



# Physique et énergie

Travail sur les panneaux photovoltaïques

**Professeur : J-J. PIREAUX**

# Table des matières

<b>1. Introduction</b>	<b>3</b>
<b>2. Introduction au développement durable</b>	<b>4</b>
2.1. Le développement durable c'est quoi ?	4
2.2. L'empreinte écologique	5
<b>3. Problématique de l'énergie</b>	<b>6</b>
3.1. Consommation d'énergie au niveau mondial	6
3.2. La consommation d'énergie en Belgique	8
3.3. La consommation d'électricité en Belgique	9
3.4. La part des énergies vertes en Belgique	9
<b>4. Les cellules photovoltaïques</b>	<b>11</b>
4.1. Principe de l'effet photovoltaïque	11
4.2. Fabrication de cellules photovoltaïques	12
4.2.1. Notions préliminaires	12
4.2.2. Processus de fabrication	13
4.3. Caractéristiques de cellules photovoltaïques	15
4.3.1. Le rendement d'une cellule photovoltaïque	15
4.3.2. Pertes fondamentales	16
4.3.2.1. Transparence aux grandes longueurs d'ondes	16
4.3.2.2. Pertes de l'énergie excédentaire	16
4.3.2.3. Facteur de tension	16
4.3.3. Pertes technologiques	17
4.3.3.1. Le facteur de remplissage	17
4.3.3.2. Réflexions (R)	18
4.3.3.3. Surface ouverte	18
4.3.3.4. Absorption incomplète ( $\eta_{\text{abs}}$ )	18
4.3.3.5. Autres phénomènes ( $\eta_{\text{cp}}$ )	18
4.3.3.6. Réabsorption ( $\eta_{\text{réabs}}$ )	18
4.4. Différents types de cellules photovoltaïques	19
4.5. La courbe courant-tension d'une cellule photovoltaïque	20
4.5.1. La puissance caractéristique d'une cellule photovoltaïque	21
4.5.2. La puissance crête d'une cellule PV	22
4.5.3. L'influence de l'éclairement	22
4.5.4. Influence de la température sur une cellule photovoltaïque	24
4.5.4.1. L'influence de la température et du rayonnement	25
4.6. Prix	26
<b>5. Alimenter la Belgique en électricité uniquement grâce au photovoltaïque, une utopie ? ....</b>	<b>27</b>
<b>6. Conclusions</b>	<b>28</b>
<b>7. Sources</b>	<b>29</b>
7.1. Sites internet	29
7.2. Bibliographie-documents écrits	29

## 1. Introduction

*De nos jours, les problèmes écologiques constituent un véritable enjeu pour la société qui, paradoxalement, ne cesse d'accroître ses besoins en énergie. A l'heure à laquelle les réserves de pétrole s'amenuisent et alors que le débat éthique compromet l'avenir déjà incertain du nucléaire, les énergies renouvelables s'avèrent être un atout incontournable pour régler au moins une partie des problèmes.*

*De part ses études, le physicien est en première ligne pour chercher des solutions à ce problème de société qui touche la planète entière ainsi que les générations à venir. Bien sûr, un tel débat ne peut être mené sans réflexion éthique, voilà pourquoi nous débuterons ce travail avec une brève introduction au développement durable.*

*Précisons qu'il s'agit d'un travail qui me tient à coeur puisque j'ai insisté auprès du Professeur Robert Sporken pour pouvoir réaliser un doctorat sur les cellules photovoltaïques qui devrait se faire, si tout se passe bien, en collaboration avec le Centre Spatial de Liège.*

## 2. Introduction au développement durable

Parler de l'énergie solaire sans l'inclure dans une vision plus globale de développement durable pourrait faire perdre le sens de son utilité. Au cours de cet exposé, nous passerons par la notion de développement durable pour introduire la problématique de l'énergie et ainsi déboucher sur les différents types d'énergie dont bien évidemment les énergies renouvelables, ce qui nous permettra de bondir sur le thème de l'énergie solaire et plus particulièrement du photovoltaïque.

### 2.1. *Le développement durable c'est quoi ?*

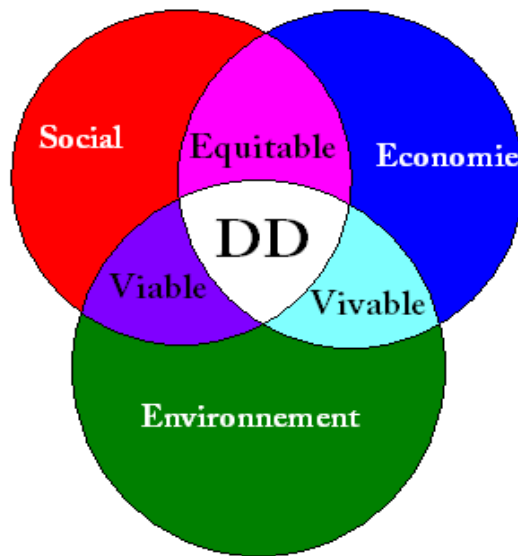
Le développement durable (DD) est un terme fort à la mode et parfois même utilisé à outrance quitte à lui faire perdre son sens originel. L'idée de développement durable, bien que le terme n'existait pas encore en tant que tel, tire son origine du « Rapport du Club de Rome » en 1972 qui avait pour but d'éveiller les consciences sur une réalité de plus en plus alarmante : la croissance exponentielle de la pollution, de la démographie et ce dans un monde aux ressources finies.

La première définition « officielle » est celle du « Rapport de Brundtland » qui date de 1987. Il y est dit que :

***« Le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs. »***

Cependant, le concept de développement durable a évolué. Il doit plutôt être perçu comme une philosophie, c'est pourquoi il est difficile d'en donner une définition rigoureuse. Malgré tout, on s'accorde généralement à dire qu'il s'agit d'une manière de penser et d'agir qui doit allier le social, l'économique et l'écologie et ce à très long terme.

On trouve donc généralement le schéma suivant :



**Illustration 1: Schéma typique représentant le développement durable**

## *2.2. L'empreinte écologique*

Peu après le concept de développement durable et toujours dans la lignée du Club de Rome, est née la notion « d'empreinte écologique ». Celle-ci consiste à extrapoler la consommation d'un habitant, d'une ville ou d'un pays au niveau mondial. L'empreinte écologique de la Belgique tourne aux environs de 3,5 Terres contre 7 à 9 pour les USA et moins de une pour l'Afrique malgré son nombre élevé d'habitants. Autrement dit, si chacun des habitants de la planète consommait comme un belge moyen, il faudrait 3,5 Terre pour vivre durablement. La notion d'empreinte écologique prend en compte :

- le sol nécessaire pour bâtir son habitation
- la surface (terrestre et aquatique) nécessaire pour produire son alimentation
- l'espace vert nécessaire pour contrecarrer l'émission de nos déchets polluants
- etc.

La moyenne mondiale actuelle est estimée à 1,1 Terre et ce chiffre est constamment revu à la hausse. Dans de telles conditions, l'être humain compromet lui-même sa survie à long terme.

### 3. Problématique de l'énergie

Pour toucher rapidement le problème de l'énergie, le site de Shell propose 5 points :

- x La population mondiale augmente sans cesse.

De 1 milliard d'habitants en 1900, 2 milliards en 1950, plus de 6 milliards en 2000, on prévoit pour 2050 plus de 10 milliards d'êtres humains.

- x Nous avons des besoins à satisfaire, de plus en plus nombreux et variés.

Toujours plus, la société fait naître en nous de nouvelles envies : vêtements, voitures, multimédia...

Toutes ces technologies ont un coût écologique.

- x Les techniques s'améliorent.

Il y a 100 ans, il n'y avait ni ordinateur, ni télévision, ni téléphone, ni radio, ni machine à laver, ni réfrigérateur...

- x Nous nous soignons mieux.

