

De la cellule au champ PV

De la cellule au module :

Tous les modules PV, quelque soit leur technologie fonctionnent grâce au même principe : l'effet photoélectrique. Je ne vais pas entrer dans les détails car cela est abondamment discuté sur Internet : voir par exemple article de Wikipédia :

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Photo%C3%A9lectrique>

Le principe est simple : sous l'action de la lumière, les électrons du conducteur sont mis en mouvement.

Je rappellerais juste les points importants :

- Les électrons ne sont émis que si la fréquence de la lumière est suffisamment élevée et dépasse une fréquence limite appelée fréquence seuil.
- Cette fréquence seuil dépend du matériau et est directement liée à l'énergie de liaison des électrons qui peuvent être émis.
- Le nombre d'électrons émis lors de l'exposition à la lumière, qui détermine l'intensité du courant électrique, est proportionnel à l'intensité de la source lumineuse.
- L'énergie cinétique des électrons émis dépend linéairement de la fréquence de la lumière incidente.
- Le phénomène d'émission photoélectrique se produit dans un délais extrêmement petit inférieur à 10^{-9} s après l'éclairage, ce qui rend le phénomène quasi instantané.

Pour prendre une image, considérons le saut à la perche. L'électron est le sportif, la perche est le photon (lumière) et la barre en hauteur est le seuil de passage. Si la perche est trop courte (l'énergie du photon est insuffisante, la fréquence est pas bonne), l'électron ne passera pas. Ensuite, plus y a de perches (de photons), plus on pourra faire passer d'électrons.

La compréhension de l'existence de ce seuil est fondamental pour la suite de l'exposé. Sa principale conséquence est que **si un courant existe** alors il aura **une tension bien définie** et pas n'importe quoi et que l'on passera directement d'une tension nulle à cette tension particulière.

Maintenant que l'on a mis en mouvement les électrons, il faut les canaliser. C'est le rôle de la cellule photoélectrique. Là encore, je vous renvoie à Internet, par exemple l'article de Wikipédia :

http://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_photovolta%C3%AFque

Si on reprend l'image du saut à la perche, faut imaginer qu'en plus la piste conduisant à la barre est en pente, ce qui oblige les électrons à aller tous dans le même sens. Dans la pratique, on crée un sandwich de matériau, l'un dopé positivement, l'autre négativement, ce qui crée un champ électrique (la pente de mon image) obligeant les électrons à aller dans la même direction.

Notre cellule étant créée, elle n'est pas utilisable tel quel car sa tension et son courant sont trop faibles. En effet sa tension est directement déterminée par le seuil que l'on a vu à peine

(0,6V pour le Silicium) et son courant par sa surface et la pureté du matériau (plus la surface de la cellule est grande, plus elle captera de lumière, plus son courant sera important. Actuellement, on trouve des cellules de 6'', soit 156mm de coté qui donne un courant de l'ordre de 8,0A).

Tous les modules sont constitués de cellules élémentaires qui sont rassemblées en série et/ou en parallèle suivant le constructeur pour former un module. Les caractéristiques du module sont donc entièrement définies par celles de la cellule élémentaire (je néglige pour simplifier les petits fils, soudures et diodes qui permettent d'assembler les cellules).

Il est ainsi assez facile de déterminer les caractéristiques moyennes d'un module si on sait comment sont connecté les cellules. Par exemple considérons un module de 50 cellules de 6'' en série (5 colonnes de 10 cellules). Sa tension sera de $50 \times 0,6 = 30V$ et son courant de 8,0A.

La description que je viens de faire n'a pas tenue compte d'un facteur important : la température. Son rôle est très important au niveau de la cellule. C'est assez facile à comprendre si on regarde ce qui se passe au niveau des atomes. La température, c'est de la chaleur ce qui se traduit par de l'agitation et du désordre au niveau atomique. Au zéro absolu, tout le monde est bien à sa place, tout le monde marche au pas comme un régiment à l'armée. Mais avec l'élévation de la température, le régiment se transforme en une foule désordonnée, il y a de la bousculade. La conséquence sur mon image de saut à la perche, c'est qu'il arrive que des électrons possèdent déjà un peu plus d'énergie lors du saut, ce qui revient à dire que pour eux la barre est un peu moins haute que prévue. Par conséquent, la tension de la cellule diminue un peu puisque celle-ci est directement liée à la hauteur de la barre. Le courant lui augmente un tout petit peu car certains électrons qui n'avaient pas l'énergie suffisante arrivent tout de même à passer. On peut se demander d'où vient la chaleur ? Et bien simplement de tous les photons qui n'ont pu être « absorbés » par les électrons et qui ont simplement « bousculés » le réseau cristallin.

