

Ministère de l'Enseignement Supérieur et  
de la Recherche Scientifique

Université d'Oran des sciences et de  
technologie Mohamed BOUDIAF

USTOMB

Faculté du Génie Electrique

Département d'électronique



وزارة التعليم العالي  
والبحث العلمي

جامعة وهران للعلوم  
والتكنولوجيا

محمد بوضياف

كلية الهندسة  
الكهربائية

الإلكترونيك قسم

# POLYCOPIE DE COURS

## Energies renouvelables : le solaire photovoltaïque

Présenté par :

ZEGRAR MANSOUR

ZERHOUNI M'HAMED HOUARI

ZERHOUNI FATIMA ZOHRA épouse ZEGRAR

AN : 2020-2021

## Préface

L'approvisionnement énergétique mondial est aujourd'hui, essentiellement basé sur l'utilisation des ressources fossile et fissile. A terme, de telles sources d'énergie pourraient causer de sérieux préjudices à notre environnement. Les pollutions atmosphériques et l'effet de serre, mis en cause dans le réchauffement climatique, associés aux retombées radioactives liées au nucléaire sont des conséquences attendues. Ainsi, à la lumière de tous ces éléments, le système d'énergie actuel n'est pas viable sur le long terme. Le changement climatique est tenu pour l'une des menaces les plus sérieuses pesant sur la durabilité de l'environnement de la planète, sur la santé et le bien-être humain et sur l'économie mondiale. Ceci met la situation énergétique en rupture avec les objectifs du développement durable et provoque une demande grandissante pour de nouvelles sources d'énergie renouvelables et non polluantes. Devant ces contraintes environnementales exigées d'une part et l'augmentation du coût de production de l'électricité d'autre part, la tendance actuelle est orientée vers l'exploitation des sources d'énergie renouvelables (énergie solaire pour notre part). L'enjeu énergétique est double : trouver une source d'énergie capable de remplacer les énergies classiques et ne dégageant pas ou peu de gaz à effet de serre. C'est dans ce contexte que se développent les énergies renouvelables. Il est important de noter que pour répondre à nos besoins croissants en énergie de la façon la plus durable possible, il est nécessaire de développer cette énergie renouvelable. L'augmentation du coût des énergies classiques d'une part, et la limitation de leurs ressources d'autre part, font que l'énergie photovoltaïque devient de plus en plus une solution parmi les options énergétiques prometteuses avec des avantages comme l'abondance, l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités en tout point du globe terrestre. Ainsi, actuellement, on assiste à un regain d'intérêt pour les installations utilisant l'énergie solaire, surtout dans les régions ayant des conditions climatiques favorables ou encore pour les applications sur des sites.

Atteindre la durabilité énergétique est devenu l'un des défis mondiaux ainsi que l'amélioration de l'efficacité énergétique. Dans ce contexte, ce présent manuscrit de la matière **Energies renouvelables : le solaire photovoltaïque** s'adresse aux étudiants de première année en master en électronique, filière ESE et à tous ceux qui désirent apprendre, améliorer leur connaissance dans cette matière ...C'est une base qui leur permettra de suivre, de comprendre et d'assimiler les rudiments de cette énergie...

Ce support de cours couvre l'étendue du programme en vigueur de cette matière découverte en master en génie électrique (filiale ESE).

La présentation de ce support de cours respecte l'ordre chronologique dans lequel la matière est en général, traitée. Ce manuel est découpé en plusieurs chapitres. Le chapitre 1 est dédié aux énergies renouvelables. Le chapitre 2 consiste en l'étude de la source solaire. Le chapitre 3 s'intéresse à la source photovoltaïque. Le chapitre 4 traite les systèmes photovoltaïques.

Il a été donc proposé, dans ce polycopié de cours, d'apporter une contribution à l'étude de l'énergie renouvelable solaire photovoltaïque.

**Semestre : 2**

**Unité d'enseignement : UED 1.2**

**Matière : Energies renouvelables : le solaire photovoltaïque**

**VHS : 22h30 (Cours : 1h30)**

**Crédit : 1**

**Coefficient : 1**

**Objectifs de l'enseignement:**

Cette matière aborde des notions relatives aux énergies renouvelables non polluantes, aux dispositifs photovoltaïques (PV), à la conversion PV, aux procédés de fabrication d'une cellule solaire, aux assemblages des modules PV, à leur dégradation ... Elle aborde, en outre, les systèmes auxiliaires : la batterie, la pile à combustible (avec l'hydrogène comme vecteur d'énergie), les convertisseurs, ... La matière s'intéressera, par ailleurs, aux différentes charges à alimenter continues ou alternatives en recherchant toutes les possibilités de couplage avec un générateur PV, à la description d'un système PV global, ses caractéristiques et à l'optimisation du fonctionnement du système.

**Connaissances préalables recommandées :**

Notions sur les semi-conducteurs, la physique du rayonnement, les mathématiques, l'électronique ...

**Contenu de la matière :**

**Chapitre 1 : Energies renouvelables**

Les formes d'énergie, C'est quoi une énergie renouvelable, Principales énergies renouvelables, La situation énergétique mondiale, ...

**Chapitre 2 : La source solaire**

Rayonnement solaire, Le gisement solaire, L'énergie solaire (thermique, photovoltaïque, thermodynamique)

**Chapitre 3 : La source photovoltaïque**

La conversion photovoltaïque, Technologie des cellules solaires, Propriétés des cellules solaires, Modélisation d'une cellule (d'un module) photovoltaïque (modélisation électrique, thermique ...), Rendement de conversion, facteur de forme ..., Différentes connexions (série, parallèle, mixte), Impact de divers facteurs sur les caractéristiques électriques, Dégradation, Protections des modules photovoltaïques, Les applications de l'énergie photovoltaïque (pompage, connexion au réseau, ...).

#### **Chapitre 4 : Systèmes photovoltaïques**

Connexion directe générateur photovoltaïque – charge, Stockage (Batterie), Pile à combustible, Hacheur, Onduleur, Etude d'un exemple de système global (l'hybridation), Problème de dimensionnement d'une installation photovoltaïque, *Maximum Power Point Tracker* (MPPT).

#### **Mode d'évaluation :**

Examen : 100 %

#### **Références bibliographiques:**

1. A. Vapaille, *Dispositifs et circuits intégrés semiconducteurs*, Dunod, 1987.
2. M. Orgeret, *les piles solaires*, Masson, 1985.
3. A. Ricaud, *Photopiles solaires*, Presses polytechniques et universitaires romandes, 1997.
4. E. Lorenzo, G. Araflio, *Solar Electricity - Engineering of Photovoltaic Systems*.
5. Minano, R. Zilles, *Stand alone photovoltaic Applications*, JAMES & JAMES 1994.
6. B. Multon, *Production d'énergie électrique par sources renouvelables*, *Techniques de l'Ingénieur, Traités de Génie Electrique, D4005/6*, mai 2003.
7. J. Nelson, *The physics of solar cells*, Imperial College Press.
8. A. Labouret, P. Cumune, *Cellules solaires*, 5e édition - *Les bases de l'énergie photovoltaïque*, Dunod, 2010
9. A. Labouret, *Energie solaire photovoltaïque*, 3ème édition, Dunod, 2006.
10. Deambi, Suneel, *Photovoltaic System Design: Procedures, Tools and Applications*, CRC Press, 2016.
11. O. Isabella, K. Jäger, A. Smets, R. Van Swaaij, MiroZeman, *Solar Energy: The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems*, UIT Cambridge Ltd, 2016.
12. Gottfried H. Bauer, *Lecture Notes in Physics 901, Photovoltaic Solar Energy Conversion*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015.
13. [www.pveducation.org](http://www.pveducation.org)
14. <http://www.cythelia.fr/nos-documents/>
15. <http://www.solems.com/depots-de-couches-minces>

## 1) Introduction

On utilise de plus en plus l'électricité. Elle devient une nécessité. Sa production actuelle pose des soucis. Les émissions de gaz à effet de serre sont synonymes de pollution.

Fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux, les énergies renouvelables n'engendrent pas ou peu de déchets ou d'émissions polluantes. Elles participent à la lutte contre l'effet de serre et les rejets de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Les scientifiques ambitionnent une production non polluante d'une électricité dite 'verte'.

## 2) C'est quoi l'énergie ?

Le terme énergie vient du grec *energeia* qui signifie «force en action ». C'est la capacité que possède un corps, un système, de produire un travail capable de produire un mouvement, de la chaleur ou d'ondes électromagnétiques (à titre d'exemple la lumière). En économie, on désigne par énergie soit la matière première soit le phénomène naturel qui produit un travail.

On peut faire une distinction dans le domaine de la thermodynamique. En effet, deux principales formes d'énergie sont dégagées le travail (énergie fournie par une force lorsque son point d'application se déplace, c'est en général l'énergie cinétique macroscopique ou énergie électrique) et la chaleur (énergie cinétique microscopique).

Toute classification de l'énergie est plus ou moins arbitraire. Nous tenterons de classer les formes d'énergie selon leur provenance dans la nature et selon le phénomène physique principal qui les concernent.

## 3) Les différentes formes de l'énergie

Il y'en a plusieurs. On citera :

- A) **Energie électromagnétique** comme l'énergie de la lumière, par exemple. C'est une énergie portée par les ondes électromagnétiques en quanta d'énergie appelées photons.
- B) **L'énergie cinétique** qui est définie pour une masse en mouvement. La chaleur qui est l'énergie thermique n'est autre que l'énergie cinétique d'agitation microscopique des molécules formant un objet.
- C) **L'énergie potentielle**, qui est l'énergie d'un objet soumis à la gravité par exemple, l'énergie libérée au cours d'une réaction chimique...

On définit l'énergie mécanique qui est l'énergie cinétique et l'énergie potentielle découlant d'une force dont le travail ne dépend pas du trajet parcouru (ex.: le poids).

### Notion d'énergie primaire, d'énergie secondaire

L'énergie existe sous différentes formes. Nous ferons une distinction, essentielle pour l'analyse des ressources énergétiques, entre les énergies primaires et les énergies secondaires.

