nous constatons bien que la centrale s'est écroulée.

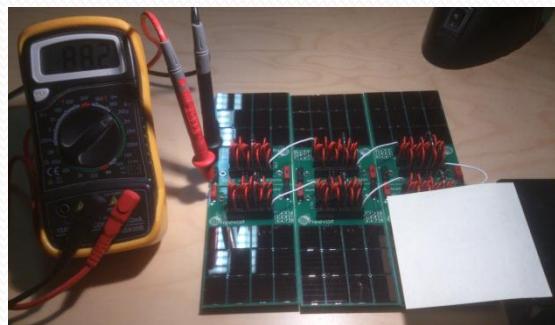
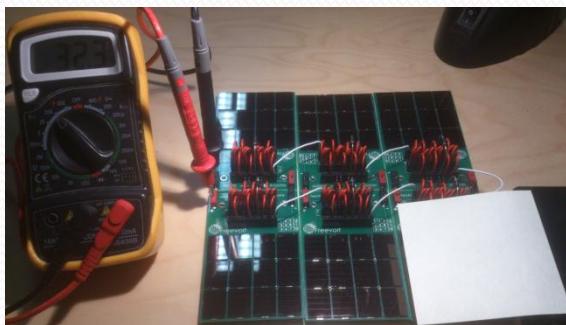
Travail sur le capteur

(les diodes by-pass)

Maintenant, montez les diodes.



Générez le même ombrage et mesurez V_{oc} et I_{cc} .



Ici : $V_{oc} (1) = 32,3 \text{ V}$ et $I_{cc} (1) = 88,2 \mu\text{A}$

Sans ombrage	Avec ombrage (sans diode)	Avec ombrage (avec diodes)
$V_{oc} = 36,6 \text{ V}$	$V_{oc} = 21,7 \text{ V}$	$V_{oc} = 32,3 \text{ V}$
$I_{cc} = 66,5 \mu\text{A}$	$I_{cc} = 24,7 \mu\text{A}$	$I_{cc} = 88,2 \mu\text{A}$

Nous pouvons constater qu'avec les diodes, la tension ne s'est écroulée que de 4,3 V et que l'ampérage lui ne s'est pas écroulé, au contraire, il a augmenté.

De ce fait, nous vérifions bien que les diodes ont fait leur travail, que le string est bien câblé et que les ombrages ont été pris en compte lors du choix de l'emplacement des capteurs.

Effectivement, le capteur le plus mauvais à bien été mis là où l'ombrage passe sur la centrale, et c'est lui qui à été isolé.

Travail sur l'onduleur

(Introduction au câblage d'une centrale en fonction d'un onduleur)

Maintenant, vous savez tout sur le fonctionnement d'un capteur solaire (comment cela fonctionne, et ce qu'il ne faut pas faire).

Il ne vous reste plus qu'à passer sur des capteurs de plusieurs Wc. Le fonctionnement sera le même, et tout ce que nous venons d'aborder se vérifiera, seule la puissance va changer.

Il conviendra alors de sensibiliser les élèves aux précautions d'usage, et des dangers à manipuler des capteurs de forte puissance.

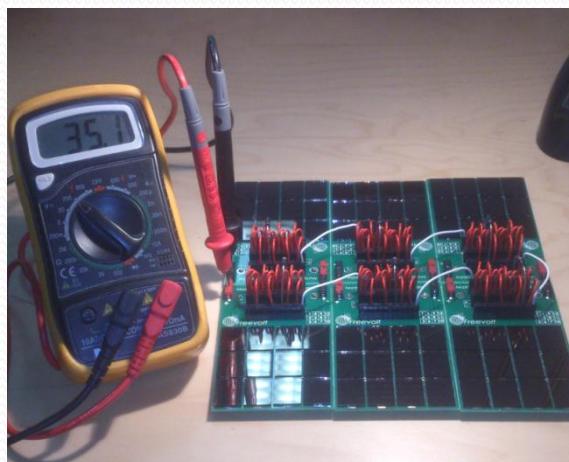
A partir d'ici, nous allons sortir du comportement physique d'un capteur solaire pour extrapoler au niveau d'une centrale solaire.

Où, comment bien câbler une centrale solaire en fonction d'un l'onduleur.

Bien entendu, il ne s'agit pas ici de faire un TP sur les onduleurs, mais de câbler les capteurs entre eux pour faire une centrale.

Les données des onduleurs que nous allons utiliser ont bien entendu été retravaillées pour être adaptées aux cartes.

Nous allons juste faire câbler aux élèves la micro-centrale, et leur faire choisir quel onduleur conviendra le mieux.



Ceci n'est qu'une introduction, les fiches d'onduleurs sont plus complètes, et dans la réalité, il est tout de même plus facile d'utiliser les outils fournis par les fabricants pour dimensionner une centrale solaire.

Travail sur le capteur

(Introduction au câblage d'une centrale en fonction d'un onduleur)

Prenons notre capteur (défini page 27).

Conditions de test	Test électrique
Sous 1000 lux	Puissance : 321µW
Température 20°C	Vmpp = 4,8V
Technologie Amorphe.	Impp = 66,8 µA
Nombre de cellules : 12	Voc = 7 V
Câblage des cellules : strings de 3 cellules montées en parallèle	Icc = 91,9 µA
	Tension maximale admissible 100V

Prenons les données d'un onduleur :

Intitulé	Onduleur 1
Puissance	2000 µW
Plage de tension MPP	12V / 27V
Tension maximale	25 V
Courant d'entrée maximal	190 µA
Rendement	94%

Nous allons maintenant essayer de déterminer comment câbler notre centrale solaire avec l'onduleur 1

sachant que nous avons la surface pour monter 6 capteurs.

Ceci n'est qu'une introduction, beaucoup plus de paramètres entrent en compte dans le choix d'un onduleur.

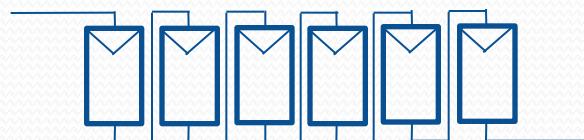
Travail sur le capteur

(Introduction au câblage d'une centrale en fonction d'un onduleur)

Intitulé	Puissance	Plage de tension MPP	Tension Maximale	Courant d'entrée maximal	Rendement
Onduleur 1	2000 µW	12 V / 27 V	25 V	190 µA	94 %

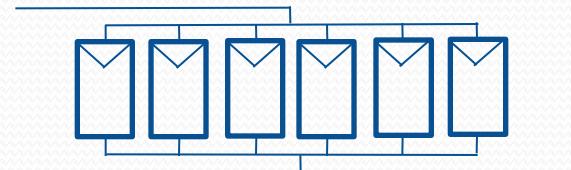
Reprenons ce que nous avons vu sur le câblage série-parallèle.

Essayons de voir si nous pouvons implanter 1 string de 6 capteurs.