Plusieurs dizaines de nouveaux médicaments sont créés chaque année.

- x Nous vivons de plus en plus vieux.

Un être humain en France vivait en moyenne jusqu'à 48 ans en 1800, son espérance de vie en 2000 est de 79 ans.

#### 3.1. Consommation d'énergie au niveau mondial

De ce fait, comme on peut s'y attendre, toutes les études le montrent, nos besoins en énergie sont en constante augmentation : la consommation mondiale d'énergie a été multipliée par quarante au cours du siècle dernier. Voici l'évolution de ces derniers siècles avec une extrapolation pour les 50 années à venir. Le graphe nous montre la croissance continue des besoins énergétiques et même si l'accélération semble diminuer (la courbure du graphe s'inverse vers les années 2000) le graphe suivant est en réalité une projection très « optimiste » car on trouve d'autres extrapolations pouvant aller jusqu'à 30000 Mtep en 2050.

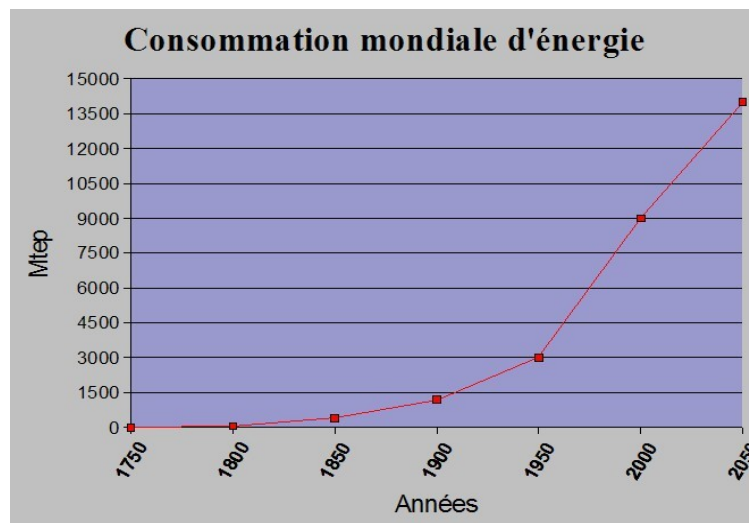


Illustration 2: évolution et extrapolation de la consommation d'énergie mondiale

Chaque année, le gouvernement belge rédige un rapport sur le bilan énergétique et l'évolution du marché énergétique. Le rapport le plus récent, terminé le 30/11/06 (disponible sur le site [mineco.fgov.be](http://mineco.fgov.be) : [http://mineco.fgov.be/energy/balance\\_sheets/home\\_fr.htm](http://mineco.fgov.be/energy/balance_sheets/home_fr.htm)) nous apprend que :

- les réserves de pétroles devraient disparaître d'ici 40 ans ;
- il nous reste du gaz pour « encore » 65 ans ;
- les combustibles solides représentent une source énergétique pour encore 155 ans ;
- les ressources d'uranium devraient disparaître d'ici 40 à 150 ans<sup>1</sup>.

Notes : toutes les études semblent d'accord sur le nombre d'années pour le pétrole et le gaz.

Ces chiffres sont approuvés par le WWF (World Wildlife Fund), la commission AMPERE

<sup>1</sup> Selon l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) et la World Nuclear Association (WNA) « les réserves d'uranium sont estimées à plus de 2 millions de tonnes pour un coût de production inférieur à 40\$ par kg d'uranium, correspondant à 30 ans de fonctionnement des réacteurs actuels (puissance installée mondiale de 296 GW électrique). Si l'on considère un coût de production jusqu'à 80\$ par kg (1kg libère 67MWh), le montant des réserves peut être doublé, soit plus de 60 ans de consommation du parc actuel. Un passage à la technologie des réacteurs à neutrons rapides qui peuvent valoriser l'ensemble des isotopes de l'uranium et non le seul uranium 235, permettrait de multiplier ces dernières réserves par un facteur 50. Il est par ailleurs difficile d'évaluer les ressources ultimes en Uranium, la prospection ne faisant pas aujourd'hui l'objet d'un effort important en raison des stocks disponibles. L'addition de toutes les ressources minières répertoriées aujourd'hui dépasse un total de 17 millions de tonnes soit environ 300 ans de consommation actuelle à des conditions d'accès toutefois très différentes. Enfin, l'exploitation des ressources non conventionnelles (phosphates, eau de mer) permettrait de multiplier les réserves sus mentionnées par 100 ». Source : Agence pour l'Energie Nucléaire de l'OCDE.

(Commission d'Analyse des Modes de Production de l'Électricité et du Redéploiement des Énergies ) et par l'AEPN (Association d'Écologistes pour le nucléaire).

Ce document nous présente aussi la distribution absolue et relative de la consommation mondiale des ressources (Tableau 1) :

	2004		2005	
	Mtep	%	Mtep	%
Pétrole	3798.6	36.9	3836.8	36.4
Gaz Naturel	2425.2	23.6	2427.7	23.5
Charbon	2798.9	27.2	2929.8	27.8
Nucléaire	625.1	6.1	672.2	6.0
Hydroélectricité	643.2	6.2	668.7	6.3
<b>Total</b>	<b>10291.0</b>	<b>100.0</b>	<b>10537.1</b>	<b>100.0</b>

Tableau 1: consommation d'énergie au niveau mondial

### 3.2. La consommation d'énergie en Belgique

Après avoir grossièrement observé ce qu'il se passait au niveau mondial, regardons ce qu'il en est chez nous (Tableau 2) :

	ktep (1973)	ktep (1980)	ktep (2000)	ktep (2002)	ktep (2004)	ktep (2005)
Combustibles solides	11.77	11.34	8.38	6.53	6.42	5.45
Pétrole	27.27	23.02	23.69	22.34	22.45	22.23
Gaz Naturel	7.16	8.94	13.40	13.41	14.61	14.15
Nucléaire	0.20	3.27	12.55	12.34	12.33	12.40
Combustibles renouvelables et de récupération	-	-	0.969	0.963	1.20	1.38
<b>Total</b>	<b>46.18</b>	<b>46.36</b>	<b>59.41</b>	<b>56.28</b>	<b>57.72</b>	<b>56.20</b>

Tableau 2: le consommation d'énergie en Belgique

On remarque principalement une nette diminution des combustibles solides au profit principalement du nucléaire ainsi que du gaz naturel. Les combustibles renouvelables, inexistants auparavant, commencent à prendre timidement leur essor. Globalement, alors que la consommation a fortement grimpé jusqu'en l'an 2000, la consommation totale diminue faiblement.

### 3.3. La consommation d'électricité en Belgique

Puisque nous parlerons de cellules photovoltaïques, il semble dès lors judicieux d'analyser le secteur de l'électricité pour voir plus tard comment les panneaux solaires peuvent le modifier.

	2003		2004		2005	
	GWh	%	GWh	%	GWh	%
Production brute						
Énergie nucléaire	47.38	56.0	47.31	55.4	47.60	54.7
Combustibles solides	9.64	11.4	9.15	10.7	8.20	9.4
Combustibles gazeux	23.58	27.9	23.81	27.9	25.41	29.2
Combustibles liquides	1.01	1.2	1.68	2.0	1.74	2.0
Combustibles renouvelables et de récupération	1.61	1.9	1.76	2.1	2.25	2.6
Énergie hydraulique, éolienne et centrales de pompage	1.40	1.7	1.736	2.0	1.831	2.1
<b>Total</b>	<b>84.61</b>	<b>100</b>	<b>85.44</b>	<b>100</b>	<b>87.02</b>	<b>100</b>

Tableau 3: énergies électriques

Mais toutes ces énergies électriques ne proviennent pas de Belgique. La Belgique exporte une partie de sa production mais surtout importe une partie importante de ce qu'elle consomme.