**L'énergie primaire** correspond à l'énergie 'brute' c.à.d. l'énergie disponible dans l'environnement et directement exploitable sans transformation. On citera à titre d'exemple le pétrole brut, le gaz naturel, la biomasse, le rayonnement solaire, l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne... L'utilisation directe de la lumière du soleil (éclairage, séchage du linge, ...) ne demande pas de transformation. En résumé, les énergies primaires sont celles qu'on trouve dans la nature, plus ou moins prêtes à l'emploi et qui sont susceptibles de satisfaire tous nos besoins, de manière directe ou indirecte.

**L'énergie secondaire** est toute l'énergie obtenue par transformation d'une énergie primaire (exemple : électricité). Une fois produite, cette énergie secondaire doit être transportée vers l'utilisateur. Les énergies secondaires n'existent pas comme telles dans la nature. Elles sont obtenues par transformation à partir d'une autre énergie. Pour désigner les énergies secondaires, on utilise souvent l'expression "vecteurs énergétiques".

On utilise une énergie secondaire parce qu'elle est plus "pratique" que la forme primaire. On citera quelques formes d'énergies secondaires.

- **L'électricité** est produite essentiellement dans des centrales électriques (thermiques, nucléaires ou hydrauliques) dans lesquelles une machine tournante entraîne un alternateur. Elle est aisément transportable et facilement utilisable par des milliers de charges diverses. Son gros inconvénient est qu'elle est difficilement stockable. Les meilleures solutions sont le stockage dans des barrages-centrales hydrauliques (pompage-turbinage) et le stockage dans des batteries. De plus, le transport de l'électricité par lignes électriques, sous forme de courant alternatif, peut difficilement dépasser 1.000 ou 1.500 km sans que les pertes ne deviennent significatives.
- **L'hydrogène** peut-être obtenu à partir de l'eau, par électrolyse, ou à partir d'hydrocarbures, par reformage. Il faut ensuite le comprimer ou le liquéfier puis le transporter pour finalement l'utiliser, généralement dans une pile à combustible qui restitue de l'électricité. Il est très explosif.
- **L'essence, le diesel, le fioul de chauffage, le kérosène**, etc. Ce sont des carburants produits dans des raffineries, le plus souvent à partir de la transformation du pétrole.
- **Le coke**, obtenu à partir du charbon dans des cokeries.

Le tableau ci-dessous donne un récapitulatif des différentes énergies.

<b>Formes primaires</b>	<b>Classiques</b>	<b>Solaire ancien</b>	<b>Charbon</b>
			<b>Pétrole</b>
			<b>Gaz</b>
			<b>Non conventionnels</b> (schistes bitumineux, sables asphaltiques, hydrates de méthane)
		<b>Solaire récent</b>	<b>Biomasse</b>
			<b>Hydraulique</b>
			<b>Eolienne</b> (et houle et courants marins)
		<b>Non solaire</b>	<b>Photovoltaïque et Thermique</b>
			<b>Géothermique</b>
			<b>Marées</b>
<b>Relativistes</b>	<b>Fission</b>	<b>Uranium<sub>235</sub></b>	
		<b>Plutonium et Thorium</b>	
	<b>Fusion</b>	<b>Deutérium et tritium</b>	
<b>Formes secondaires</b>	<b>Electricité</b>		
	<b>Hydrogène</b>		
	<b>Essence, Gasoil, Kérosène, Coke...</b>		
	...		

Tableau résumant les différentes énergies

#### 4) C'est quoi une énergie renouvelable ?

En fonction de sa source, l'énergie peut se diviser en énergie renouvelable et non renouvelable.

Une énergie est dite renouvelable lorsqu'elle est produite par une source que la nature renouvelle en permanence, contrairement à une énergie dépendant de sources qui s'épuisent. Ainsi, les énergies renouvelables sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est continu, assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. Elles sont exploitables par l'homme. Elles existent en grande quantité et leur utilisation n'est pas nuisible à l'environnement. Elles sont issues du rayonnement solaire, du noyau terrestre et des interactions gravitation de la lune et du soleil avec les océans.

Une énergie non renouvelable est disponible en quantité limitée. Elle n'est pas en mesure de se renouveler. On donnera comme exemple le charbon, le gaz, le pétrole. Ce sont les énergies fossiles (hydrocarbures) ainsi que l'énergie fissile comme l'énergie nucléaire.

#### 5) Principales énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont très diverses mais elles proviennent toutes de deux sources naturelles principales :

- le Soleil : il émet des rayonnements transformables en électricité ou en chaleur. Il génère des zones de températures et de pression inégales à l'origine des vents. Il engendre le cycle de l'eau. Il permet la croissance des plantes et la génération de la biomasse.
- la Terre, dont la chaleur interne peut être récupérée à la surface.

On a les énergies renouvelables d'origine éolienne, solaire, hydraulique, géothermique et provenant de la biomasse...

- **L'énergie hydraulique** des grands barrages est aujourd'hui la première des énergies renouvelables. La Chine, le Brésil, le Canada, les États-Unis, sont les leaders du secteur. À l'image des moulins à eau d'autrefois, l'hydroélectricité ou production d'électricité par captage de l'eau est apparue au milieu du 19<sup>ème</sup> siècle. L'eau fait tourner une turbine qui entraîne un générateur électrique qui injecte les Kilowattheures sur le réseau. L'énergie hydraulique représente 19% à peu près de la production totale d'électricité dans le monde. C'est la source d'énergie renouvelable la plus utilisée. Cependant, tout le potentiel hydroélectrique mondial n'est pas encore exploité.

- **L'énergie solaire** est produite sous deux formes : le solaire photovoltaïque qui transforme le rayonnement lumineux du soleil en électricité grâce à des panneaux formés de cellules de semi-conducteurs et le solaire thermique qui capte la chaleur du soleil, qu'on utilise comme telle ou bien qu'on transforme en énergie mécanique, puis en électricité.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons, qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique. Ce courant continu de micropuissance calculé en watt crête (Wc) peut être transformé en courant alternatif grâce à un onduleur.

L'électricité produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau.

Un générateur solaire photovoltaïque est composé de modules photovoltaïques eux même composés de cellules photovoltaïques connectées entre elles, en série.

Les performances d'une installation photovoltaïque dépendent de l'orientation des panneaux solaires et des zones d'ensoleillement dans lesquelles on est.

L'avenir du photovoltaïque dans les pays industrialisés passe par son intégration sur les toits et les façades des maisons solaires.

L'énergie solaire thermique est une forme d'énergie solaire. Elle désigne l'utilisation de l'énergie thermique du rayonnement solaire dans le but d'échauffer un fluide (liquide ou gaz). L'énergie reçue par le fluide peut être ensuite utilisée directement (eau chaude sanitaire, chauffage, etc. ).

Les capteurs solaires thermiques et les chauffe-eau solaires connaissent une croissance spectaculaire en France. Crédit d'impôt et aides des collectivités locales sont particulièrement incitatives.

Le solaire thermodynamique ou CSP (Concentrated Solar Power) désigne l'ensemble des techniques visant à transformer l'énergie du rayonnement solaire en chaleur pour la convertir en énergie électrique, au moyen d'un cycle thermodynamique moteur couplé à une génératrice électrique (une turbine et un générateur, par exemple). Le solaire thermodynamique est principalement destiné aux pays à fort ensoleillement et permet, contrairement aux centrales photovoltaïques, de lisser plus facilement la production grâce à un stockage thermique tampon moins onéreux que les systèmes de batterie.

Une centrale solaire thermodynamique est constituée des éléments suivants :

- un dispositif optique de concentration du rayonnement solaire ;
- un système de production de chaleur composé d'un récepteur, d'un fluide caloporteur et, éventuellement, d'un moyen de stockage ;
- un sous-système de conversion de la chaleur en électricité.

- **L'éolien : énergie du vent** : Comme les moulins à vent du passé, les éoliennes génèrent des forces mécaniques ou électriques.

Avec une puissance mondiale installée de 200 GW en 2011, l'énergie éolienne est devenue un producteur majeur d'énergies renouvelables électriques. L'énergie éolienne est produite par des aérogénérateurs qui captent à travers leurs pales l'énergie cinétique du vent et entraînent elles mêmes un générateur produit de l'électricité d'origine renouvelable. Les plus hautes éoliennes atteignent 170 mètres, avec des rotors d'un diamètre de plus de 150 mètres.

- **Les différents types d'énergies marines** qu'on utilise proviennent de la force des vagues, des courants et des marées, des différences de température des océans et de certaines caractéristiques du couple eau salée/eau douce (énergie osmotique). Elles sont encore à un stade précoce de développement.

- **La biomasse** est constituée de toutes les matières organiques d'origine végétale (micro-algues incluses), animale, bactérienne ou fongique (champignons). Le bois a pendant des siècles été, via sa combustion, la principale source d'énergie avant d'être détrôné par le charbon puis le pétrole et le gaz. Mais il y a d'autres formes d'utilisation de la biomasse. La méthanisation produit du biogaz à partir de nos déchets ménagers ou agricoles. Le raffinage de la biomasse végétale permet la production de biocarburants.

On peut donc conclure qu'il y'a trois familles : Les bois énergie ou biomasse solide, le biogaz , les biocarburants

Ce sont tous des matériaux d'origine biologique employés comme combustibles pour la production de chaleur, d'électricité ou de carburants de façon générale.

- **La géothermie** : La géothermie est l'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol. Elle utilise la chaleur des aquifères du sous-sol, voire des roches sèches, captée à plus ou moins grande profondeur, pour alimenter des quartiers urbains, des bâtiments ou des usines,

ou encore produire de l'électricité via des centrales. Certains pays dont les conditions géologiques sont favorables l'utilisent, comme l'Islande ou les Philippines, deux pays volcaniques. L'utilisation des ressources géothermales se décompose en deux grandes familles : la production d'électricité et la production de chaleur. Le critère est la température. Ainsi, la géothermie est qualifiée de : « haute énergie » (plus de 150°C), « moyenne énergie » (90 à 150°C), « basse énergie » (30 à 90°C) et « très basse énergie » (moins de 30°C).