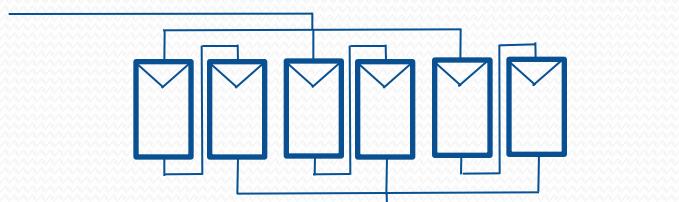
câblage	Voc	Icc	Vmpp	Impp	choix
1x6	42 V	91,9 µA	28,8 V	66,8 µA	NON

Essayons de voir si nous pouvons implanter 6 strings de 1 capteur.



câblage	Voc	Icc	Vmpp	Impp	choix
6x1	7 V	551,4 µA	4,8 V	400,8 µA	NON

Essayons de voir si nous pouvons implanter 3 strings de 2 capteurs.



câblage	Voc	Icc	Vmpp	Impp	choix
3x2	14 V	275,7 µA	9,6 V	200,4 µA	NON

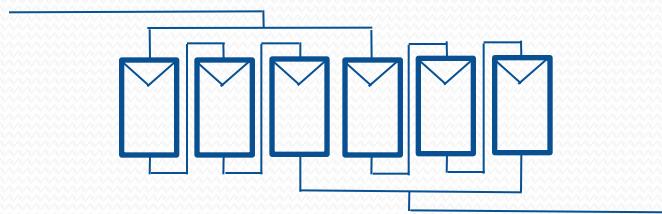
Ceci n'est qu'une introduction, beaucoup plus de paramètres entrent en compte dans le choix d'un onduleur.

Travail sur le capteur

(Introduction au câblage d'une centrale en fonction d'un onduleur)

Intitulé	Puissance	Plage de tension MPP	Tension Maximale	Courant d'entrée maximal	Rendement
Onduleur 1	2000 µW	12 V / 27 V	25 V	190 µA	94 %

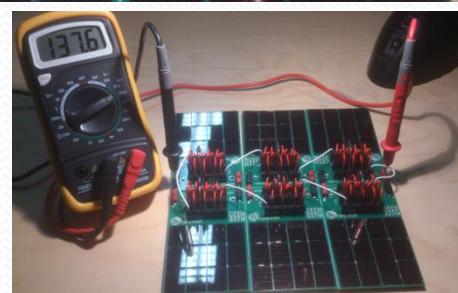
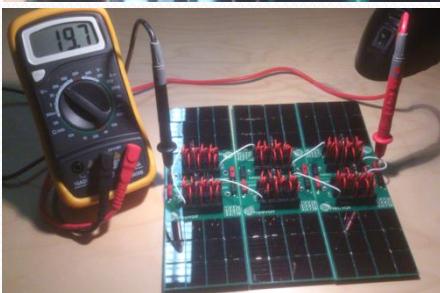
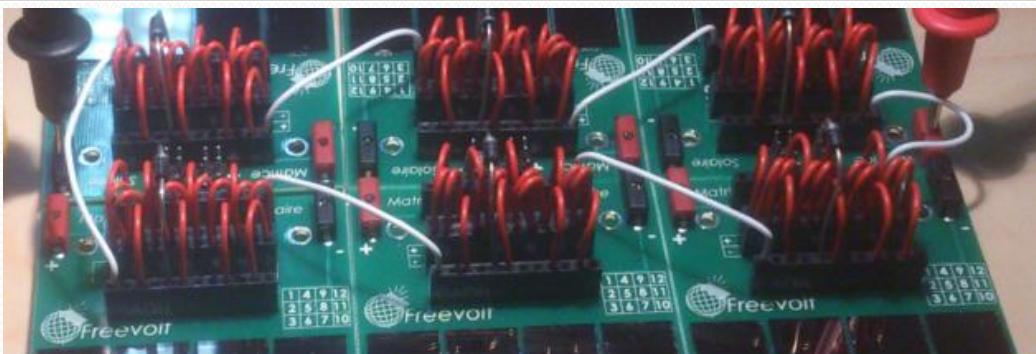
Essayons de voir si nous pouvons implanter 2 strings de 3 capteurs.



câblage	Voc	Icc	Vmpp	Impp	choix
2x3	21 V	183,8 µA	14,4 V	133,6 µA	OUI ✓

Le bon câblage pour cet onduleur est donc : 2 strings de 3 capteurs.

Câblez la centrale et mesurez Voc et Icc pour contrôler



Ici : Voc = 19,7 V et Icc (1) = 137,6 µA



Ceci n'est qu'une introduction, beaucoup plus de paramètres entrent en compte dans le choix d'un onduleur.

Travail sur le capteur

(choix entre différents onduleurs)

Prenons notre capteur (défini page 27).

Conditions de test	Test électrique
Sous 1000 lux	Puissance: 321µW
Température 20°C	$V_{MPP} = 4,8V$
Technologie Amorphe.	$I_{MPP} = 66,8 \mu A$
Nombre de cellules : 12	$V_{OC} = 7 V$
Câblage des cellules: strings de 3 cellules montées en parallèle	$I_{CC} = 91,9 \mu A$ Tension maximale admissible 100V

Prenons les données de 3 onduleurs à peu près similaires

Intitulé	Onduleur 1	Onduleur 2	Onduleur 3
Puissance	2000 µW	2000 µW	2000 µW
Plage de tension MPP	12V / 27V	23V / 32 V	10V / 18V
Tension maximale	25 V	35 V	35 V
Courant d'entrée maximal	190 µA	190 µA	190 µA
Rendement	94%	96%	97%

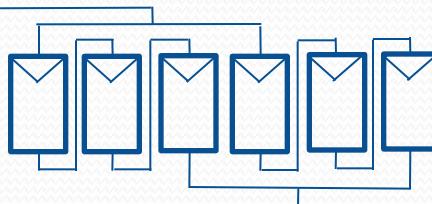
**Nous allons maintenant avec le schéma de câblage déterminé précédemment,
voir si 2 autres onduleurs à peu près équivalents fonctionneraient.**

Ceci n'est qu'une introduction, beaucoup plus de paramètres entrent en compte dans le choix d'un onduleur.

Travail sur le capteur

(choix entre différents onduleurs)

Prenons notre capteur (défini page 27).



câblage	Voc	Icc	Vmpp	Imp	choix
2x3	21 V	183,8 μ A	14,4 V	133,6 μ A	OUI

Reprenez nos calculs de la page 48.

Regardons :

Intitulé	Onduleur 1	Onduleur 2	Onduleur 3
Puissance	2000 μ W	2000 μ W	2000 μ W
Plage de tension MPP	12V / 27V	23V / 32 V	10V / 18V
Tension maximale	25 V	35 V	20 V
Courant d'entrée maximal	190 μ A	190 μ A	190 μ A
Rendement	94% ✓	96% 🤡	97% 🚫

Que pouvons-nous en conclure :

Avec l'onduleur 1, même s'il a le moins bon rendement tout est au vert.

Avec l'onduleur 2, le Vmpp des capteurs est trop bas par rapport à l'onduleur. Pas de danger, mais clairement inadapté car l'onduleur n'arrivera jamais à trouver le MPP. Il a certes un meilleur rendement mais nous sommes clairement en dehors de sa plage de fonctionnement.