GWh	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Import	11645	15818	16658	14664	14567	14328
Export	7319	6712	9070	8254	6789	8024
<b>Solde</b>	<b>4326</b>	<b>9106</b>	<b>7588</b>	<b>6410</b>	<b>7778</b>	<b>6403</b>

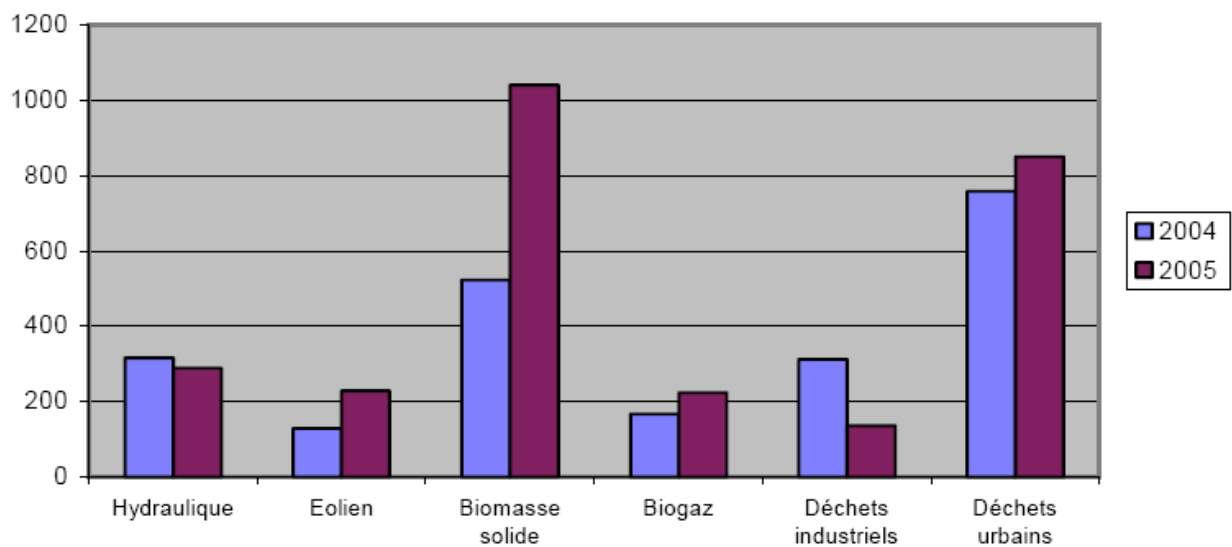
Tableau 4: import - export

Il y a beaucoup de variations, que ce soit au niveau de l'import ou de l'export. La seule conclusion qu'on peut tirer est que le Belgique est un pays demandeur d'électricité et que ce pays pourrai difficilement s'autosuffire dans un avenir proche. Globalement, la Belgique consomme 80 000 GWh/an.

### 3.4. La part des énergies vertes en Belgique

En agréant les diverses formes d'énergies renouvelables (biogaz, hydraulique à l'exclusion du pompage, éolien, biomasse) et les produits de récupération (déchets ménagers et industriels), leur

part dans la production brute d'électricité s'élève à 2.766 GWh (soit 3,2% du total brut) répartis comme suit :



**Figure 1: Répartition des énergies vertes**

On n'observe tout simplement aucune contribution de l'énergie solaire !

## 4. Les cellules photovoltaïques

### 4.1. Principe de l'effet photovoltaïque

Le but des cellules photovoltaïques est de convertir l'énergie lumineuse provenant du Soleil en énergie électrique. Ceci se fait en trois étapes :

- absorption des photons de la lumière solaire ;
- conversion de l'énergie reçue par les photons en énergie électrique (particules électriques libres) ;
- collecter les particules dans un circuit électrique externe.

Les cellules photovoltaïques doivent donc correspondre à des dispositifs optoélectroniques capables d'absorber un maximum de photons (couvrir un large spectre et posséder une probabilité d'absorption proche de 1). Les photons doivent être utilisés pour libérer des électrons qui devront alimenter un circuit électrique possédant la plus petite résistance possible.

Par ces observations, on se rend compte tout de suite que le dispositif répondant le mieux à nos attentes sont les semiconducteurs et plus précisément des jonctions-PN.

Le semiconducteur le moins cher actuellement présent sur le marché est le silicium, un élément en abondance sur la Terre puisqu'il compose à 28% l'écorce terrestre. Le silicium possède un gap de 1,1eV correspondant à une longueur d'onde de 1100nm (donc dans l'IR). Malheureusement ce gap ne se situe pas dans la gamme de longueurs d'ondes dans laquelle le Soleil émet préférentiellement mais en plus, il tombe dans un trou du spectre solaire : l'atmosphère absorbe justement les longueurs d'ondes aux alentours de 1150nm. Cependant vu son faible coût on utilisera quand même le silicium même si on part avec un désavantage comparativement aux semiconducteurs ayant leurs gaps dans le visible.

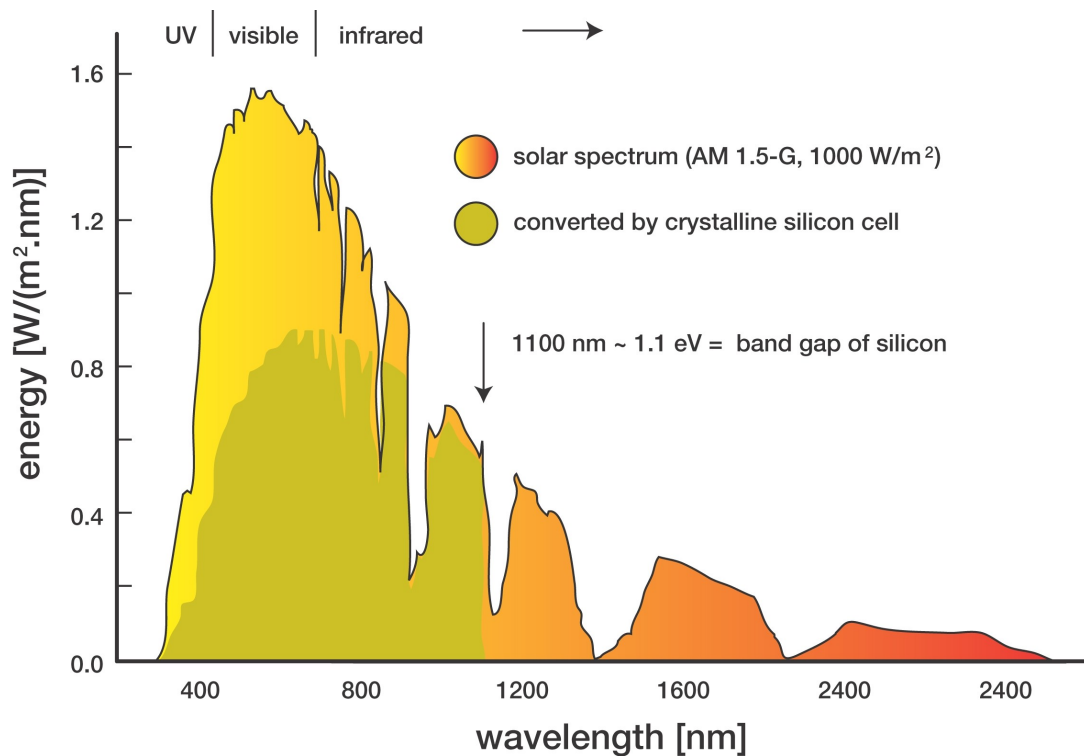


Illustration 3: spectre d'émission du Soleil

## 4.2. Fabrication de cellules photovoltaïques

### 4.2.1. Notions préliminaires

La cellule PV est donc composée d'une partie dopée  $n$ , ce qui se fait généralement avec du phosphore, et une partie  $p$  dopée à l'aide de Bore.