## 6) Situation énergétique mondiale

On définit la tonne d'équivalent pétrole (symbole tep) comme une unité de mesure de l'énergie. Elle est notamment utilisée dans l'industrie et l'économie. Elle vaut, selon les conventions : 41,868 GJ parfois arrondi à 42 GJ

Les stocks accumulés dans le monde en (combustibles fossiles et énergie nucléaire) estimées en 2018, à 1 120 milliards de tonnes d'équivalent pétrole (tep), soit 91 ans de production à l'allure actuelle. On a 50 ans pour le pétrole, 51 ans pour le gaz naturel, 132 ans pour le charbon, 90 ans pour l'uranium, avec les techniques actuelles.

La production mondiale d'énergie commercialisée est en augmentation de 18,5 % depuis 2008. On a 32,3 % pour le pétrole, 28,3 % pour le charbon, 24,0 % pour le gaz naturel, 4,4 % pour le nucléaire et 11,5 % pour les énergies renouvelables (hydroélectricité 6,8 %, éolien 2,1 %, biomasse et géothermie 1,0 %, solaire 0,95 %, agrocultures 0,6 %).

Toutes les énergies renouvelables font l'objet de recherches. Elles ne sont pas au même stade de développement.

La part des énergies renouvelables dans la production d'énergie mondiale, de façon générale est de 20 % à peu près.

Pour le photovoltaïque : il y'a eu la baisse du coût de production du kWh cette dernière décennie. L'Allemagne a excellé dans ce domaine. Mais à présent, les plus fortes capacités installées le sont aujourd'hui par la Chine et les États-Unis.

Pour l'éolien le coût de l'électricité produite reste encore élevé.

Pour la géothermie, de nouvelles techniques ont vu le jour.

D'autres en sont encore au stade d'expérimentation ou de recherches, comme les biocarburants de troisième génération fabriqués à partir des micro-algues ou les applications de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique.

L'énergie hydraulique, produite depuis longtemps assure la production de quantités importantes d'électricité.

Les énergies renouvelables représentent aujourd'hui une très faible part du mix électrique mondial. Leur progression est forte mais il faudra encore beaucoup de temps pour qu'elles rivalisent en quantité avec les énergies traditionnelles, notamment fossiles.

Le tableau ci-dessous présente la production énergétique mondiale d'après la source d'énergie.

Production énergétique mondiale commercialisée selon la source d'énergie

Énergie	Production en 2008	Production en 2018	Variation 2018/2008	Production 2018 en Mtep	Part en 2018
Pétrole <sup>b 1</sup>	83,07 Mbbbl/j	94,72 Mbbbl/j	+14 %	4 474	32,1 %
Charbon <sup>b 9</sup>	6 951 Mt	8 013 Mt	+15,3 %	3 917	28,1 %
Gaz naturel <sup>b 2</sup>	3 030 Gm <sup>3</sup>	3 868 Gm <sup>3</sup>	+28 %	3 326	23,9 %
Hydraulique <sup>b 10</sup>	3 256 TWh	4 193 TWh	+29 %	949	6,8 %
Nucléaire <sup>b 11</sup>	2 738 TWh	2 701 TWh	-1 %	611	4,4 %
Éolien <sup>b 6</sup>	221 TWh	1 270 TWh	+476 %	287	2,1 %
Solaire photovoltaïque <sup>b 7</sup>	12,6 TWh	585 TWh	× 46	132	0,9 %
Géothermie, Biomasse, etc. <sup>b 12</sup>	315 TWh	626 TWh	+99 %	142	1,0 %
Biocarburants <sup>b 13</sup>	924 kbblep/j <sup>n 2</sup>	1 788 kbblep/j	+94 %	95	0,7 %
<b>Total énergie primaire<sup>b 14</sup></b>	<b>11 705 Mtep</b>	<b>13 865 Mtep</b>	<b>+18,5 %</b>	<b>13 865</b>	<b>100,0 %</b>

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

### Sites consultés en avril 2020

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Ressources\\_et\\_consommation\\_%C3%A9nerg%C3%A9tiques\\_mondiales](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ressources_et_consommation_%C3%A9nerg%C3%A9tiques_mondiales)

[https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-pt-vue/lenergie\\_sous\\_toutes\\_ses\\_formes\\_-\\_definitions.pdf](https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-pt-vue/lenergie_sous_toutes_ses_formes_-_definitions.pdf)

<https://quelfutur.org/Un-monde-100-energies-renouvelables>

<https://www.mediaterre.org/actu,20190625125916,1.html>

<https://www.mediaterre.org/actu,20200407161838,1.html>

<http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/inventaire/Fr/introduction.asp>

<https://quelfutur.org/Classification-des-energies>

<https://quelfutur.org/Un-monde-100-energies-renouvelables>

<https://quelfutur.org/+Croissance-des-energies-renouvelables+>

<https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/les-energies-renouvelables>

<http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/inventaire/Fr/sommaire.asp#chapitre3>

<http://www.energies-renouvelables.org/>

<https://www.ademe.fr/expertises/energies-renouvelables-enr-production-reseaux-stockage/passer-a-laction/produire-lelectricite/solaire-thermodynamique>

[https://pm22100.net/01\\_PDF\\_THEMES/99\\_THEMES/02\\_NRJ/S\\_NRJ\\_02\\_WIKI\\_ressources\\_mondiales.pdf](https://pm22100.net/01_PDF_THEMES/99_THEMES/02_NRJ/S_NRJ_02_WIKI_ressources_mondiales.pdf)

<https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/les-differentes-formes-d-energie>

### Livres

Marek Wróbel, Marcin Jewiarz, Andrzej Szlęk, Renewable Energy Sources: Engineering, Technology, Innovation: ICORES 2018, Série: Springer Proceedings in Energy, Springer International Publishing, 2020.

Anthony N. Penna, The History of Energy Flows: From Human Labor to Renewable Power, Routledge, 2020.

Anne Labouret, Pascal Cumunel, Jean-Paul Braun, Benjamin Faraggi, Cellules solaires 5ème édition, Les bases de l'énergie photovoltaïque, Dunod 2010.

## CHAPITRE 2 : LA SOURCE SOLAIRE

### 1) Fondamentaux sur le rayonnement

Une onde électromagnétique est composée d'un champ électrique et d'un champ magnétique. Ces deux champs oscillent perpendiculairement entre eux et perpendiculairement à l'axe de propagation de l'onde (Fig. 1). La longueur d'onde est définie par la distance entre 2 maxima de la sinusoïde, elle est liée à la période T par l'équation :

$$c = \frac{\lambda}{T}$$

avec c : la vitesse de propagation de l'onde. La fréquence f est l'inverse de la période. Elle est utilisée pour décrire les ondes électromagnétiques et les classer.

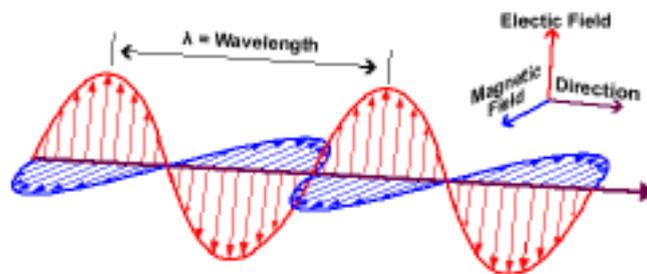


Figure 1 : Représentation d'une onde Electromagnétique

### 2) Le soleil

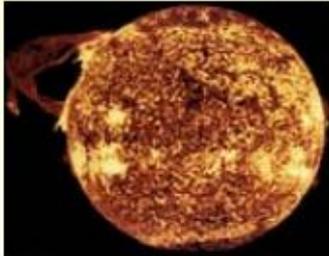
Le soleil est un énorme réacteur thermonucléaire, où l'hydrogène fusionne en hélium. L'énergie qu'il envoie dans toutes les directions est à la fois énorme (environ 10 000 fois les besoins terrestres), mais assez diluée. La puissance maximale reçue à l'extérieur de l'atmosphère sur une surface d'un mètre carré perpendiculaire à la direction du rayonnement est à peu près 1350 W. Cette valeur est légèrement supérieure en hiver car la distance Terre-Soleil est minimale en cette période.

Pour récupérer une quantité d'énergie importante, il faut donc nécessairement augmenter la surface qui intercepte le flux solaire. Concentrer le rayonnement solaire n'augmente pas la puissance ou l'énergie récupérés, mais seulement le niveau de température pouvant être atteint. Source indirecte des énergies utilisées actuellement, ce n'est qu'au XVII<sup>ème</sup> siècle que l'on songea à utiliser directement le Soleil à des fins techniques. Lavoisier a, employé une lentille convergente de 1,30 m de diamètre pour obtenir la fusion d'un morceau de fer placé à son foyer. Et ce n'est qu'en 1954 que les premières piles solaires produisant de l'électricité firent leur apparition, grâce aux travaux de Bell Laboratories aux États-Unis.

**Diamètre** : 1 400 000 km (environ 1 300 000 fois plus gros que la terre)

**Distance Terre-Soleil** : 150 000 000 km (ou 8 minutes-lumière)

**Au centre : La Fusion Nucléaire**  
 $4 \text{ } ^1_1\text{H} \rightarrow \text{ } ^4_2\text{He} + 2\text{e}^+ + 2 \text{ n e} + 2,5 \cdot 10^{12} \text{ J/mole He}$



Consommation : **576 millions de tonnes** d'hydrogène à la seconde

Le Soleil rayonne comme un corps noir à **5 800 K**

A l'extérieur de l'atmosphère terrestre, une surface de 1m<sup>2</sup> perpendiculaire au rayonnement reçoit **1 353 W**. C'est la **constante solaire**

Énergie reçue sur terre chaque année : **8 000 à 10 000 fois** la consommation énergétique de l'homme

Espérance de vie : environ **5 milliards d'années**.