Le champ PV :

Une installation photoélectrique est constituée de plusieurs modules connectés en série et/ou en parallèle. Le but est d'obtenir au final une tension et un courant élevé afin d'avoir de la puissance. En faisant cela, on ne fait qu'augmenter la surface exposée au Soleil, mais on ne change rien par rapport à notre petite cellule élémentaire de base. Ainsi les propriétés énoncées au début de cet exposé sont toujours d'actualité :

- Dès la première lumière, le champ PV aura une tension non nulle voisine de sa tension en circuit ouvert.
- Plus il y aura de lumière, plus le courant sera élevé et plus la puissance sera importante.
- Plus la température augmente, plus la tension diminue.

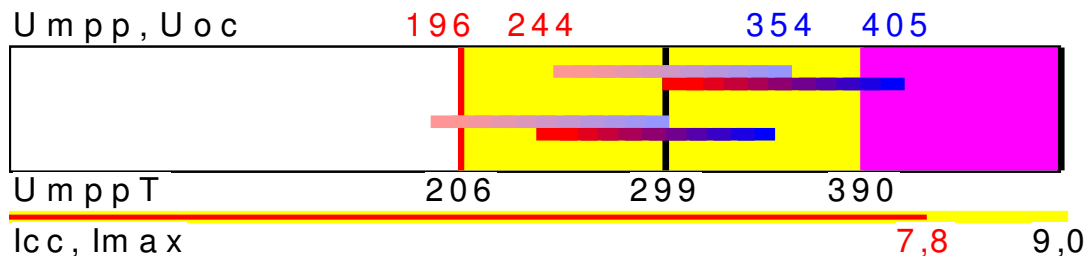
Considérons l'exemple suivant : 12 modules Biohaus Biosol 180P6+ Indach en série avec un onduleur Diehl Platinum 2100. Les données techniques sont résumées dans le tableau suivant :

Module	
Fabriquant	BioHaus
Modèle	Biosol 180 P6+ Indach
Technologie	Poly
Données électriques	
Puissance	180 Wc
Tension MPP	24,90 V
Courant MPP	7,23 A
Tension Circuit Ouvert	30,00 V
Courant Court-Circuit	7,73 A
Tension maximale	1000 V
Puissance surfacique	129,94 Wc/m ²
Tolérance	+3/-3 %
Coefficients de température	
Chute en puissance	-0,43 %/°C
Chute en tension	-106,00 mV/°C
Chute en courant	2,30 mA/°C
Dimensions	
Longueur	1682 mm
Largeur	864 mm
Epaisseur	40 mm
Poids	17,5 kg

Onduleur	
Fabriquant	Diehl
Modèle	Platinum 2100S
Technologie	Avec transformateur
Nombre de MPP	1
Données électriques	
Puissance DC Max	2300 Wc
Puissance DC Nominale	1900 Wc
Plage MPP	206...390 V
Tension DC Max	480 V
Courant DC Max	9 A
Puissance AC Max	1900 W
Puissance AC Nominale	1750 W
Courant AC Max	8,3 A
Rendement Max	94,40 %
Rendement Européen	93,40 %
Protection	IP54
Dimensions	
Largeur	320 mm
Hauteur	720 mm
Profondeur	250 mm
Poids	28 kg

Le module est constitué de 50 cellules en série de 6'', la tension est bien de l'ordre de 30V comme dans l'exemple vu plus haut. Le courant est de 7,73A, c'est une cellule polycristalline qui a un courant plus faible qu'une cellule monocristalline.