On sait que les porteurs excédentaires diffusent et se recombinent par transitions radiatives et que leur densité décroît donc de manière exponentielle en s'éloignant de la zone de charge d'espace. Les longueurs de diffusion  $L_n$  et  $L_p$  sont données ci-dessous en fonction des coefficients de diffusion  $D_n$  et  $D_p$  eux-mêmes fonctions de la mobilité des porteurs  $\mu_n$  et  $\mu_p$ .

$$L_x = \sqrt{D_x \tau_x} \quad ; \quad D_x = \mu_x \frac{k_B T}{e} \quad ; \quad \mu_x = \frac{e \tau_x}{m_x^*} \quad x = p \text{ ou } n$$

Puisque la mobilité de trous est significativement plus faible que celle des électrons, la longueur de diffusion des électrons  $L_n$  est plus grande que la longueur de diffusion des trous du côté  $n$ ,  $L_p$ .  $L_n$  est typiquement de l'ordre de quelques microns. On mettra donc la face dopée  $n$  du côté où les photons arrivent. (Dans le cas des LED's, on aurait mis le côté  $p$  vers l'extérieur puisqu'il s'agit dans ce cas

d'émettre des photons et donc d'éviter leur réabsorption).

Mais ce n'est pas tout, pour éviter les réflexions à la surface des cellules, on couvre celles-ci d'une couche anti-réfléctrice. Ce qui donne au final une cellule comparable à l'illustration suivante :

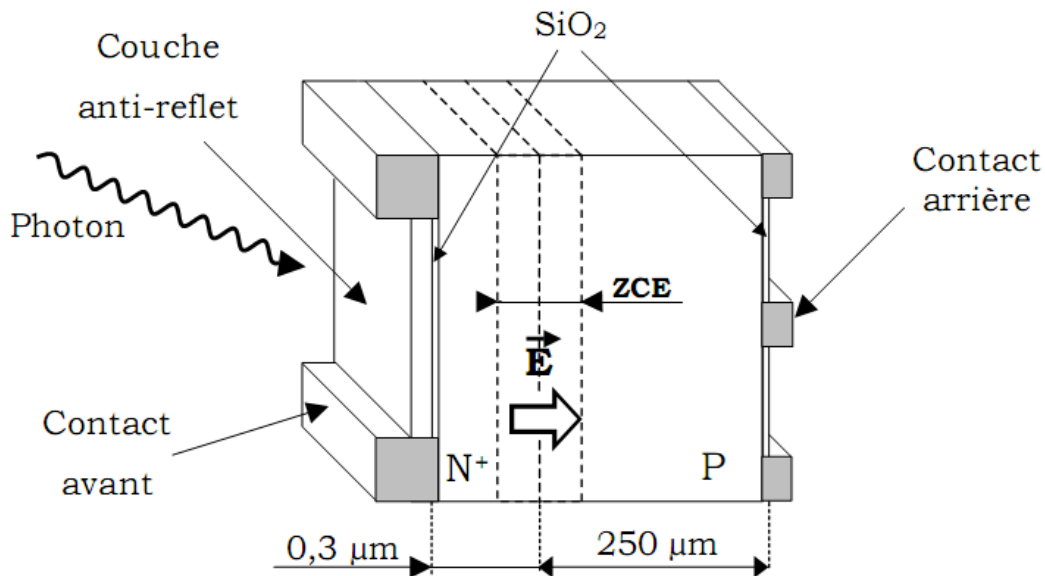


Illustration 4: cellule PV typique

Les contacts électriques de la face avant ont une forme de grille fine afin de n'occulter qu'une surface minime. Pour la face arrière, ce genre de précaution n'est évidemment pas utile.

#### 4.2.2. Processus de fabrication

Les entreprises reçoivent des lingots de silicium multicristallin déjà dopé  $p$ . Une première étape consisterait à rendre le silicium monocristallin pour obtenir un meilleur rendement. Ceci se fait généralement par la méthode de tirage de Czochralski. Bien évidemment le silicium monocristallin est plus cher mais possède un rendement supérieur au polycristallin de 3-4%. Le processus de fabrication des cellules photovoltaïques peut être décrit en 7 étapes.

##### 1ère étape : découpage

On découpe le silicium en plaques légèrement plus grandes que la taille finale de la cellule.

### **2ème étape : décapage et texturisation**

Cette deuxième étape explique pourquoi on a dû découper des cellules plus grandes que leur taille finale puisque cette étape consiste à décaper le silicium dans un bain de soude. Ceci a pour but d'éliminer les défauts de structures dus au sciage du silicium. De plus l'attaque ne se fait pas de manière homogène mais se fera de manière préférentielle au niveau des régions denses. De ce fait on verra apparaître à la surface des pyramides sur les grains orientés  $\langle 100 \rangle$ . Ces pyramides jouent un véritable piège à photons, ce qui augmente le rendement.

### **3ème étape : dopage du silicium**

Le dopage se fait par diffusion du phosphore provenant de  $\text{POCl}_3$ . On a donc bien l'intérieur dopé  $p$  et l'intérieur dopé  $n$ .

### **4ème étape : décapage**

Lors de la troisième étape, une couche de  $\text{P}_2\text{O}_3$  s'est formée, il a donc lieu de la décaper à l'HF.

### **5ème étape : oxydation sèche**

Cette étape a pour but d'assurer la passivation du dispositif.

### **6ème étape : dépôt de la couche anti-reflet**

Cette étape se fait grâce à un spray de  $\text{TiO}_2$ .

### **7ème étape : pose des contacts électriques**

Comme on l'a déjà dit plus haut, les contacts électriques de la face avant doivent être en forme de grille fine de sorte à n'occulter qu'une surface minimale.

Le développement des étapes n'a pas été développé plus en profondeur, car ce n'est pas tant la technique précise qui compte, surtout que celle-ci change d'un constructeur à l'autre. Mais ce qui importe, c'est à quel point les techniques utilisées sont polluantes. La fabrication de panneaux solaires est donc extrêmement polluante. De plus, les cellules sont souvent fabriquées en Chine avant d'être importées en Europe où elles sont assemblées. Le transport des cellules a donc un coût écologique non négligeable.

C'est pourquoi beaucoup d'études réalisent un tableau comparatif sur l'émission de CO<sub>2</sub> en g/kWh. Voici ce que ça donne :

Type d'énergie	Grammes de CO <sub>2</sub> émis par kWh
Pétrole	700
Charbon	900
Nucléaire	20
Hydraulique	10
Photovoltaïque	120
Éolien	10

Sources : EDF, réseau « sortir du nucléaire », et autres sites internet sans référence pour vérifications.

On remarque donc que les panneaux solaires ne sont pas écologiques à leur construction. Pourtant technologiquement ça pourrait être le cas, mais alors le coût serait plus élevé !

### 4.3. Caractéristiques de cellules photovoltaïques

Comme dans tous les systèmes énergétiques, l'énergie disponible aux bornes d'une cellule PV est fonction de l'énergie entrante et des pertes, ce que l'on peut écrire de la manière suivante :

$$E_{\text{électrique}} = E_{\text{lumineuse}} - E_{\text{pertes}} \quad \text{Équation 1}$$

Avec :

$E_{\text{électrique}}$  : l'énergie disponible aux bornes de la cellule PV.

$E_{\text{lumineuse}}$  : l'énergie incidente (flux lumineux).

$E_{\text{pertes}}$  : l'énergie perdue (pertes thermiques principalement).