### 3) Le rayonnement solaire

C'est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil. Il est composé de toute la gamme des rayonnements, de l'ultraviolet lointain comme les rayons gamma aux ondes radio en passant par la lumière visible. Le rayonnement solaire contient aussi des rayons cosmiques de particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrêmement élevées. Une partie de ce rayonnement est filtrée par la couche d'ozone avant d'atteindre la troposphère. Via la photosynthèse, il est nécessaire à la plupart des espèces qui vivent sur la Terre. L'énergie solaire qui arrive sur terre est disponible sous forme de rayonnement électromagnétique émis depuis le soleil. La puissance transmise par ce rayonnement varie avec la longueur d'onde du rayonnement. La plus grosse quantité d'énergie est apportée par les longueurs d'onde visibles (lumière blanche qui est la superposition de toutes les couleurs).

Il y a une différence entre le rayonnement arrivant au sommet de l'atmosphère et le rayonnement arrivant au niveau du sol. Cette différence est liée aux bandes d'absorption des gaz de l'atmosphère.

En effet, les gaz ont des facteurs d'absorption et de transmission qui dépendent beaucoup de la fréquence des ondes. Certaines longueurs d'onde sont absorbées partiellement ou totalement par les particules de l'atmosphère. Les molécules d'ozone absorbent une partie des ultra violet. La vapeur d'eau absorbe une grande partie de la partie des bandes de l'infrarouge thermique reçu. Il en résulte que la puissance disponible sur un mètre carré normal au rayonnement est de l'ordre de 1000 W par temps ensoleillé alors qu'elle est de l'ordre de 1350 W hors atmosphère. Ce phénomène explique une partie de la variabilité du rayonnement puisque la composition atmosphérique est variable dans le temps et dans l'espace.

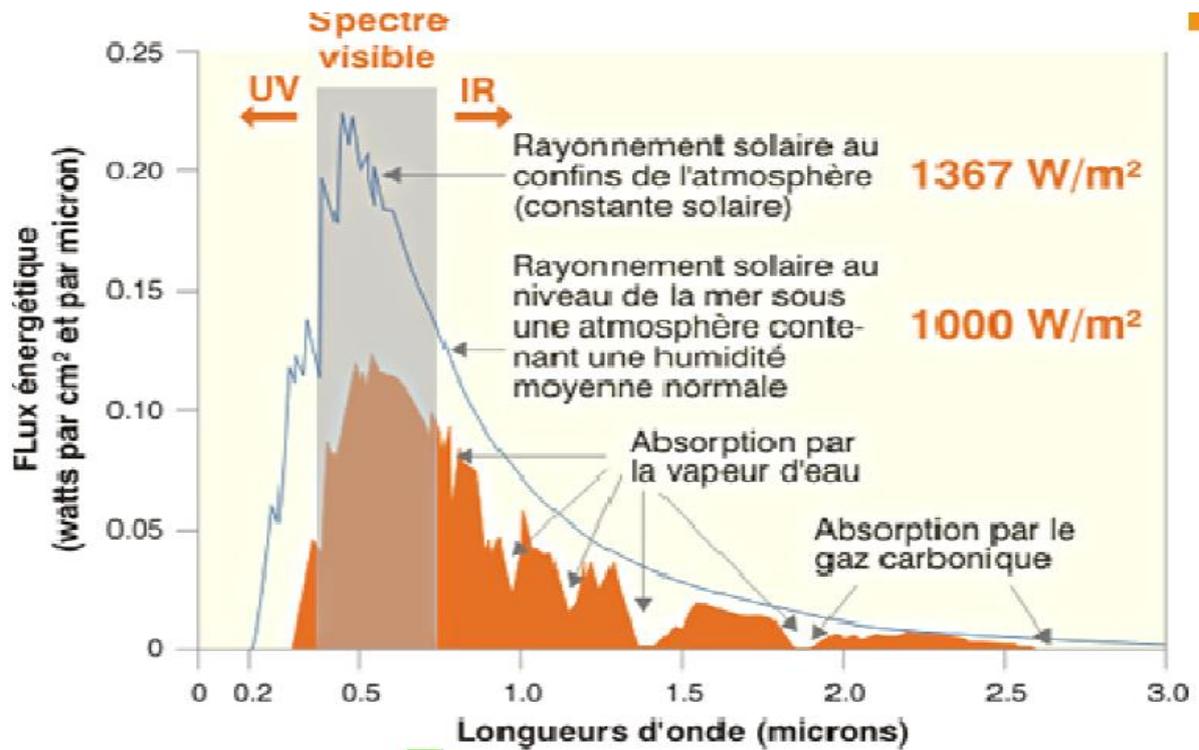


Figure 2 : le spectre solaire

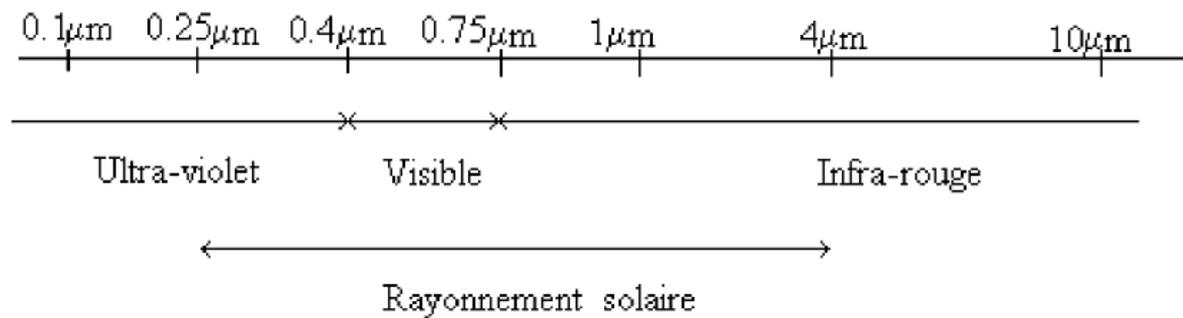


Figure 3 : Plage du rayonnement

La figure ci-dessous montre les composantes du rayonnement solaire.

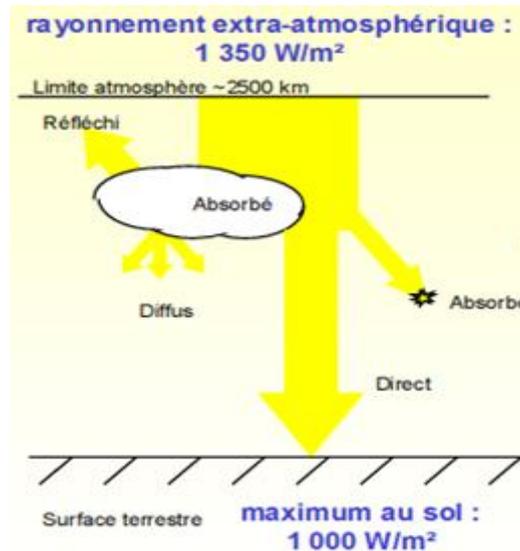


Figure 4 : divers rayonnements

Lors de la traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire subit diverses déperditions du fait de son absorption par les gaz atmosphériques et la vapeur d'eau; Donc, on distingue trois composantes :

### 1. Rayonnement direct

Le rayonnement direct est le rayonnement reçu directement de soleil sans diffusion par l'atmosphère.

### 2. Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus est le rayonnement solaire provenant de toute la voûte Céleste . Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère , les molécules d'air, les gouttelettes d'eau, les poussières et à sa réflexion par les nuages.

### 3. Rayonnement réfléchi

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol. Ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lieu appelé Albédo . L'albédo est le pouvoir réfléchissant d'une surface, c'est-à-dire le rapport de l'énergie lumineuse réfléchi à l'énergie lumineuse incidente donc

$$(0 \leq \varepsilon \leq 1)$$

C'est ainsi, le pourcentage d'énergie solaire réfléchi vers l'espace par la terre et l'atmosphère par rapport à la quantité d'énergie solaire reçue par la terre.

L'atmosphère réfléchit  $87 \text{ W.m}^{-2}$  et la surface terrestre réfléchit vers l'espace  $\text{W.m}^{-2}$

Ce qui représente un total de  $108 \text{ W.m}^{-2}$  soit 31 % de l'énergie reçue. L'albédo terrestre est donc pris à 0.3. Cependant tous les corps n'ont pas le même pouvoir réflecteur; En effet, les corps noirs (qui sont des corps capables d'absorber toutes les ondes incidentes à leur surface), la neige, les nuages, les sols dépourvus de végétation .sont les meilleurs réflecteurs.

### 4. Rayonnement global

Un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct, diffus et réfléchi. Donc, le rayonnement global

est la contribution de diverses composantes du rayonnement solaire. La figure ci-dessous montre ces divers rayonnements.

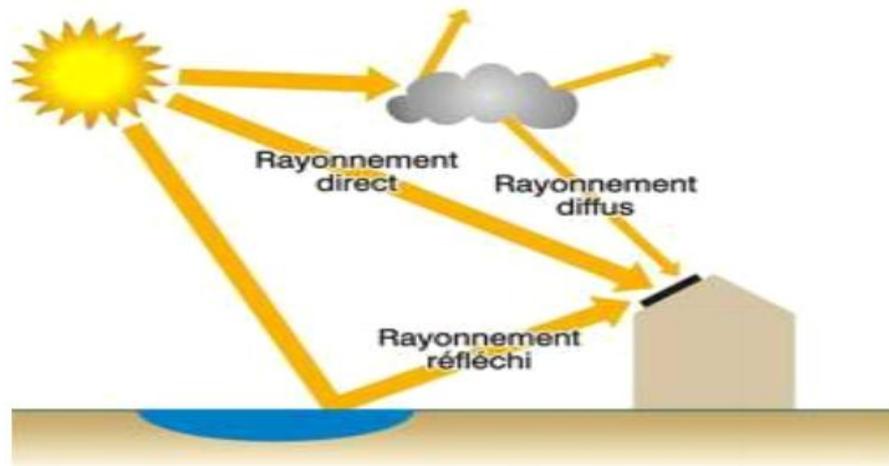


Figure 5: composantes du rayonnement global

#### 4) Rayonnement solaire et atmosphère

La distance de la Terre au Soleil est d'environ 150 millions de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300 000 km/s . Les rayons du soleil mettent donc environ 8 min à nous parvenir.