Avec l'onduleur 3: **DANGER**

La tension Voc de la centrale dépasse la limite de tension de l'onduleur.

Certes, le système est sensé fonctionner sur le Mpp, et le rendement de l'onduleur est meilleur, mais la norme dit : "le Voc ne doit pas être supérieur à la tension max admissible".
Donc : **Interdit**.

En clair tous les onduleurs ne fonctionnent pas avec les mêmes capteurs, c'est toujours un travail important de trouver le bon couple capteur/onduleur qui aura le meilleur rendement.

Annexes

(Feuilles de TP vierges élèves)

Cette partie du document contient les feuilles de TP vierges élèves.

Travail sur la cellule

(TP I: caractériser une cellule sous 1000 lux)



Sous 1000 lux Point MPP

$$V_{oc} (V) =$$

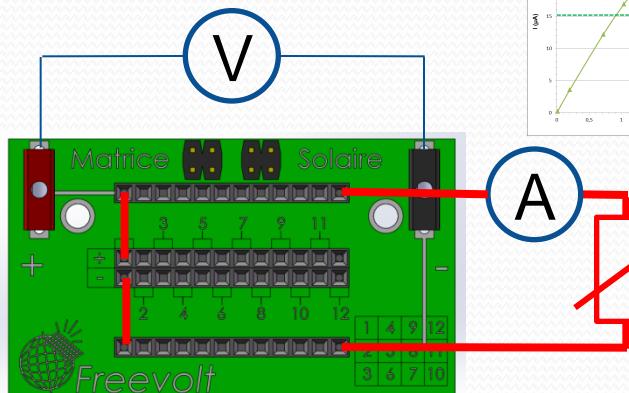
I_{CC} (μA) =

Umpp (V) =

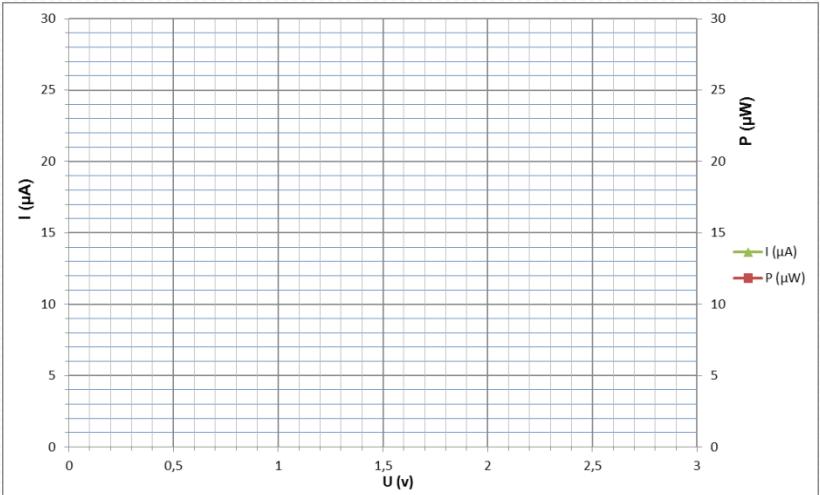
Impp (μ A) =

Pmpp (μW)=

$$R(\Omega) =$$



- Câblez la matrice comme indiqué.
- Branchez la résistance variable, et faites plusieurs points.
- Mesurez V_{oc} et I_{cc} .
- Tracez la courbe $I=f(U)$
- Tracez la courbe $P=f(U)$



Tracez une droite verticale passant par le point maximal de la courbe $P=f(U)$.

À l'intersection de la droite verticale et de la courbe $l=f(U)$, tracez une droite horizontale.

Concluez :

Travail sur la cellule

(TP II: caractériser une cellule sous 800 lux)



Sous 800 lux Point MPP

$$V_{oc} (V) =$$

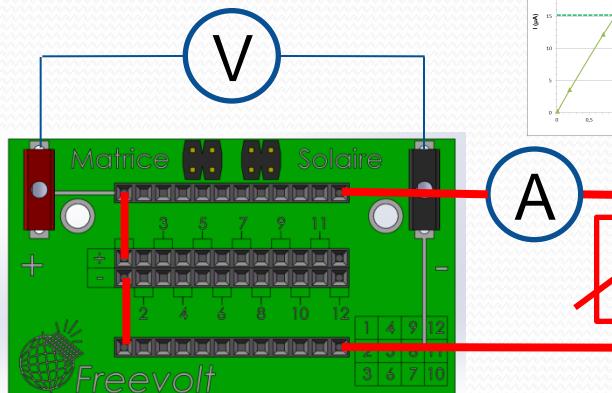
Icc (μ A) =

Umpp (V) =

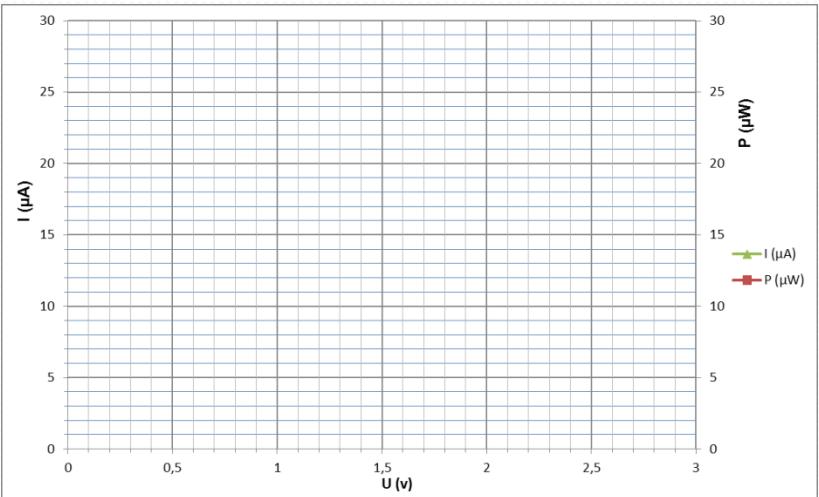
Impp (μ A) =

Pmpp (μW)=

$$R(\Omega) =$$



- Câblez la matrice comme indiqué.
- Branchez la résistance variable, et faites plusieurs points.
- Mesurez V_{oc} et I_{cc} .
- Tracez la courbe $I=f(U)$
- Tracez la courbe $P=f(U)$



Tracez une droite verticale passant par le point maximal de la courbe $P=f(U)$.

À l'intersection de la droite verticale et de la courbe $l=f(U)$, tracez une droite horizontale.