#### 4.3.1. Le rendement d'une cellule photovoltaïque

Le rendement d'une photopile est le rapport entre l'énergie électrique qu'elle fournit et l'énergie du rayonnement reçue, c'est-à-dire le rapport :

$$\eta = \frac{E_{\text{électrique}}}{E_{\text{lumineuse}}} \quad \text{Équation 2}$$

Si on développe ce rendement on trouve l'expression suivant :

$$\eta = \frac{\int_0^{\lambda_g} P(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} P(\lambda) d\lambda} \cdot \frac{E_g \int_0^{\lambda_g} N(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} P(\lambda) d\lambda} \cdot \frac{qV_{CO}}{E_g} \cdot FF \cdot (1-R) \cdot \frac{A_f}{A_t} \cdot \eta_{abs} \cdot \eta_{cp} \cdot \eta_{réabs} \quad \text{Équation 3}$$

Le rendement dépend donc de 9 facteurs. Certains correspondent à des pertes fondamentales d'autres pas, c'est ce que nous analyserons dans les deux points suivants.

### 4.3.2. Pertes fondamentales

Détaillons chacun des facteurs de l'Équation 3 sur lesquels on ne peut influencer. Ces pertes sont inévitables à partir du moment où le matériau est choisi.

#### 4.3.2.1. Transparence aux grandes longueurs d'ondes

$$\eta_1 = \frac{\int_0^{\lambda_g} P(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} P(\lambda) d\lambda} \quad \text{Équation 4}$$

Les photons d'énergie inférieure à  $E_g$  ne peuvent contribuer à la création de paires électron-trou. Les photons ayant alors une longueur d'onde supérieure à  $\lambda_g$  ( $\lambda_g$  telle que  $E_g = h/\lambda_g$ ) sont donc inutiles.

#### 4.3.2.2. Pertes de l'énergie excédentaire

$$\eta_2 = \frac{E_g \int_0^{\lambda_g} N(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} P(\lambda) d\lambda} \quad \text{Équation 5}$$

L'énergie photonique excédentaire par rapport à  $E_g$  est perdue sous forme de chaleur ; un photon ne peut créer qu'au maximum une paire électron-trou.

#### 4.3.2.3. Facteur de tension

Le facteur de tension

$$\eta_3 = \frac{V_{CO}}{E_g/q} \quad \text{Équation 6}$$

correspond à la tension fournie par la cellule ( $V_{CO}$ ) par rapport à la tension qui serait fournie par le

gap ( $E_g/q$ ).

### 4.3.3. Pertes technologiques

Détaillons chacun des facteurs de l'Équation 3 qui engendrent des pertes qu'on pourrait éviter.

#### 4.3.3.1. Le facteur de remplissage

Le facteur de remplissage ou facteur de forme, encore souvent appelé par sa dénomination anglaise « Fill Factor » correspond à la puissance maximum délivrée par la cellule, divisée par le produit  $V_{CO} I_{CC}$ , correspondant à la puissance maximale idéale.

$$\eta_4 = FF = \frac{P_{max}}{V_{CO} I_{CC}} \quad \text{Équation 7}$$

Voici, à Illustration 5, un exemple de courbe I(V) d'une cellule éclairée à  $1000 \text{ W/m}^2$  et à une température de  $25^\circ\text{C}$ .

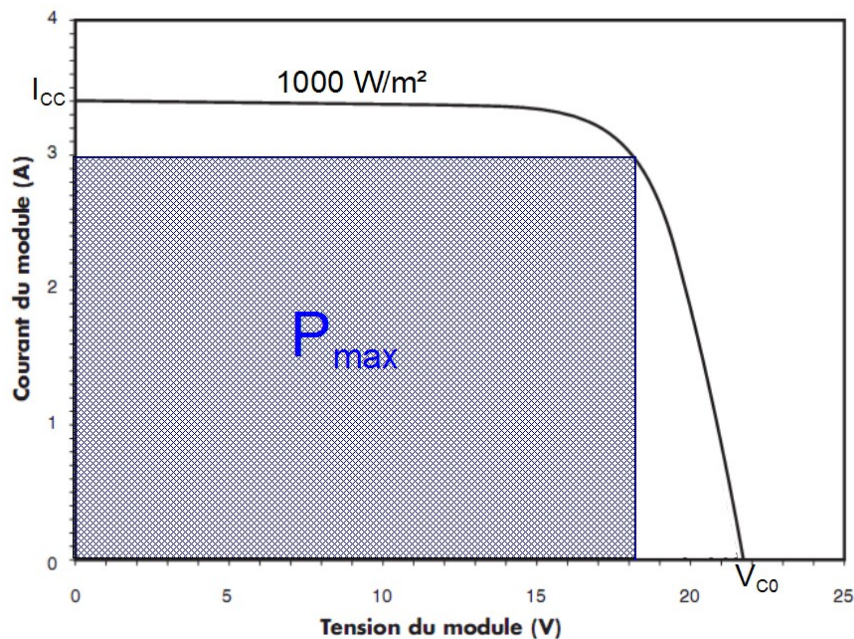


Illustration 5: Courbe I(V) et puissance maximale

Le facteur de forme FF est de l'ordre de 70% pour une cellule de fabrication industrielle.

**4.3.3.2. Réflexions (R)**

Une partie des photons atteignant la plaque sont réfléchis par la surface. Ce problème est considéré comme technologique car un traitement de surface permet de le limiter.

Le rendement est donc proportionnel à

$$\eta_5 = (1 - R) \quad \text{Équation 8}$$

**4.3.3.3. Surface ouverte**

Comme on l'a vu précédemment, des contacts sont nécessaires sur la face avant de la cellule, ceci entraîne malheureusement une perte de surface active.

Dès lors, le rendement est proportionnel à l'aire effective divisée par l'aire totale de la cellule :

$$\eta_6 = \frac{A_{eff}}{A_t} \quad \text{Équation 9}$$

**4.3.3.4. Absorption incomplète ( $\eta_{abs}$ )**

Même si les photons entrent dans la cellule, il n'est pas certain que celui-ci sera absorbé, ceci notamment parce que la cellule n'est pas assez épaisse. Il existe des techniques de piégeage permettant de limiter ce phénomène.

**4.3.3.5. Autres phénomènes ( $\eta_{cp}$ )**

Il n'est pas garanti qu'un photon engendrera la création d'une paire électron-trou. On peut en effet avoir création d'électrons Auger, émission d'électrons secondaires... Même si ces phénomènes sont négligeables, ils existent quand même.

**4.3.3.6. Réabsorption ( $\eta_{réabs}$ )**

Même si une paire électron-trou a été photogénérée, celle-ci peut se recombiner et donc ne pas participer au courant. Des procédés permettent de réduire les recombinaisons.

#### 4.4. Différents types de cellules photovoltaïques

Type de cellule	2002			2003
	théorique	En laboratoire	Disponibles	
Si monocristallin	27.0%	24.7%	14.0-16.0%	Modules de grandes dimensions pour toits et façades, appareils de faibles puissances, espace (satellites)
Si polycristallin	27.0%	19.8%	12.0-14.0%	Modules de grandes dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles (reliés réseau ou sites isolés)
Si amorphe	25.0%	13.0%	6.0-8.0%	Appareils de faible puissance production d'énergie embarquée (calculatrice montres...) modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
GaAs	29.0%	27.5%	18.0-20.0%	Systèmes de concentrateur, espace (satellites).
CdTe	28.5%	16.0%	8.0%	Modules de grandes dimensions (intégrations dans le bâtiment)

Les différences de rendement sont dues essentiellement aux structures internes des matériaux utilisés pour les différents types de cellules photovoltaïques et à leurs caractéristiques intrinsèques. Les rendements indiqués dans ce tableau correspondent à des conditions de fonctionnement standard en laboratoire.