La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au Soleil. Sa valeur est communément prise égale à  $1\,360\text{ W/m}^2$ . Elle varie de quelques % dans l'année à cause des légères variations de la distance Terre-soleil.

Le watt par  $\text{m}^2$  ( $\text{W/m}^2$ ) est l'unité la plus utilisée pour quantifier le rayonnement solaire. C'est un flux, une puissance par unité de surface.  $1\text{ W/m}^2$  est aussi égal à 1 Joule par seconde et par  $\text{m}^2$  puisque  $1\text{ W} = 1\text{ J/s}$ . L'énergie est ici électromagnétique.

Lors de la traversée de l'atmosphère, ce rayonnement de  $1\,360\text{ W/m}^2$  subit des déperditions, du fait de son absorption partielle par les gaz atmosphériques et la vapeur d'eau comme entrevu. Ainsi, le flux reçu sur la terre est inférieur au flux « initial » et dépend de l'angle d'incidence, et donc de l'épaisseur d'atmosphère traversée.

#### 5) Repérage du soleil

Pour repérer la position du soleil dans le ciel, on utilise:

$h$  : c'est entre la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal (voir figure ci dessous)

L'azimut  $a$  : angle entre cette projection et la direction du Sud :  $a$  est compté positivement vers l'Ouest et négativement vers l'Est (voir figure ci dessous).

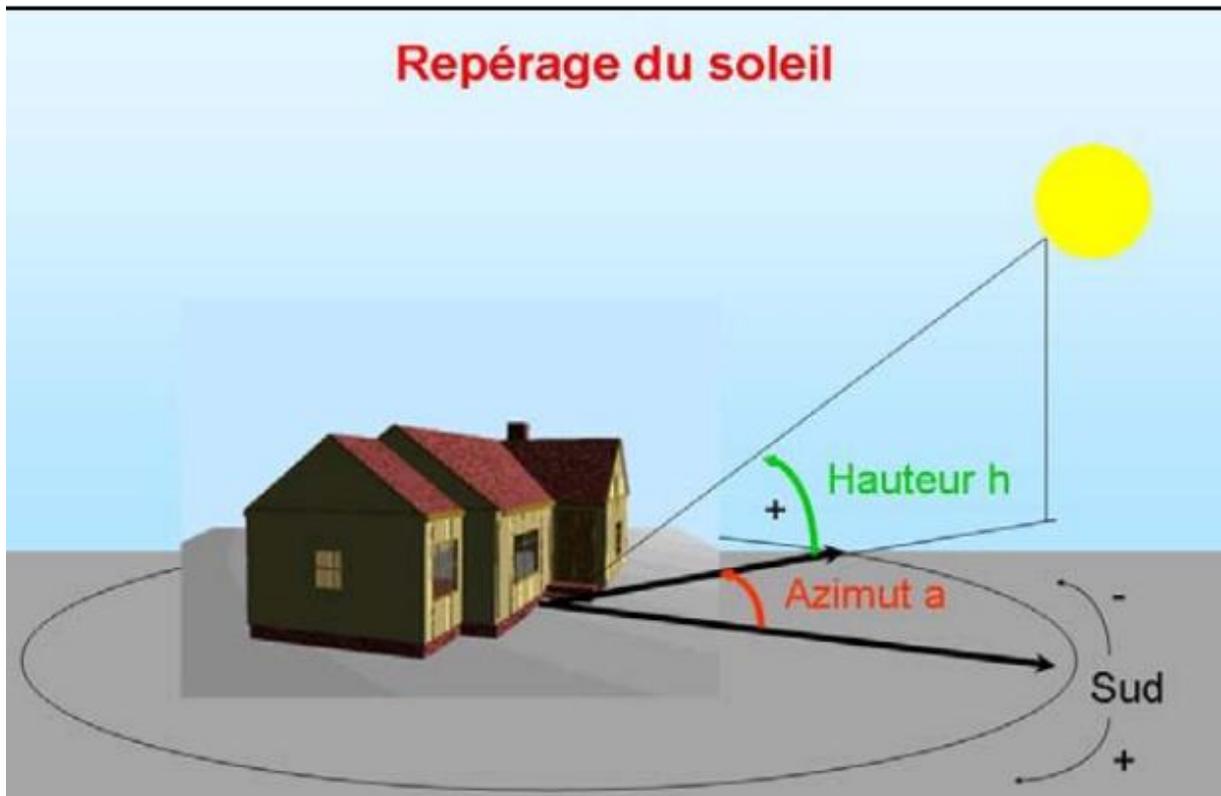


Figure 6: repérage du soleil

L'énergie du rayonnement solaire correspond à la quantité d'énergie reçue sur une surface donnée pendant une durée définie exprimée en  $\text{kWh/m}^2$  (an, jour, mois)

Le rayonnement solaire dépend fortement de nombreux facteurs :

La latitude du site

La saison

L'heure de la journée

Les conditions météorologiques et atmosphériques .

Toutefois, d'une année à une autre, l'énergie solaire totale reste sensiblement constante.

## 6) Air Mass

On appelle  $m$  (masse atmosphérique), ou Air Mass, la distance calculée en multiples de la distance parcourue si le soleil était à la verticale du lieu.

Sur notre figure ci dessous,  $m = 1$  si le soleil entre dans l'atmosphère au point A, et  $m = 2$  s'il y entre en M avec :

$$m = 1/\sin(h)$$

Quant aux conditions normalisées de test des panneaux solaires, elles sont caractérisées par un rayonnement instantané de  $1\,000\text{ W/m}^2$ , un spectre solaire AM 1,5 et  $25\text{ °C}$  de température ambiante. Ces conditions sont appelées STC (Standard Test Conditions). Il y a une différence entre le rayonnement direct, les rayons du soleil comme précité qui nous parviennent en ligne droite, et le rayonnement diffus, les rayons qui subissent de multiples réflexions et nous parviennent alors de toutes les directions à travers les nuages. Le rayonnement solaire est

entièrement diffus lorsqu'on ne peut plus voir où se trouve le soleil. Quant au rayonnement global, c'est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus.

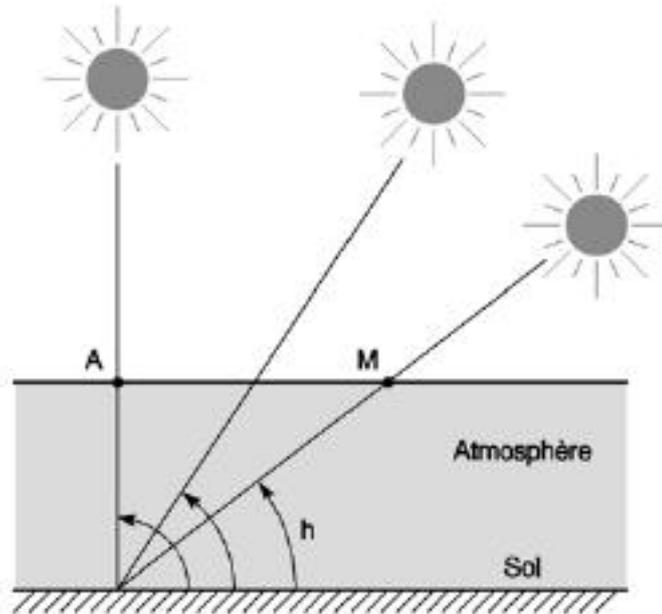


Figure 7 : Notion d'AIR MASS

**7) Le gisement solaire** est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire.

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme.

:

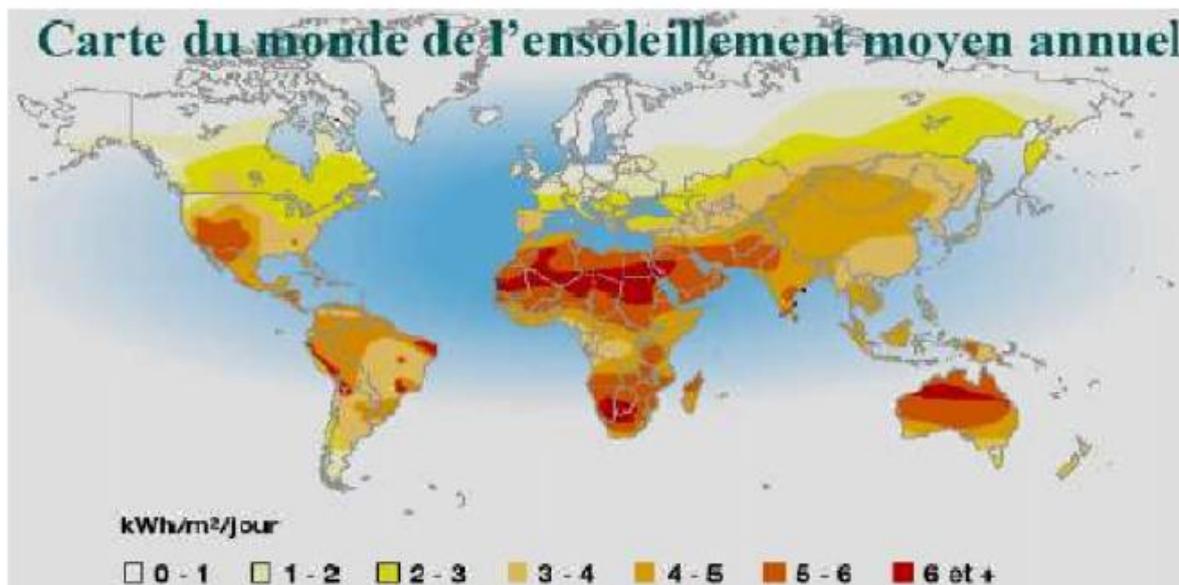


Figure 8 : Ensoleillement moyen annuel

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau ci dessous selon l'ensoleillement reçu annuellement:

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

Tableau 1: Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques

<b>Régions</b>	<b>Régions côtières</b>	<b>Hauts plateaux</b>	<b>sahara</b>
<b>Superficie (%)</b>	4	10	86
<b>Durée d'ensoleillement (h/an)</b>	2650	300	3500
<b>Energie moyenne recue (KWh/m<sup>2</sup>/an)</b>	1700	1900	2650

Tableau 2: La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien

En figure ci dessous est représentée la carte du gisement solaire Algérien de l'année 2010.