Concluez :

Travail sur la cellule

(TP II: caractériser une cellule sous 500 lux)



Sous 500 lux Point MPP

$$V_{oc} (V) =$$

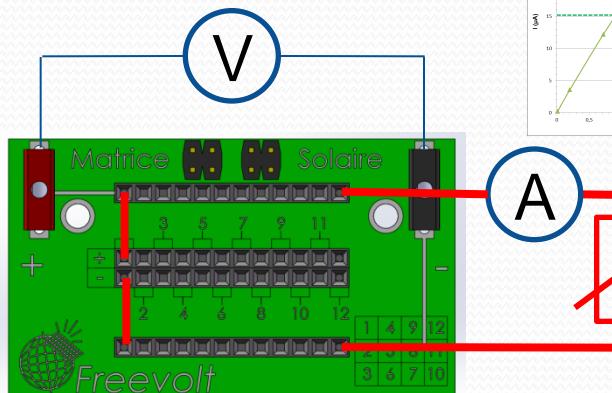
I_{CC} (μA) =

Umpp (V) =

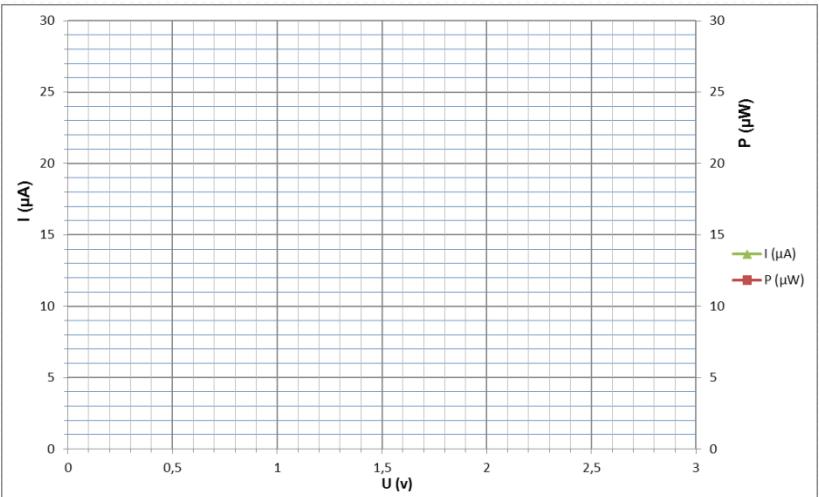
Impp (μ A) =

Pmpp (μW)=

$$R(\Omega) =$$



Câblez la matrice comme indiqué.
Branchez la résistance variable, et faites plusieurs points.
Mesurez V_{oc} et I_{cc} .
Tracez la courbe $I=f(U)$
Tracez la courbe $P=f(U)$



Tracez une droite verticale passant par le point maximal de la courbe $P=f(U)$.

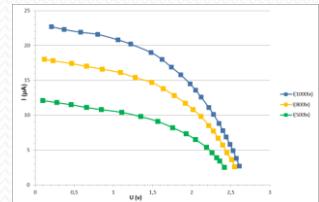
À l'intersection de la droite verticale et de la courbe $l=f(U)$, tracez une droite horizontale.

Concluez :

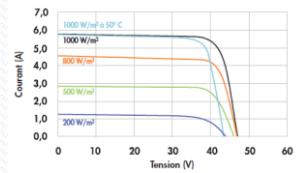
Travail sur la cellule

(TP II: caractériser une cellule sous différentes irradiations)

Reprenez vos relevés I et U effectués précédemment.



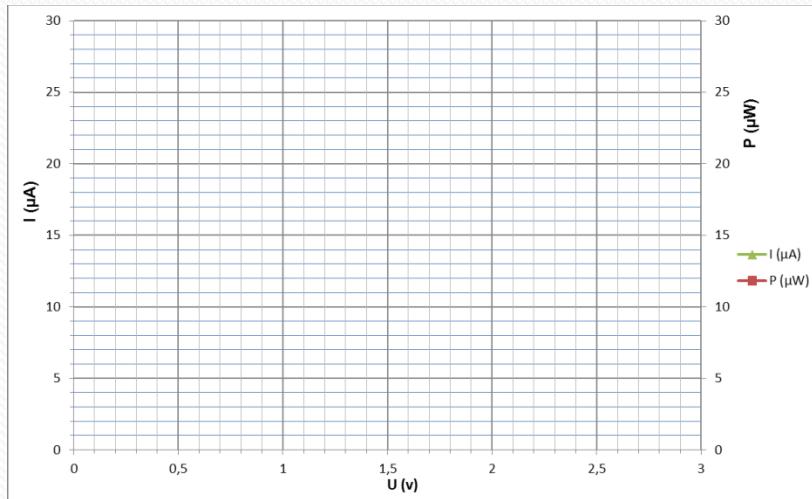
Courbe courant/tension



Sous 1000 lux

Sous 800 lux

Sous 500 lux



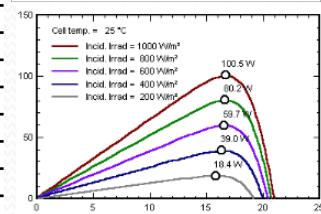
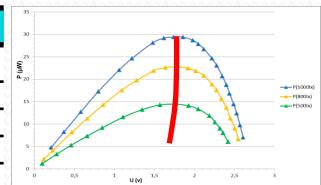
Tracez les trois courbes $I=f(U)$ sur le même graphique.

Concluez :

Travail sur la cellule

(TP III: Le Point de Puissance Max)

Reprenez vos relevés I et U effectués précédemment.



Sous 1000 lux

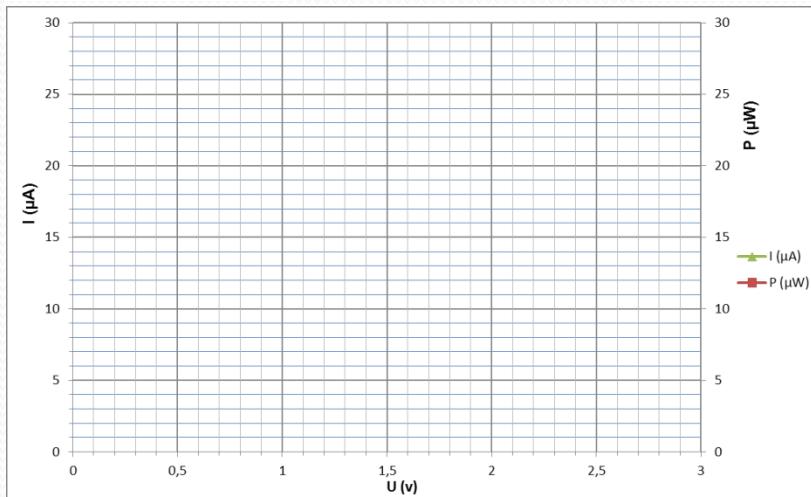
Sous 800 lux

Umpp (V) =

Impp (μ A) =

R (Ω) =

Sous 500 lux



Tracez les trois courbes $P=f(U)$ sur le même graphique.
Reliez entre eux les points MPP.