Le diagramme MPPT de l'onduleur est le suivant (voir le précédent document pour plus d'explication à ce sujet) :



- La zone jaune correspond à l'intervalle de tension dans laquelle l'onduleur recherche le point de puissance maximal (MPPT).
- La zone rose correspond à l'intervalle de tension maximale supportée par l'onduleur.
- Les barres horizontales indiquent les plages de tension générées par les modules en fonction de la température entre -10°C (point le plus à droite en bleu) et +70°C (point le plus à gauche en rouge). De haut en bas, les barres indiquent :
 - ❖ U_{oc} pour un ensoleillement de 100W/m²
 - ❖ U_{oc} pour un ensoleillement de 1000W/m²
 - ❖ U_{mp} pour un ensoleillement de 100W/m²
 - ❖ U_{mp} pour un ensoleillement de 1000W/m²
- La barre verticale noire indique la tension MPP dans les conditions STC.

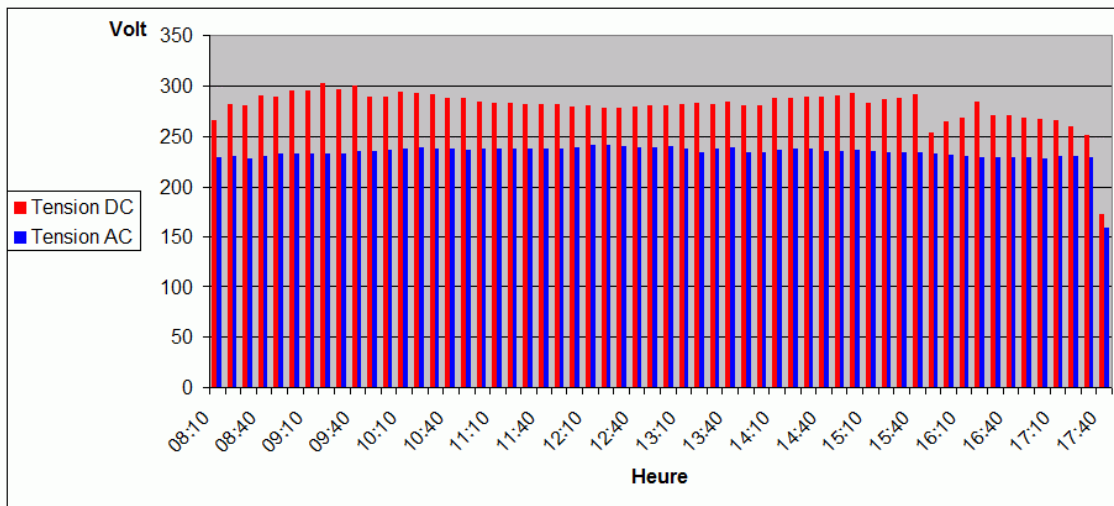
- La barre horizontale jaune indique le courant maximal supporté par l'onduleur. La barre rouge se trouvant dessus indique le courant généré par les modules dans les conditions STC.
- La barre verticale rouge indique la tension de fonctionnement optimale de l'onduleur.

Sont indiquées en rouge les valeurs minimales des tensions MPP et en bleu les valeurs maximales des tensions en circuit ouvert à chaque fois pour une irradiation de 100 et 1000W/m². En noir sont indiquées les tensions MPPT de l'onduleur et la tension MPP dans les conditions STC.