L'Algérie est un pays qui possède une richesse d'ensoleillement.

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale.

La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie.

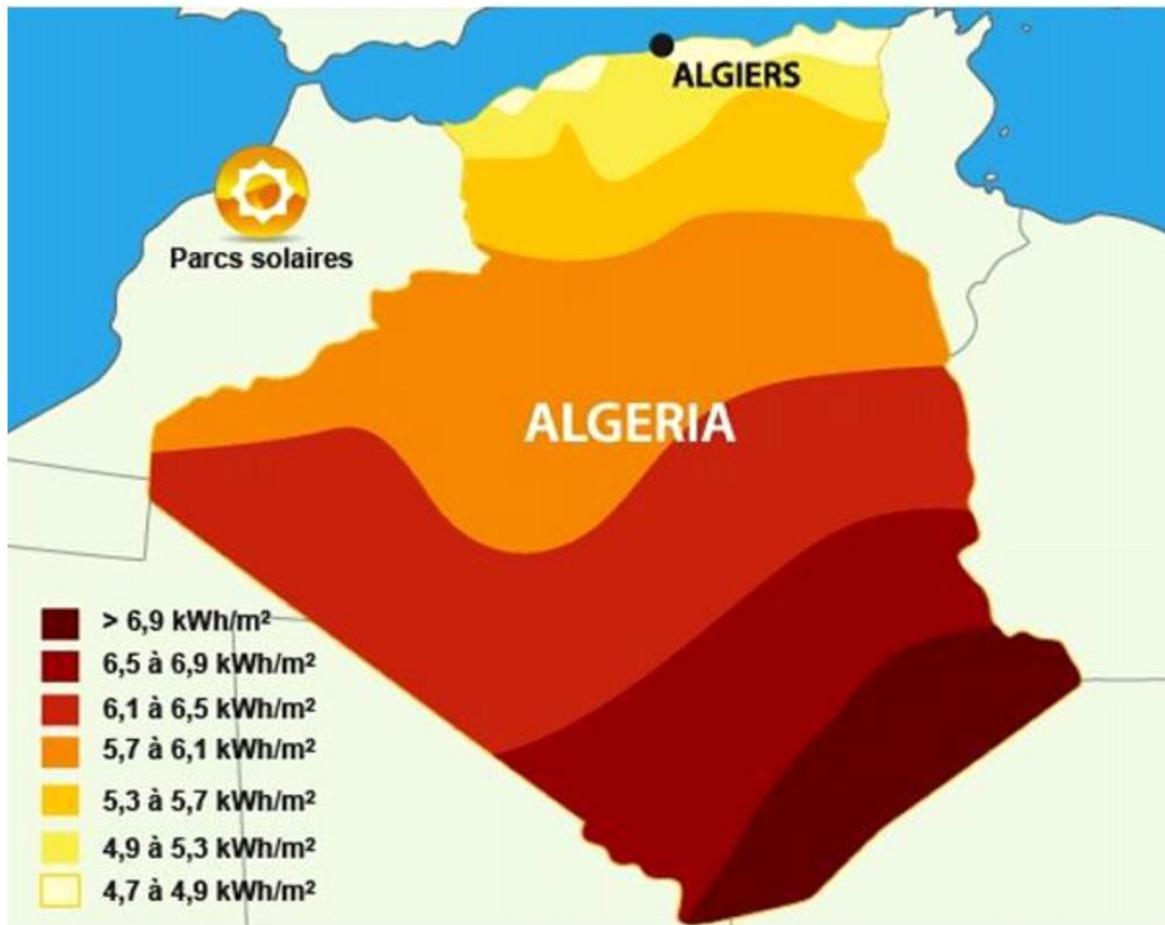


Figure 9: carte du gisement solaire de l'Algérie

L'Algérie dispose du potentiel solaire le plus élevé de la région du MENA (en anglais Middle East and North Africa) et l'un des plus importants au monde.

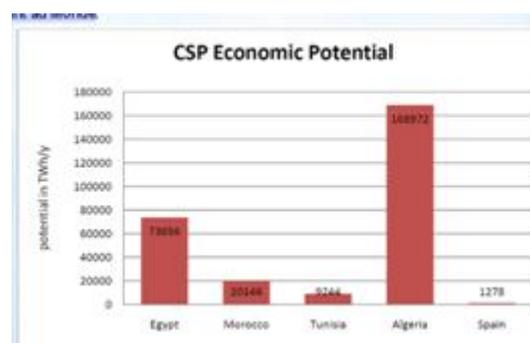


Figure 10: Potentiel à MENA

**8) L'énergie solaire :** L'énergie solaire est la fraction de l'énergie électromagnétique provenant du soleil, traversant l'atmosphère qui en absorbe une partie, et parvenant à la surface de la Terre. que l'on trouve à la surface de la terre sous forme de lumière et de chaleur. Elle peut être exploitée au moyen de capteurs solaires thermiques pour produire de la chaleur (eau chaude et chauffage d'appoint), au moyen de concentrateurs pour activer

des processus chimiques et pour produire de l'électricité, et au moyen d'installations photovoltaïques pour générer du courant.

On y distingue 3 types :

### **1 Energie solaire thermique**

Le principe de l'énergie solaire thermique consiste à produire de la chaleur au moyen de capteurs solaires. Le soleil chauffe la maison et/ou les eaux sanitaires, la piscine, etc. L'énergie solaire thermique diffère du solaire photovoltaïque, puisqu'il s'agit de produire du chauffage et non de l'électricité. Elle diffère également de l'énergie géothermique, laquelle permet également le chauffage, mais en puisant son énergie non pas dans le rayonnement du soleil, mais dans le sol.

### **2 Energie solaire thermodynamique**

Une centrale solaire thermodynamique à concentration est une centrale qui concentre les rayons du soleil à l'aide de miroirs afin de chauffer un fluide caloporteur qui permet en général de produire de l'électricité. Ce type de centrale permet, en stockant ce fluide dans un réservoir, de prolonger le fonctionnement de la centrale plusieurs heures au-delà du coucher du soleil.

### **3 Le solaire photovoltaïque**

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil, en électricité, au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons, (composants de la lumière) qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique. L'électricité produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau.

## **REFERENCES**

- [https://www.academia.edu/7510504/Chapitre\\_I\\_Le\\_gisement\\_solaire\\_I.1-Introduction\\_L](https://www.academia.edu/7510504/Chapitre_I_Le_gisement_solaire_I.1-Introduction_L)
- <https://bu.umc.edu.dz/theses/physique/KHA5312.pdf>
- <https://www.cythelia.fr/nos-documents/>
- [https://www.cythelia.fr/images/file/Convertisseurs\\_photovoltaiques-Alain-Ricaud\\_Sept%202011-Master%20ENSMP.pdf](https://www.cythelia.fr/images/file/Convertisseurs_photovoltaiques-Alain-Ricaud_Sept%202011-Master%20ENSMP.pdf)
- <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/climatologie-rayonnement-solaire-13785/>
- [https://fr.wikipedia.org/wiki/Rayonnement\\_solaire](https://fr.wikipedia.org/wiki/Rayonnement_solaire)
- [https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie\\_solaire](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire)
- Thomas Letz, le solaire thermique, INES éducation, école d'architecture de Grenoble Décembre 2007- Janvier 2008.
- [https://energypedia.info/images/c/c1/Le\\_Gisement\\_Solaire.pdf](https://energypedia.info/images/c/c1/Le_Gisement_Solaire.pdf)
- <http://www.bfe.admin.ch/themen/00490/00497/index.html?lang=fr>
- <http://www.solaire-thermique.fr/>
- [https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale\\_solaire\\_thermodynamique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_solaire_thermodynamique)
- [http://www.energies-renouvelables.org/solaire\\_photovoltaïque.asp](http://www.energies-renouvelables.org/solaire_photovoltaïque.asp)
- <http://www.consoglobe.com/solaire-photovoltaïque-thermique-2682-cg>
- <https://docplayer.fr/5167469-Said-noureddine-cder-nsaid-cder-dz.html>
- <http://pascal.sca.uqam.ca/~sca5002/Presentations/3.Radiation/>
- <https://fr.calameo.com/read/004226489b32849fdb77>
- [https://www.cythelia.fr/images/file/Gisement-solaire\\_Alain%20Ricaud\\_Jan-2011.pdf](https://www.cythelia.fr/images/file/Gisement-solaire_Alain%20Ricaud_Jan-2011.pdf)

**Matière : découverte Energies renouvelables : le solaire photovoltaïque ESE M1  
USTOMB Département : ELN AN 2020 CHAPITRE 2 : LA SOURCE SOLAIRE**

---

<https://www.youtube.com/watch?v=nuCwfRC2j7E>

Sites consultés en avril 2020.

Romain Dambreville, Préviation du rayonnement solaire global par télédétection pour la gestion de la production d'énergie photovoltaïque. Traitement du signal et de l'image, Université de Grenoble, 2014.

Rabah Fouzia, Elketob Cherifa, système à source photovoltaïque, Master en ELN département d'électronique, USTOMB, 2016/2017.

Tomislav Pavlovic, Green Energy And Technology  
The Sun And Photovoltaic Technologies, Springer 2020.

Anne Labouret, Pascal Cumunel, Jean-Paul Braun, Benjamin Faraggi, Cellules solaires, 5ème édition, les bases de l'énergie photovoltaïque Dunod, 2010.

Deren Yang, Handbook of Photovoltaic Silicon, Springer Berlin Heidelberg, 2019.