Concluez :

Travail sur la cellule

(TP IV: Montage série)



Sous 1000 lux Point MPP

$$V_{oc} (V) =$$

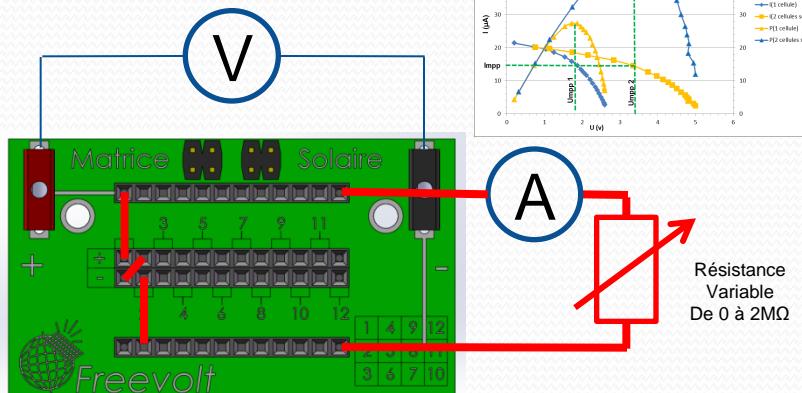
I_{cc} (μA) =

Umpp (V) =

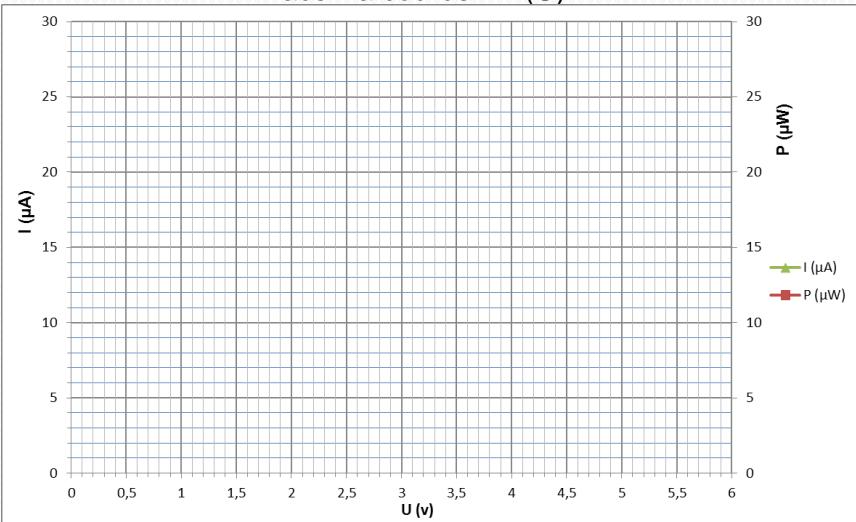
Imp (μA) =

Pmpp (μW)=

$$R(\Omega) =$$



Sous 1000 lux, câblez la matrice comme indiqué.
Branchez la résistance variable, et faites plusieurs points.
Mesurez V_{oc} et I_{cc} .
Tracez la courbe $I=f(U)$
Tracez la courbe $P=f(U)$



Superposez les courbes $I=f(U)$ et $P=f(U)$ effectuées dans le TP I (sous 1000 lux).

Concluez :

Travail sur la cellule

(TP V: Montage parallèle)



Sous 1000 lux Point MPP

$$V_{oc} (V) =$$

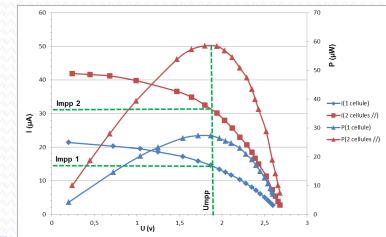
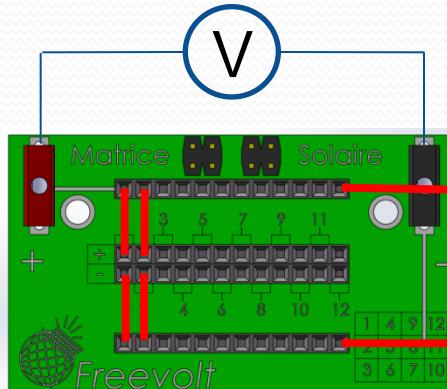
I_{cc} (μA) =

U_{mpp} (V) =

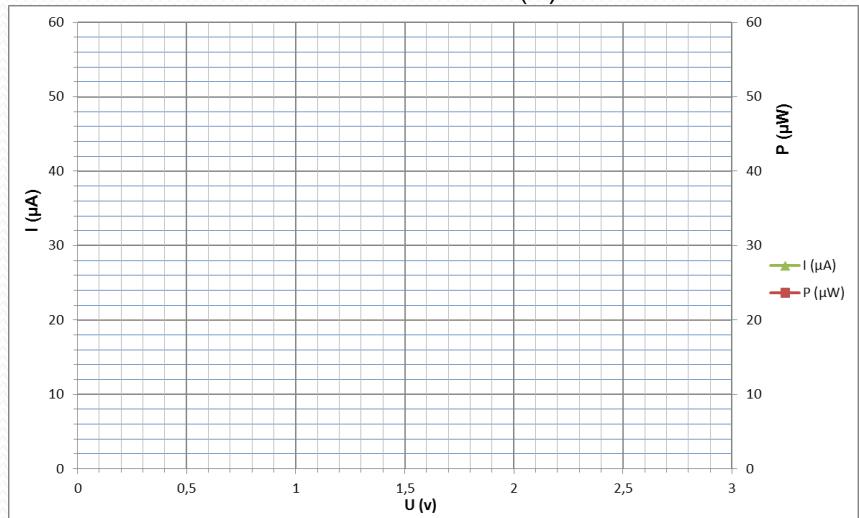
Impp (μ A) =

Pmpp (μW)=

$$R(\Omega) =$$



Sous 1000 lux, câblez la matrice comme indiqué.
Branchez la résistance variable, et faites plusieurs points.
Mesurez V_{oc} et I_{cc} .
Tracez la courbe $I=f(U)$
Tracez la courbe $P=f(U)$



Superposez les courbes $I=f(U)$ et $P=f(U)$ effectuées dans le TP I (sous 1000 lux).

Concluez :

Travail sur la cellule

(TP VI: Montage série + parallèle : Théorie)



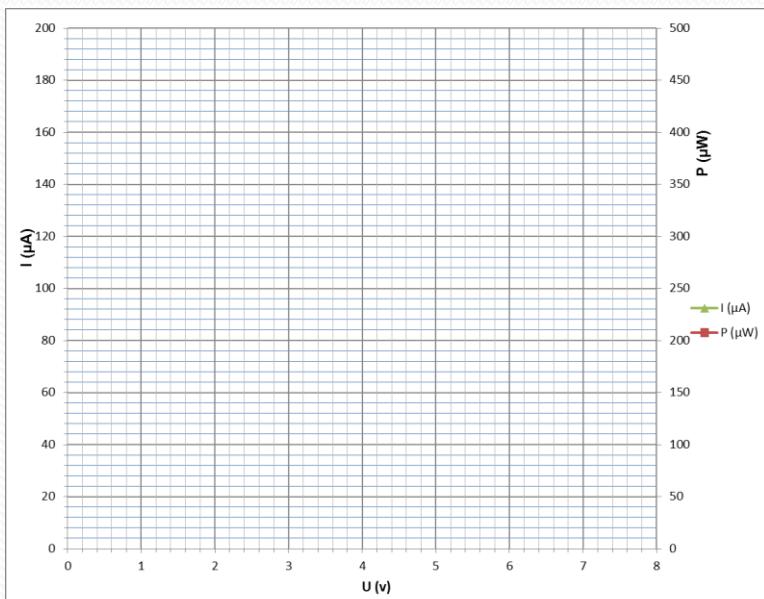
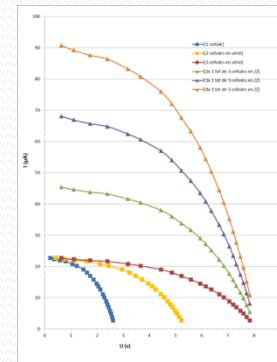
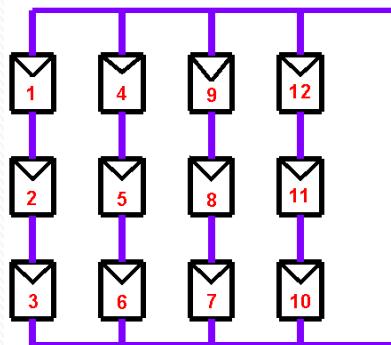
Théorie sur le montage série et parallèles de cellules solaires.