Remarques sur les conditions standards :

- éclairement solaire de  $1 \text{ kW/m}^2$  (correspondant à peu près à une exposition perpendiculaire aux rayons du soleil à midi par temps clair d'été) ;
- température de la cellule PV égale à  $+25^\circ\text{C}$ .
- répartition spectrale du rayonnement dit **AM.1,5** (correspondant au rayonnement solaire parvenant au sol après avoir traversé une atmosphère de masse 1 à  $45^\circ$ );

*Note* sur la masse d'air optique : lors de sa traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire direct (provenant du disque solaire) est affaibli par absorption et diffusion sur les molécules atmosphériques. Cet affaiblissement du rayonnement est fonction du nombre de particules et donc de la longueur du trajet parcouru par les photons avant de parvenir sur la cellule photovoltaïque.

### 4.5. La courbe courant-tension d'une cellule photovoltaïque

La courbe caractéristique d'une cellule PV représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule PV depuis le court-circuit (tension nulle correspondant au courant maximum produit) jusqu'au circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes de la cellule).

Cette courbe est établie dans des conditions ambiantes de fonctionnement données (répartition du rayonnement donnée, rayonnement donné, cellule PV à une température donnée, air ambiant circulant à une vitesse donnée). En effet, le fonctionnement des cellules photovoltaïques dépend des conditions d'ensoleillement et de température à la surface de la cellule. Ainsi, chaque courbe courant-tension correspond à des conditions spécifiques de fonctionnement.

Nous avons déjà quelque peu parlé de ces courbes au point 4.3.3.1. page 17.

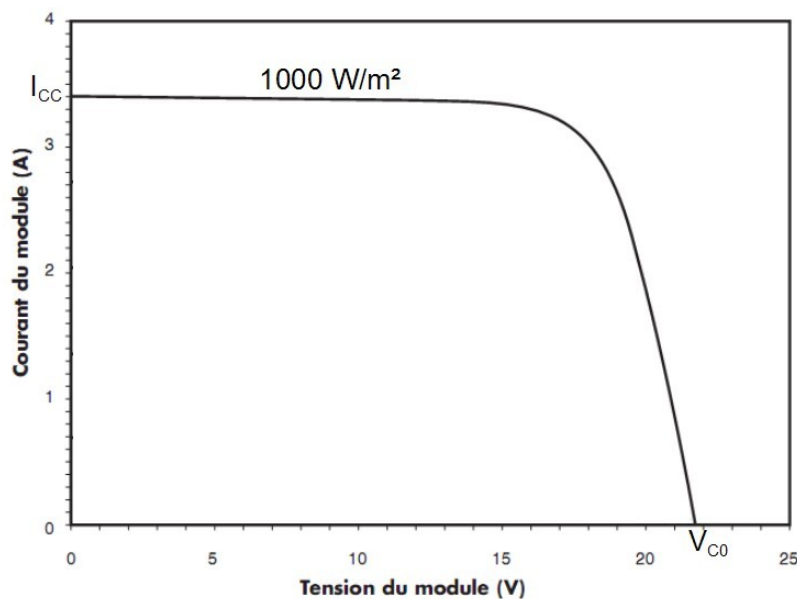


Illustration 6: courbe I(V) à  $T=25$  et un éclairement de  $1000 \text{ W/m}^2$

#### Tension de circuit ouvert $V_{CO}$ (pour $I_{CO} = 0$ ) :

Elle est fonction des caractéristiques de la jonction électronique et des matériaux. On l'obtient en branchant directement un voltmètre aux bornes de la cellule.

#### Courant de court-circuit $I_{CC}$ (pour $V_{CC} = 0$ ) :

Le courant court-circuit est directement fonction de la surface de la cellule.

Dans les cellules PV au silicium, la tension  $V_{CO}$  est de l'ordre de 0,4 à 0,6 V et le courant  $I_{CC}$  est de l'ordre de 12 mA/cm<sup>2</sup> pour des conditions de test standard (STC) en laboratoire, c'est-à-dire une répartition du rayonnement de type solaire AM = 1.5, un rayonnement incident normal sur la cellule PV de 1 000 W/m<sup>2</sup>, et une température de cellule à +25 °C.

### 4.5.1. La puissance caractéristique d'une cellule photovoltaïque

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, vitesse de circulation de l'air ambiant, etc..), la puissance électrique P disponible aux bornes d'une cellule PV est égale au produit du courant continu fourni I par une tension continue donnée V :

$$P = V \cdot I = R \cdot I^2 \quad \text{Équation 10}$$

#### La puissance max :

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximum  $P_{\max \text{ idéale}}$  correspondrait donc à la tension de circuit ouvert  $V_{CO}$  multipliée par le courant de court-circuit  $I_{CC}$  (c'est-à-dire à la surface du rectangle OABC) :

$$P_{\max \text{ idéale}} = V_{CO} \cdot I_{CC} \quad \text{Équation 11}$$

En pratique, la courbe caractéristique d'une cellule PV est plus "arrondie", et la tension au point de puissance maximum  $V_{P_{\max}}$  est inférieure à la tension de circuit ouvert  $V_{CO}$ , de même que le courant fourni  $I_{P_{\max}}$  est inférieur, pour cette même tension, au courant de court-circuit  $I_{CC}$ .

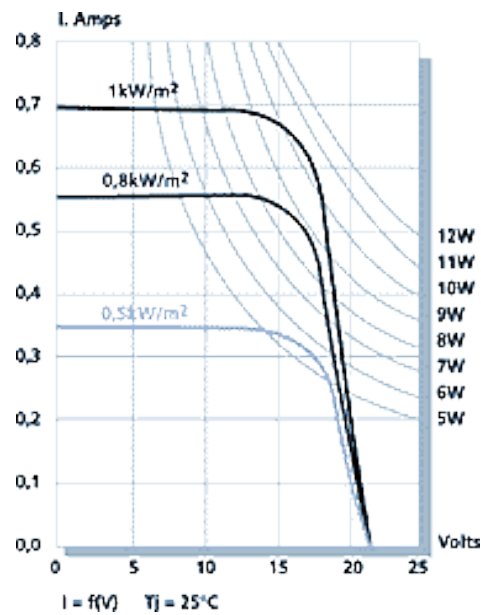


Illustration 7: courbes d'isopuissance

#### 4.5.2. La puissance crête d'une cellule PV

Dans le cas d'utilisation de photopiles avec le rayonnement solaire, la puissance crête d'une photopile, aussi nommée puissance "catalogue", notée  $W_c$  (Watt crête) ou  $W_p$  (Watt peak), représente la puissance électrique maximum délivrée dans les conditions standards. C'est toujours sous cette forme qu'on trouve les informations dans les catalogues.

#### 4.5.3. L'influence de l'éclairement

L'énergie électrique produite par une cellule photovoltaïque dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. Sans éclairement, il n'y a pas de photon et donc pas de création de paire photogénérée et donc pas de courant. La figure suivante représente la caractéristique courant-tension d'une cellule PV solaire en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes. On remarque que la tension  $V_{\max}$  correspondant à la puissance maximale ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant  $I_{\max}$  qui augmente fortement avec l'éclairement.

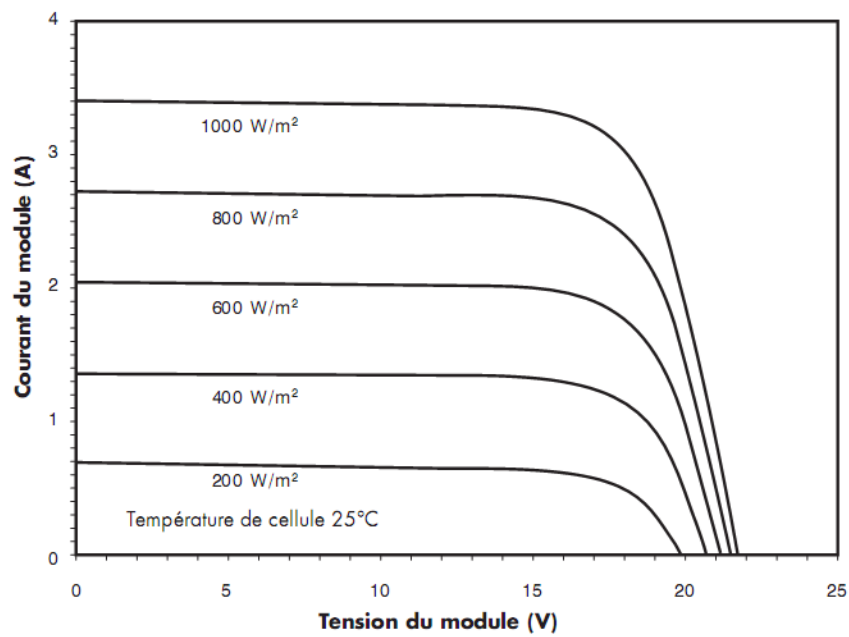


Illustration 8: influence de l'éclairement

On observe que alors que  $V_{CO}$  ne dépend presque pas de l'éclairement,  $I_{CC}$  en dépend fortement.