## CHAPITRE 3 : LA SOURCE PHOTOVOLTAÏQUE

### 1) Introduction

Le photovoltaïque nous offre la capacité à générer de l'électricité d'une manière propre, verte, "calme" et fiable. Les systèmes photovoltaïques comportent des cellules photovoltaïques : des dispositifs pour convertir l'énergie lumineuse directement en électricité.

Le processus photovoltaïque produit donc de l'électricité directement de la lumière du soleil.

### 2) Conversion photovoltaïque

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet (0,2 micron) à l'infrarouge lointain (2,5 microns), avec une majorité dans le visible (0,3 micron violet à 0,8 micron rouge) autour d'un pic à 0,45 micron. L'énergie totale portée par ce rayonnement est de près de 1 360 W/m<sup>2</sup> dans l'espace, au voisinage de la Terre, et de 1 000 W/m<sup>2</sup> au niveau de la Terre, du fait de l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein a découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules, les photons, l'énergie d'un photon étant donnée par la relation :

$$E = hc / \lambda$$

où h est la constante de Max Planck (1858- 1947), c la vitesse de la lumière et  $\lambda$  la longueur d'onde. Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Cette découverte valut à Albert Einstein (1879-1955) le prix Nobel en 1905. Une façon commode d'exprimer cette énergie est justement son analogue électrique :

$$E = 1,24 / \lambda$$

Où  $\lambda$  est exprimé en micron, E s'exprime alors en électronvolt (eV).

Le terme « photovoltaïque » souvent abrégé par « PV », a été formé à partir des mots « photo » un mot grec signifiant lumière et « Volta » le nom du physicien italien Alessandro Volta qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité. Donc, la conversion photovoltaïque est la transformation de l'énergie du photon en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière. Lorsqu'un photon est absorbé, il éjecte un électron d'un niveau d'énergie inférieur, vers un niveau d'énergie plus élevé, créant ainsi une paire électron-trou, de même énergie électrique. Généralement, cette paire électron-trou revient à l'équilibre en transformant son énergie électrique en énergie thermique : le matériau chauffe au soleil. Récupérer toute ou partie de cette énergie sous forme électrique est justement l'objectif de la conversion photovoltaïque.

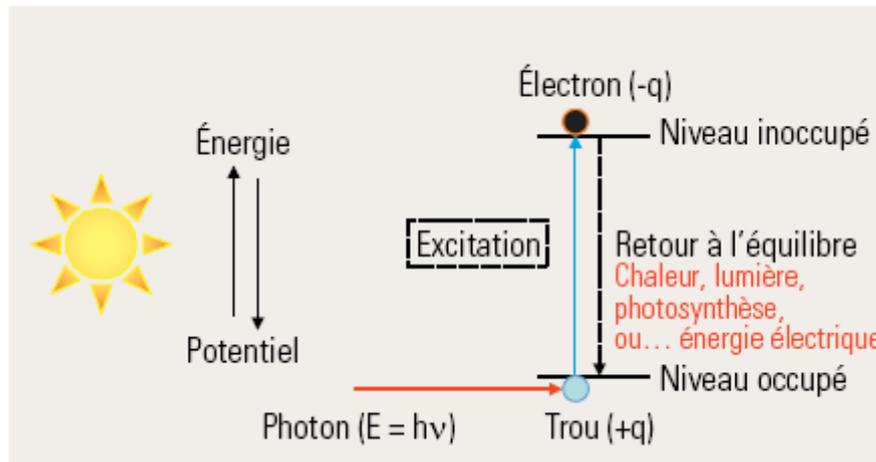


FIGURE 1 : Processus d'adsorption de la lumière dans un matériau.

Cette conversion photovoltaïque se fait grâce à une pièce maîtresse qui est la cellule solaire photovoltaïque. Avec l'apparition de cette nouvelle technologie c'est le silicium qui a été utilisé comme semi-conducteur car il se trouve en grande quantité dans la silice (sable). Nous définirons un semi-conducteur comme: "un matériau où les électrons périphériques se répartissent à une température supérieure au zéro absolu, entre deux bandes d'énergie au moins, séparées par un intervalle d'énergie (gap), relativement faible (de l'ordre de 1 eV)".

La transformation de l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trous dans le matériau semi-conducteur.
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

### 3) Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque, ou cellule solaire, est un composant électronique qui, exposé à la lumière, produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. La puissance obtenue est proportionnelle à la puissance lumineuse incidente et dépend du rendement de la cellule. Celle-ci délivre une tension continue et un courant la traverse dès qu'elle est connectée à une charge électrique.

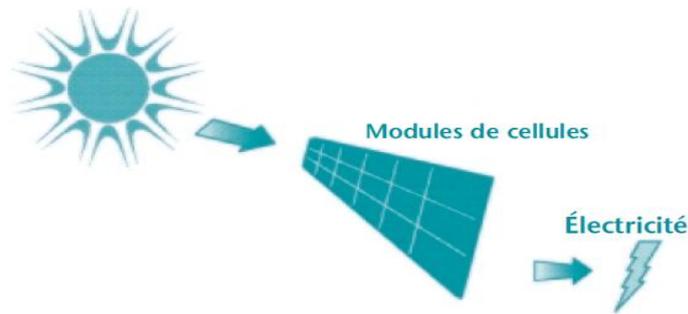


FIGURE 2: Conversion photovoltaïque

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium : une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes: positive et négative de la cellule. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs (électron, trou). La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert  $V_{co}$ . Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées. Il est appelé courant de court-circuit  $I_{cc}$ .

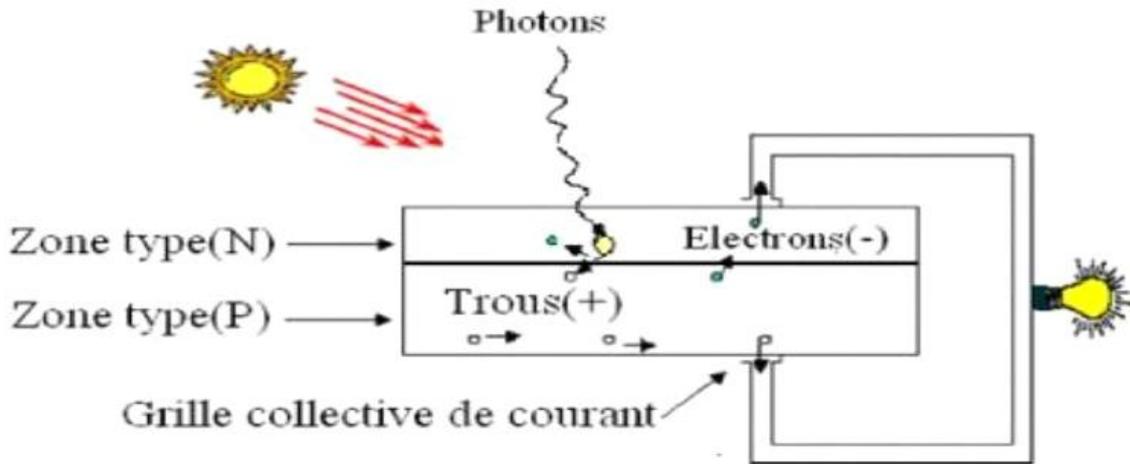


FIGURE 3 : Présentation schématique d'une cellule solaire

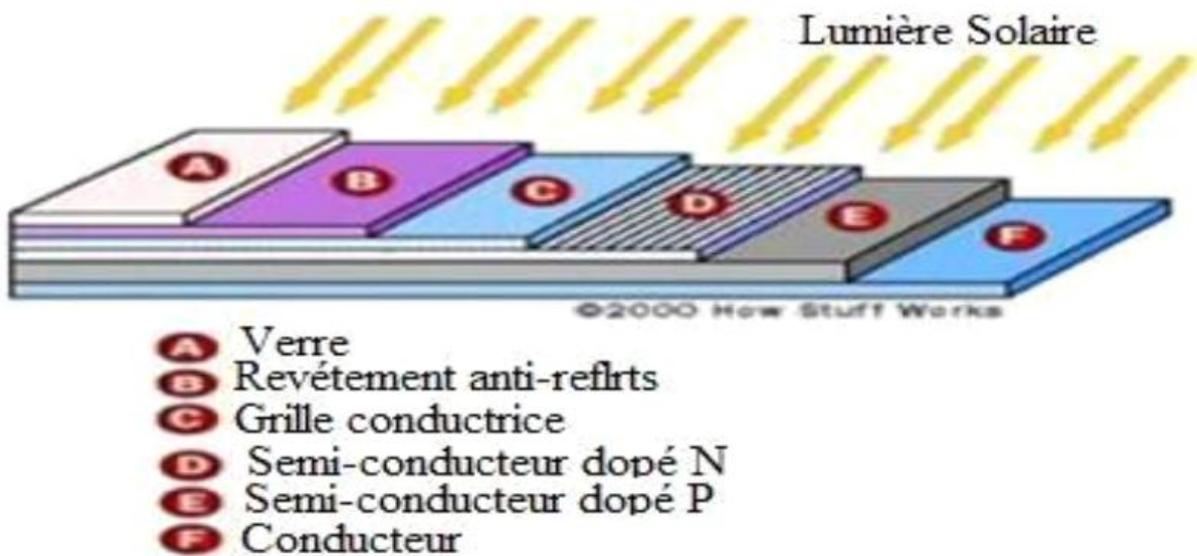


FIGURE 4 : Structure basique d'une cellule solaire

#### 4) Le rendement de conversion.

La puissance de sortie d'une cellule PV est nulle en court-circuit et en circuit ouvert. Elle passe par un maximum quand on parcourt la caractéristique courant-tension I-V.

On appelle rendement de conversion  $\eta$  le rapport de la puissance fournit par le module ou groupement des modules sur la puissance incidente (d'éclairement). Il exprime selon l'équation suivante :

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}}$$

$P_{in}$  : est la puissance incidente (d'éclairement). Elle est égale au produit de l'ensoleillement et de la surface totale des cellules photovoltaïques.

$P_{max}$  : est la puissance maximale fournie.