Reprenez les mesures faites au TP I.

Déterminez la courbe caractéristique du câblage ci-dessous.

Tracez la courbe $I=f(U)$

Tracez la courbe $P=f(U)$



Sous 1000 lux Point MPP

Concluez :

$$V_{oc} (V) =$$

I_{CC} (μA) =

Umpp (V) =

Impp (μ A) =

Pmpp (μW)=

$$\mathbb{R}(\Omega) =$$

Travail sur la cellule

(TP VII: Montage série + parallèle : Mesure)



Sous 1000 lux Point MPP

$$V_{oc} (V) =$$

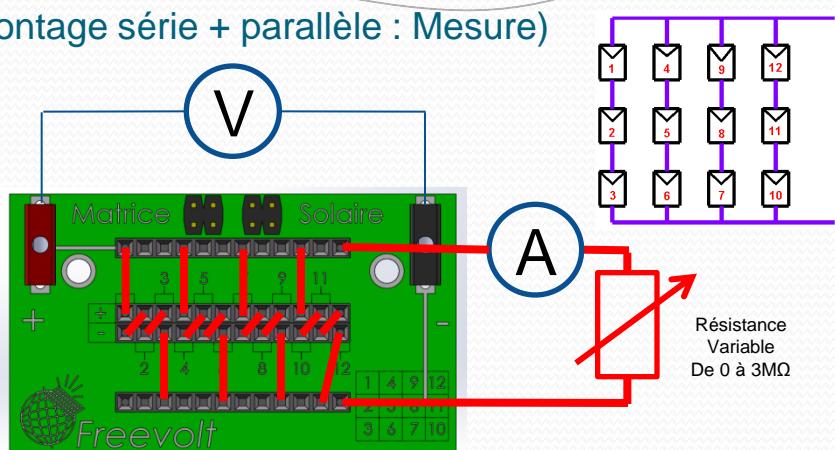
Icc (μ A) =

Umpp (V) =

Imp (μA) =

Pmpp (μW)=

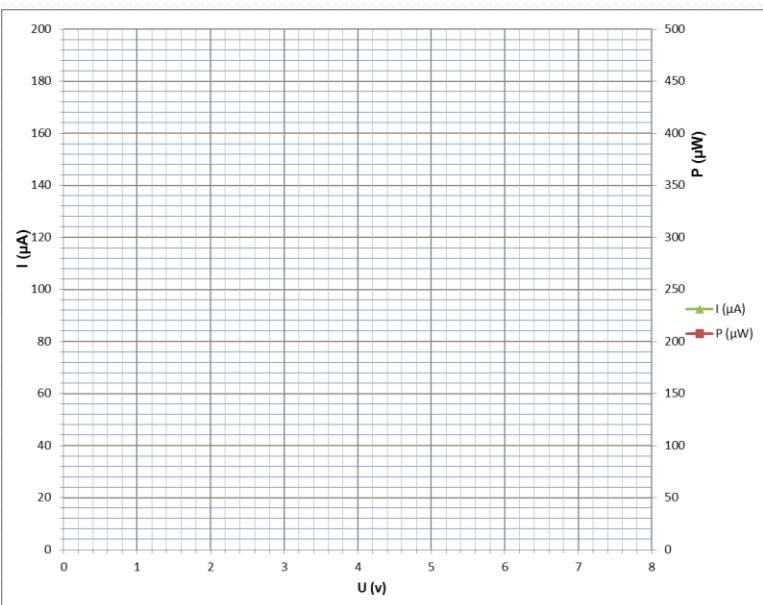
$$R(\Omega) =$$



Sous 1000 lux, câblez la matrice comme indiqué.
Branchez la résistance variable, et faites plusieurs points.

Measurez Voc et Icc.

Tracez la courbe $I=f(U)$



Superposez les courbes théoriques du TP VI
 $I=f(U)$ et $P=f(U)$.

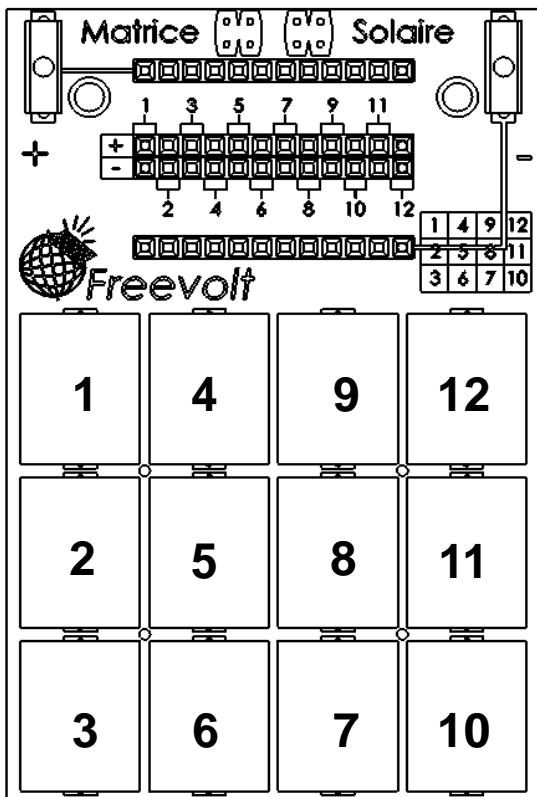
Concluez :

Travail sur la cellule

(TP VIII: les écarts dûs à la qualité des cellules)

Sous 1000 lux.

Relevez la tension Voc et l'intensité Icc de chaque cellule.



N° de Cellule	Voc (V)	Icc (μ A)
Cellule N° 1		
Cellule N° 2		
Cellule N° 3		
Cellule N° 4		
Cellule N° 5		
Cellule N° 6		
Cellule N° 7		
Cellule N° 8		
Cellule N° 9		
Cellule N° 10		
Cellule N° 11		
Cellule N° 12		

Concluez :

Trouvez la meilleure et la plus mauvaise cellule.