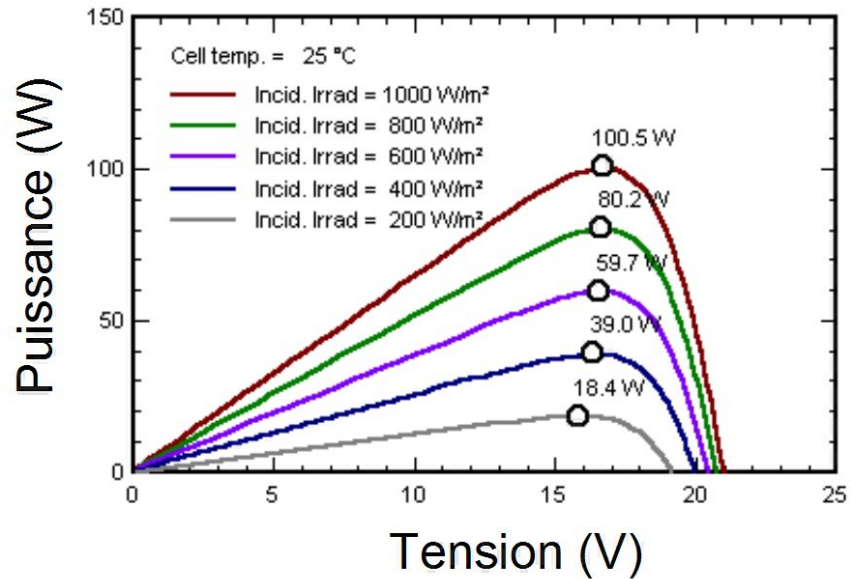


Illustration 9: influence de l'éclairement sur la courbe Puissance(V)

#### 4.5.4. Influence de la température sur une cellule photovoltaïque

Les caractéristiques électriques d'une cellule PV dépendent de la température de jonction au niveau de la surface exposée. Le comportement de la cellule PV en fonction de la température est complexe.

Les courbes suivantes représentent l'évolution du courant et de la tension en fonction de la température de jonction de la cellule, les autres conditions extérieures restant fixes :

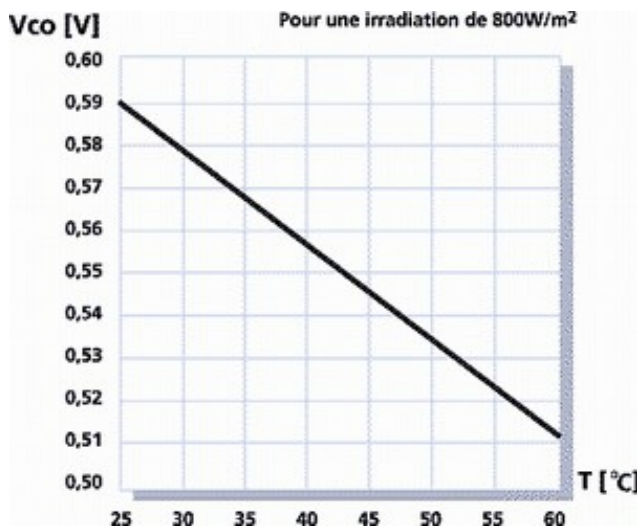


Illustration 10: Influence de la température sur VCO

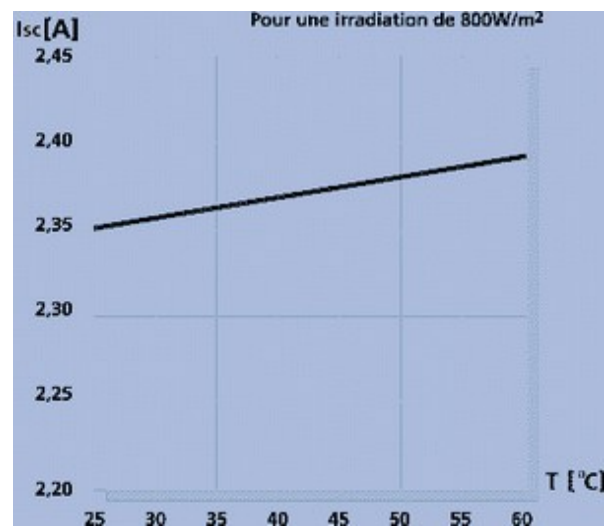


Illustration 11: influence de la température sur Icc

Lorsque la température augmente, la tension diminue alors que le courant augmente.

Dans le cas de cellules au silicium, le courant augmente d'environ  $0,025 \text{ mA/cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  alors que la tension décroît de  $2,2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ . La baisse globale de puissance est d'environ  $0,4\%/^\circ\text{C}$ . Ainsi, plus la température augmente et moins la cellule est performante. Ceci est, à première vue, contraire à l'intuition.

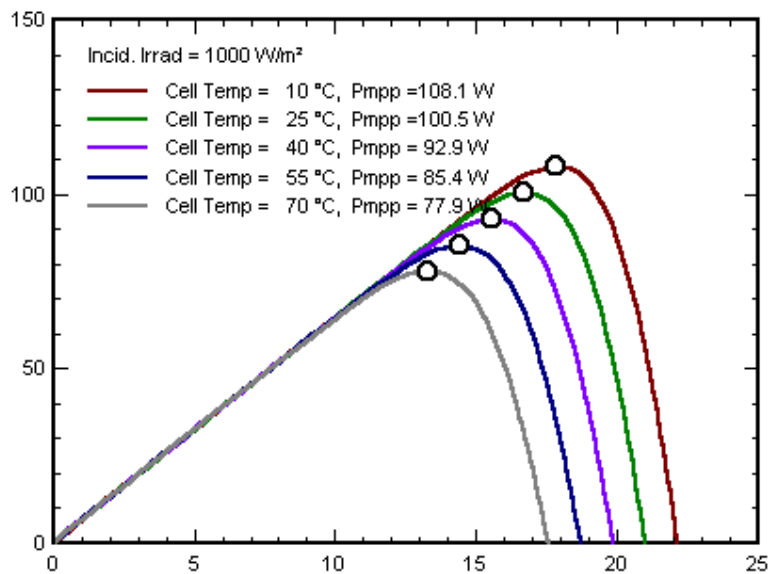


Illustration 12: évolution de la puissance en fonction de la température

#### 4.5.4.1. L'influence de la température et du rayonnement

Pour le calcul d'une installation solaire, il faut donc tenir compte du fait que l'éclairement et la température varient simultanément. Ce point est très souvent négligé lors du dimensionnement d'ensembles solaires photovoltaïques.

Lors du dimensionnement d'une installation solaire, il conviendra donc de tenir compte des conditions et des variations climatiques du site choisi.

Notons enfin que le rendement global d'un panneau est déterminé par la cellule la plus faible. Un ombrage partiel est donc très mauvais pour le rendement des panneaux solaires.