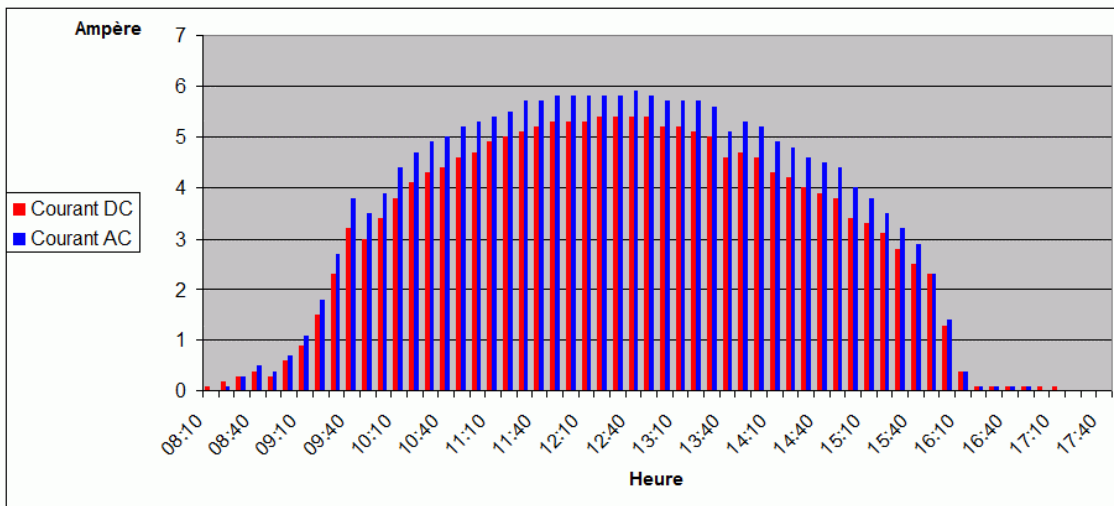
Donc globalement, le point de fonctionnement va se déplacer de 196V pour un ensoleillement de 100W/m² avec une température de 70°C à 350V pour un ensoleillement de 1000W/m² avec une température de -10°C. La plage de l'onduleur étant de [206 ; 390]V, il n'y a pas de problème.

Voyons ce qui c'est passé pour un jour particulier (2 février 2008) :

- Au niveau des tensions DC et AC :

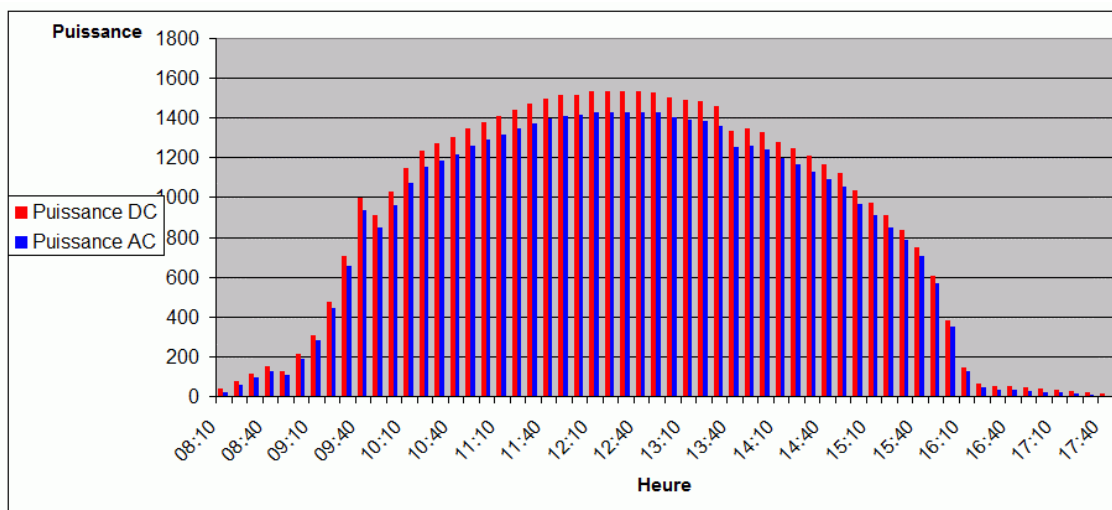


- au niveau des courants DC et AC :