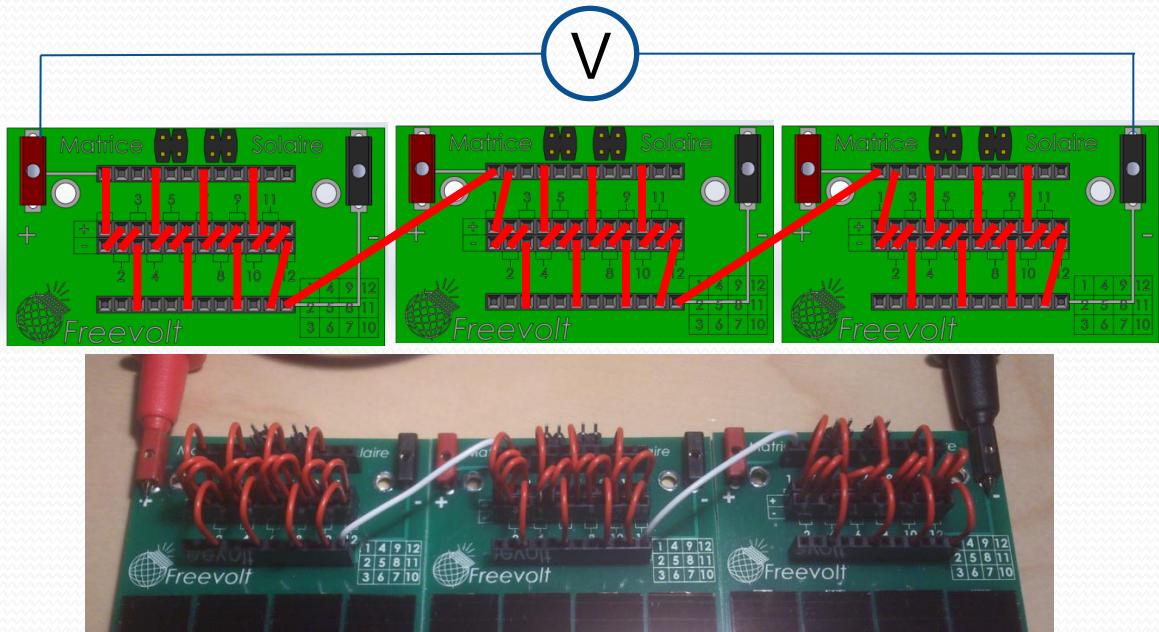
Concluez sur les écarts obtenus dans le TP VII entre la théorie et la pratique.

Travail sur la cellule

(TP IX: influence d'un ombrage sur le fonctionnement)

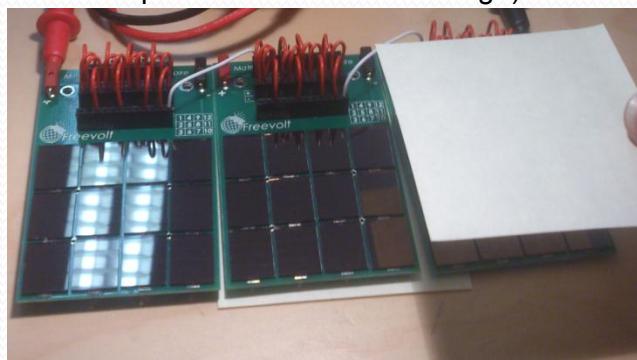
Sous 1000 lux.

Prenez 3 matrices câblées comme sur le schéma ci-dessous et montez-les en séries.



Mesurez V_{oc} et I_{cc} de ce string.

Prenez un post-it, posez le sur un capteur.
(il faut que le post-it laisse passer un peu de lumière
pour voir l'effet de l'ombrage).



Mesurez V_{oc} et I_{cc} de ce string.

Sans ombrage	Avec ombrage
$V_{oc} =$	$V_{oc} =$
$I_{cc} =$	$I_{cc} =$

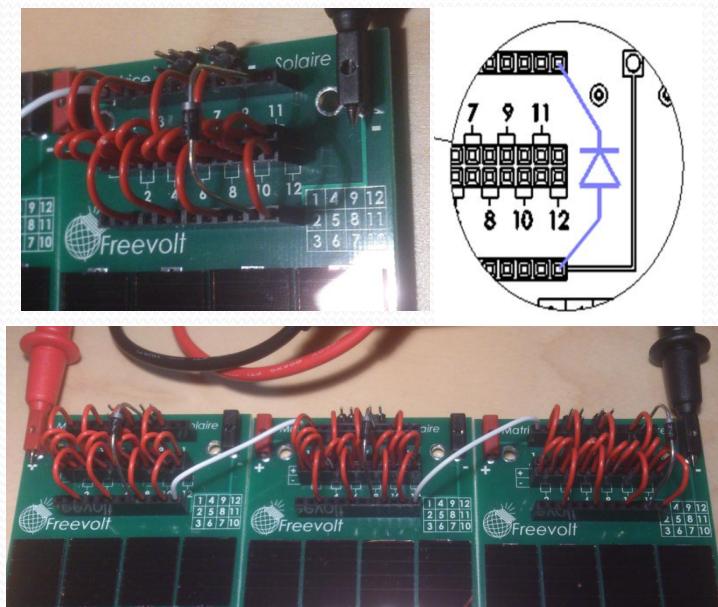
Concluez :

Travail sur la cellule

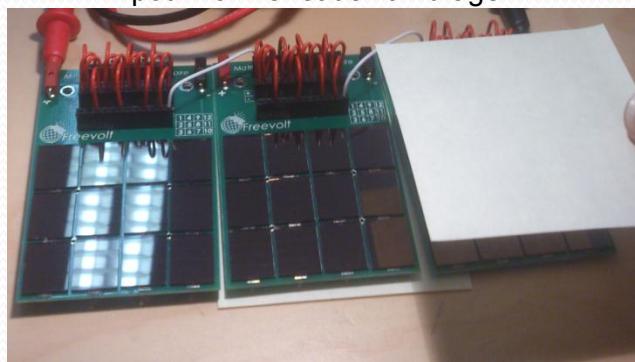
(TP X : les diodes by-pass)

Sous 1000 lux.

Sur chacune des 3 matrices montez des diodes comme indiqué.



Prenez un post-it, posez le sur un capteur.
(il faut que le post-it laisse passer un peu de lumière)
pour voir l'effet de l'ombrage.



Mesurez V_{oc} et I_{cc} de ce string.

Sans ombrage	Avec ombrage (sans diode)	Avec ombrage (avec diodes)
$V_{oc} =$	$V_{oc} =$	$V_{oc} =$
$I_{cc} =$	$I_{cc} =$	$I_{cc} =$

Concluez :

Travail sur la cellule

(TP X : les diodes by-pass)

Sous 1000 lux.

Mesurez individuellement les capteurs.



Capteur 1

$V_{oc} =$

$I_{cc} =$

Capteur 2

$V_{oc} =$

$I_{cc} =$

Capteur 3

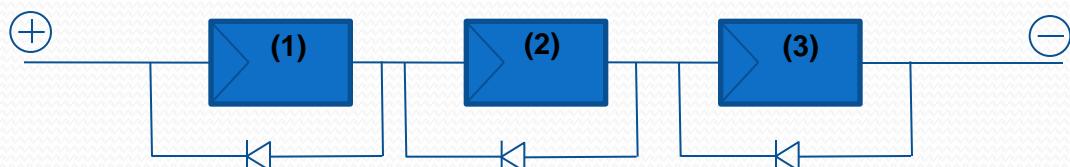
$V_{oc} =$

$I_{cc} =$

Rappel des résultats obtenus page précédente.