#### 4.6. Prix

Le prix d'un système photovoltaïque raccordé au réseau est aujourd'hui de 6 € par Watterête (Wc). Un système d'une puissance d'1 kWc, qui comprend  $\pm 9\text{m}^2$  de capteurs, revient donc à 6000 €, pose et TVA comprises. Dans le cas d'un système autonome, dont le rendement est plus faible (à cause des batteries), on prévoira une puissance un peu supérieure ( $\times 1,25$ ). Par ailleurs, pour ces systèmes, le prix du Wc se situe plutôt autour de 10 €.

En Belgique, l'énergie moyenne fournie annuellement par un système d'1 kWc est de 800 kilowattheures (kWh). Cette production est naturellement très inégalement répartie : elle varie de 0,6 kWh par jour en moyenne en décembre à 4,1 kWh en juin.

Considérant que la consommation électrique standard d'un ménage wallon est de 4000 kWh par an, il faudrait, pour la couvrir, un système raccordé au réseau de 5 kWc, ce qui représente un investissement de l'ordre de 30.000 €, ou un système autonome de 6,25 kWc pour un montant de 62.250 € (à 10 €/Wc).

Ceci étant posé, il est nécessaire d'insister sur le fait que, en réalité, le recours à l'énergie photovoltaïque ne se conçoit pas sans une réduction et l'optimisation de la consommation électrique. Ceci implique :

- d'une façon générale, la conception et la construction - ou la rénovation - des bâtiments de façon qu'ils aient des besoins énergétiques limités ;
- l'utilisation d'appareils peu énergivores : ceux qui ont la plus faible consommation électrique sont les appareils qui fonctionnent en courant continu (ils couvrent un grand nombre d'applications : froid, télévision, télécommunication, etc.) ;
- un fonctionnement rationnel dans le temps.

Une telle démarche a pour conséquence de réduire très sensiblement les chiffres donnés plus haut sur la consommation moyenne d'un ménage, et donc la taille du système photovoltaïque capable de la couvrir.

Source pour ce point 4.6 : APERe (**texte recopié** quasi intégralement de leur site web)

## 5. Alimenter la Belgique en électricité uniquement grâce au photovoltaïque, une utopie ?

Nous allons rapidement calculer la proportion de surface qu'il faudrait couvrir avec des panneaux solaires pour couvrir tous les besoins électriques belges.

Hypothèse :

- la Belgique consomme 85 000 GWh/an ;
- un panneau solaire de 1m<sup>2</sup> produit 100kWh/an ;
- la superficie de la Belgique est de 30 500 km<sup>2</sup> ;

On peut alors facilement calculer la surface nécessaire de panneaux solaires

$$\frac{85.10^9 \text{ kWh/an}}{100 \text{ kWh/an.m}^2} = 850\,000\,000 \text{ m}^2$$

Soit 850km<sup>2</sup> de panneaux solaires. Ceci représente :

$$\frac{850 \text{ km}^2}{30500 \text{ km}^2} = 2,79\%$$

2,79% du territoire belge.

Bien évidemment ce résultat doit être revu à la hausse car le Soleil produit de l'électricité la journée mais on en a besoin principalement en soirée ! De ce fait, il faut stocker l'énergie, ceci engendre dès lors un coût plus élevé mais aussi des pertes supplémentaires lors du stockage de l'électricité. Mais il faut aussi savoir qu'une partie de l'électricité produite actuellement est perdue pendant le transport et la distribution, ainsi presque 10% sont perdus inutilement. Avec les panneaux solaires, l'électricité serait produite proche du lieu d'utilisation, et donc moins de pertes se produisent.

Mais du fait des pertes de stockage, il faudrait compter près de 4-5% du territoire à couvrir, ce qui représente à peu près la surface bâtie en Belgique.

Techniquement, il serait donc possible d'alimenter la Belgique grâce au photovoltaïque, mais à quel prix ?

## 6. Conclusions

L'avenir de la planète se joue en ce moment même. L'une des solutions au problème énergétique est l'installation de panneaux solaires photovoltaïques, considéré comme une solution écologique. Certains dénoncent très rapidement l'utopie d'une telle source d'énergie, mentionnant le manque de Soleil en Belgique.

Ce travail a permis de démentir deux affirmations trop hâtives.

En effet, premièrement, nous avons vu d'une part que les panneaux solaires photovoltaïques étaient fort polluants à leur fabrication. Et même si leur émission de CO<sub>2</sub> par kWh est bien en-dessous des centrales classiques, elle est nettement supérieure aux émissions dues aux centrales nucléaires, à l'éolien et aux centrales hydroélectriques. Il est cependant certain que l'emploi généralisé de panneaux solaires photovoltaïques engendrerait beaucoup moins de pollution qu'actuellement.

Deuxièmement, la solution énergétique des panneaux solaires photovoltaïques est souvent considérée comme utopiste. Or, même pour un pays comme la Belgique, gros consommateur d'électricité pour un petit territoire, seuls 5% (voire moins) de la surface du pays devraient suffire pour s'alimenter uniquement grâce à cette technologie. Bien évidemment il n'est jamais conseillé de n'utiliser qu'une seule source d'énergie, la diversité énergétique est un point indiscutable. Cependant, il est certain que c'est une technologie qui coûte cher, du moins pour le moment ! D'où le pénible lancement dans les pays où la politique appuie peu ce genre de technologies. Alors que certains pays connaissent un développement extraordinaire en énergies photovoltaïques (comme l'Espagne et l'Allemagne), les autres pays sont encore au point mort invoquant le prix de cette technologie.

Mais après tout, l'avenir de la planète ne vaut-il pas ce prix ?

La solution la plus écologique et la moins onéreuse reste et restera toujours l'abstinence à la consommation...

## 7. Sources

### 7.1. Sites internet

<http://www.echosysteme.qc.ca/Siteenergie.html>  
<http://www.specmat.com/Overview%20of%20Solar%20Cells.htm>  
<http://www.inti.be/ecotopie/solvolt.html>  
<http://www.ecolo.be/index.php?class=liens&page=autres/detailrubr&rb=34>  
<http://perso.wanadoo.fr/f5zv/RADIO/RM/RM27/RM27c01.html>  
[http://perso.wanadoo.fr/michel.hubin/physique/solide/chap\\_s8.htm](http://perso.wanadoo.fr/michel.hubin/physique/solide/chap_s8.htm)  
<http://www.lei.ucl.ac.be/~matagne/SOLAIRE/SEM03/S03P00.HTM>  
[http://www.cea.fr/Fr/pedagogie/Energie\\_ms/energie\\_environnement\\_reserves.htm](http://www.cea.fr/Fr/pedagogie/Energie_ms/energie_environnement_reserves.htm)  
<http://www.industrie.gouv.fr/energie/statisti/pdf/reperes.pdf>  
[www.apere.org](http://www.apere.org)  
<http://www.ecolo.org/intro/introfr.htm>  
[www.edf.fr](http://www.edf.fr)  
[www.wwf.fr](http://www.wwf.fr)  
[mineco.fgov.be](http://mineco.fgov.be)

### 7.2. Bibliographie-documents écrits

- Bilan énergétique et l'évolution du marché énergétique réalisé : SPF Economie, PME, Classes moyennes et Energie
- Centrales photovoltaïques, PACER, 1996, AT Verlag, ISBN 3-905232-26-X
- THUILLIER, Bruno. [Thèse] Caractérisation structurale des contacts ohmiques réalisés à partir d'encres métalliques sur cellules photovoltaïques en silicium multicristallin
- RICAUD A. Photopiles solaires - De la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés.
- Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1997
- Shell – Fiche d'information produit : Shell SM55 – Module Solaire Photovoltaïque
- Cours interfacultaire de développement durable, B. Hespel et X. Thunis, FUNDP
- Electronique, 1<sup>ère</sup> licence, 2003, R. Sporken