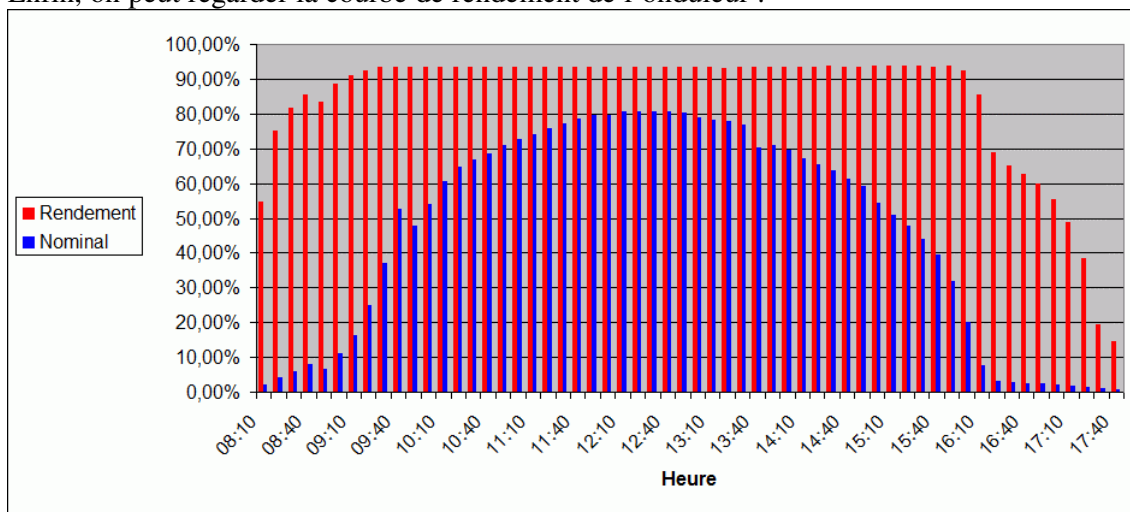


Dès le démarrage de l'onduleur, la tension DC est déjà bien élevée (la tension AC étant elle toujours autour de 230V, la tension du réseau) bien que le courant est quasi nul. Il est maximum en milieu de journée vers 12h30 à environ 5,4A ce qui correspond à un ensoleillement d'environ 750W/m².

Si on regarde les puissances obtenues, on voit un graphique en tout point similaire à celui des courants :

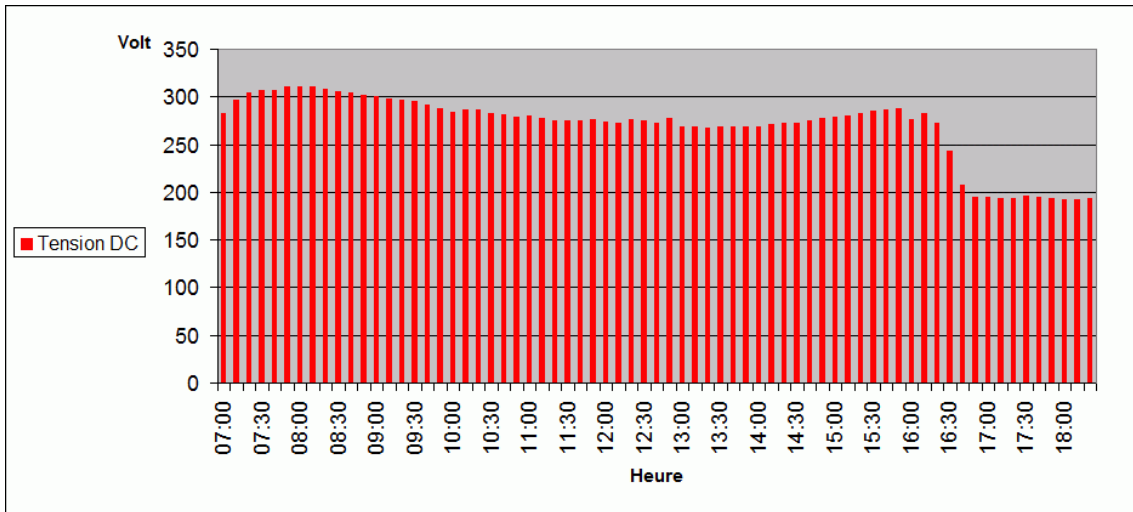


Enfin, on peut regarder la courbe de rendement de l'onduleur :



En rouge le rendement de l'onduleur : Puissance AC/Puissance DC et en bleu le rapport de la puissance DC par rapport à la puissance nominale de l'onduleur (1900W). On constate que tant que la puissance en entrée est supérieure à 25% de la puissance nominale, l'onduleur tourne autour de 93% qui est proche de son rendement Européen.

Et pour finir, un graphique qui illustre l'effet de la température et des ombres :



On observe très nettement une tension plus élevée le matin, de même à partir de 16h00 juste avant une chute brutale due à l'ombre d'un bout de cheminée.