Sans ombrage	Avec ombrage (sans diode)	Avec ombrage (avec diodes)
$V_{oc} =$	$V_{oc} =$	$V_{oc} =$
$I_{cc} =$	$I_{cc} =$	$I_{cc} =$

Concluez :

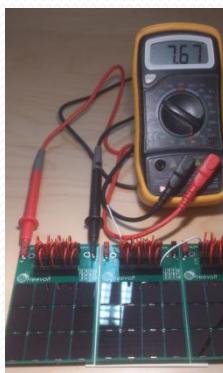


Travail sur la cellule

(TP X : les diodes by-pass)

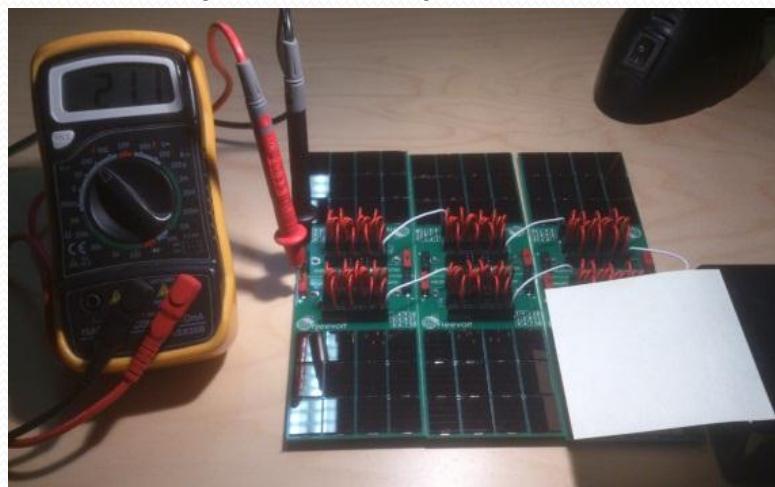
Sous 1000 lux.

Prenez 6 matrices et mesurez-les individuellement.



Capteur	Voc (V)	Icc (μ A)
Capteur 1	Voc =	Icc =
Capteur 2	Voc =	Icc =
Capteur 3	Voc =	Icc =
Capteur 4	Voc =	Icc =
Capteur 5	Voc =	Icc =
Capteur 6	Voc =	Icc =

Montez-les en série, et organisez-les de façon à minimiser l'impact de l'ombrage.



Faites une mesure de Voc et Icc comme indiqué dans le tableau ci-dessous.

Sans ombrage	Avec ombrage (sans diode)	Avec ombrage (avec diodes)
Voc =	Voc =	Voc =
Icc =	Icc =	Icc =

Concluez :

Travail sur la cellule

(TP XI: l'onduleur)

Sous 1000 lux.

Données de l'onduleur.

Intitulé	Puissance	Plage de tension MPP	Tension Maximale	Courant d'entrée maximal	Rendement
Onduleur 1	2000 μ W	12 V / 27 V	25 V	190 μ A	94 %

Récapitulatif d'un capteur.

Capteur	Test électrique
Sous 1000 lux	Puissance: 321 μ W
Température 20°C	$V_{mpp} = 4,8V$
Technologie Amorphe.	$I_{mpp} = 66,8 \mu A$
cellules : 12	$V_{oc} = 7 V$
4 strings de 3 cellules	$I_{cc} = 91,9 \mu A$

Prenez 6 matrices et déterminez quelle est la meilleure organisation du string pour cet onduleur.

1 string de 6 capteurs.					
					
câblage	V_{oc}	I_{cc}	V_{mpp}	I_{mpp}	choix
1x6					
6 strings de 1 capteur.					
					
câblage	V_{oc}	I_{cc}	V_{mpp}	I_{mpp}	choix
1x6					
3 strings de 2 capteurs.					
					
câblage	V_{oc}	I_{cc}	V_{mpp}	I_{mpp}	choix
1x6					
2 strings de 3 capteurs.					
					
câblage	V_{oc}	I_{cc}	V_{mpp}	I_{mpp}	choix
1x6					

Câblez le choix que vous avez fait, mesurez V_{oc} et I_{cc} .

Concluez :

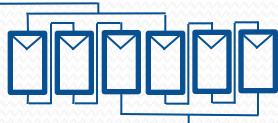
Travail sur la cellule

(TP XII: choix entre différents onduleurs)

Sous 1000 lux.

Reprenez le câblage défini précédemment

2 strings de 3 capteurs.



câblage	Voc	Icc	Vmpp	Impp	choix
1x6					

Déterminez quel est le meilleur onduleur pour cette centrale solaire.

Intitulé	Onduleur 1	Onduleur 2	Onduleur 3
Puissance	2000 µW	2000 µW	2000 µW
Plage de tension MPP	12V / 27V	23V / 32 V	10V / 18V
Tension maximale	25 V	35 V	20 V
Courant d'entrée maximal	190 µA	190 µA	190 µA
Rendement	94%	96%	97%

Argumentez :

Travail sur le capteur

(Conclusion)

Voilà, nous avons déroulé ensemble 12 travaux pratiques sur le fonctionnement d'un capteur solaire.

Nous avons travaillé sur:

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

Le fonctionnement de plusieurs cellules en série / parallèle.

Comment est câblé un capteur solaire.

L'influence des ombrages.

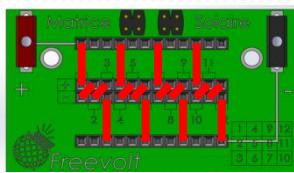
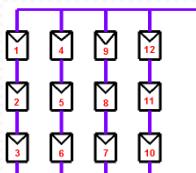
Le rôle des diodes dans les capteurs.

Comment pré-dimensionner un onduleur.

Ceci, sans mettre en danger vos élèves quant aux risques électriques à manipuler des capteurs de forte puissance.

Il ne vous reste plus qu'à passer sur des capteurs de forte puissance pour vérifier tous les acquis, et à les sensibiliser aux risques électriques.

Tous nos TP ont été fait avec le schéma de câblage interne suivant:



Mais la carte offre beaucoup plus de solutions de câblage.

Vous pouvez la câbler comme vous le désirez, et adapter vos propres TP en fonction.

Si vous avez des questions sur le fonctionnement de la carte, n'hésitez pas à nous contacter:

Distributeur:



A4 Technologie.

5 Avenue de l'Atlantique
91940 Les Ulis.

Tel : 01 64 86 41 00 / mail techno@a4.fr
site web: <http://www.a4.fr>

Freevolt Concept.

12 avenue des prés
78180 Montigny le bretonneux.

Tel : 09 50 84 12 92 / mail info@freevolt-cp.fr
site web: <http://www.freevolt-cp.fr>