### 5) Facteur de forme FF

Le facteur de forme représente l'efficacité du module ou encore, il peut nous renseigner sur le vieillissement du module.

Le facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage, ou fill factor, est défini par :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{cc}} = V_{max} \cdot \frac{I_{max}}{V_{oc} \cdot I_{cc}}$$

### REFERENCES

Daniel Lincot , La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire, d é c o u v e r t e n ° 3 4 4 - 3 4 5, j a n v i e r - f é v r i e r 2 0 0 7.

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule\\_photovolta%C3%AFque](https://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_photovolta%C3%AFque)

<https://www.batteriesquebec.com/uploads/OrtBIsGx/Guidephotovoltaquedelacheteur.pdf>

[https://www.researchgate.net/figure/Presentation-schematique-dune-cellule-solaire-5\\_fig2\\_329980090](https://www.researchgate.net/figure/Presentation-schematique-dune-cellule-solaire-5_fig2_329980090).

[https://www.researchgate.net/figure/Structure-basique-dune-cellule-solaire-7\\_fig3\\_329980090](https://www.researchgate.net/figure/Structure-basique-dune-cellule-solaire-7_fig3_329980090)

Sites consultés en mai 2020.

Tabani Hind & Attouche Sana, contrôle dans un système à énergie propre, Master en ELN, département d'ELN , USTOMB, 2019.

Rabah Fouzia, Elketob Cherifa, système à source photovoltaïque, Master en ELN département d'électronique, USTOMB, 2016/2017.

Tomislav Pavlovic The Sun And Photovoltaic Technologies, Wiley-Blackwell, 2020.

Alain Ricaud, Convertisseurs photovoltaïques, Sept 2010.

Deren Yang, Handbook of Photovoltaic Silicon, Springer Berlin Heidelberg, 2019.

## **PARTIE 2**

### **Technologie des cellules solaires**

Il existe plusieurs types de cellules solaires. Le rendement utilisé est celui de conversion entrevu. On citera :

- **Cellule en silicium mono cristallin**

Le rendement de ce matériau photovoltaïque (15 % à 17 %) est légèrement supérieur à celui du silicium polycristallin. En revanche, sa fabrication est plus délicate donc plus coûteuse.

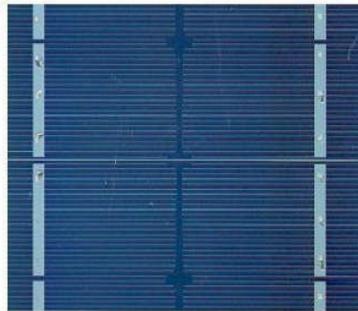


Figure 5: Cellule au Silicium mono cristallin.

- **Cellule en silicium polycristallin**

Il s'agit du matériau photovoltaïque le plus utilisé (à lui seul plus de 50% du marché mondial). Il offre un bon rendement (de 12% à 14 %).



Figure 6: Cellule en silicium polycristallin.

- **Cellule en silicium amorphe**

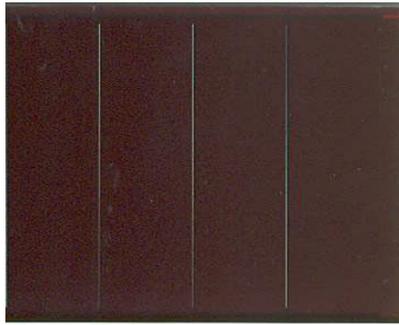


Figure 7: Cellule en silicium amorphe

La cellule est gris très foncé ou marron. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites << solaires >>. Le rendement de ce matériau photovoltaïque est bien inférieur (6%). Son coût est faible.

- **Cellule tandem**

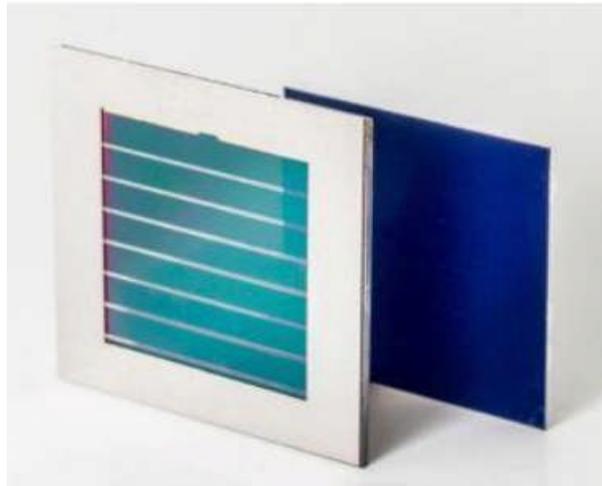


Figure 8: Cellule tandem

C'est l'empilement monolithique de deux cellules simples. En combinant deux cellules (couche mince de silicium amorphe sur silicium cristallin par exemple) absorbant dans des domaines spectraux connexes, on améliore le rendement théorique par rapport à des cellules simples distinctes, qu'elles soient amorphes, cristallines ou microcristallines.

Par ces avantages, elle a un rendement de 12% et une sensibilité élevée sur une large plage de longueurs d'onde.

- **Cellule CIGS**

La technique consiste à déposer un matériau semi-conducteur à base de cuivre, d'indium, de gallium et sélénium sur un support. Le rendement s'établit respectivement à 15 et 17%.

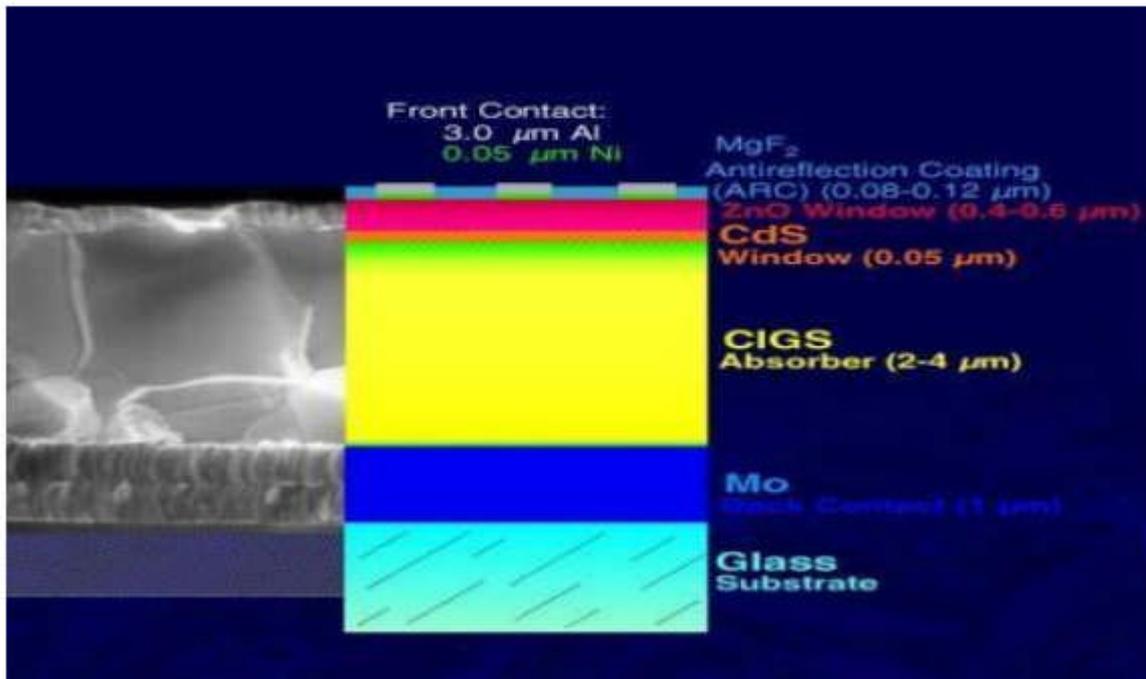


Figure 9: Cellule CIGS

- **Cellule organique**

Les cellules photovoltaïques organiques sont des cellules photovoltaïques dont au moins la couche active est constituée de molécules organiques. Elle a un rendement minimum de 15% .

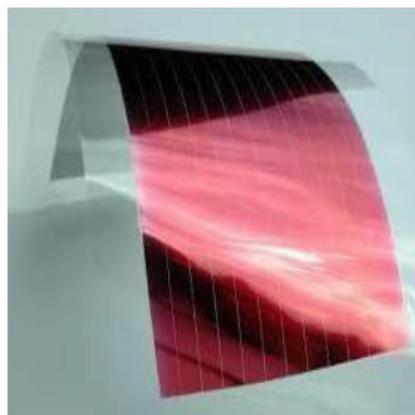


Figure 10: Cellule organique.

- **Cellule multi-jonction**

Des cellules ayant une grande efficacité ont été développées pour des applications spatiales. Les cellules multi-jonctions sont constituées de plusieurs couches minces. Chaque type de semi-conducteur est caractérisé par une longueur d'onde maximale au-delà de laquelle il est incapable de convertir le photon en énergie électrique. C'est l'intérêt de choisir des matériaux avec des longueurs aussi proches les unes des autres que possible de manière à ce qu'une majorité du spectre solaire soit absorbé. Ça génère un maximum d'électricité à partir du flux solaire. Le rendement est de 32 % à 39 % . Elles sont caractérisées par un coût très élevé.

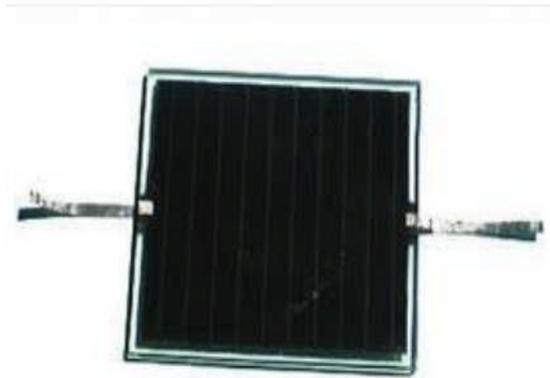


Figure 11 : Cellule multijonction

Le tableau ci-dessous résume la plupart des filières technologiques de la cellule solaire.

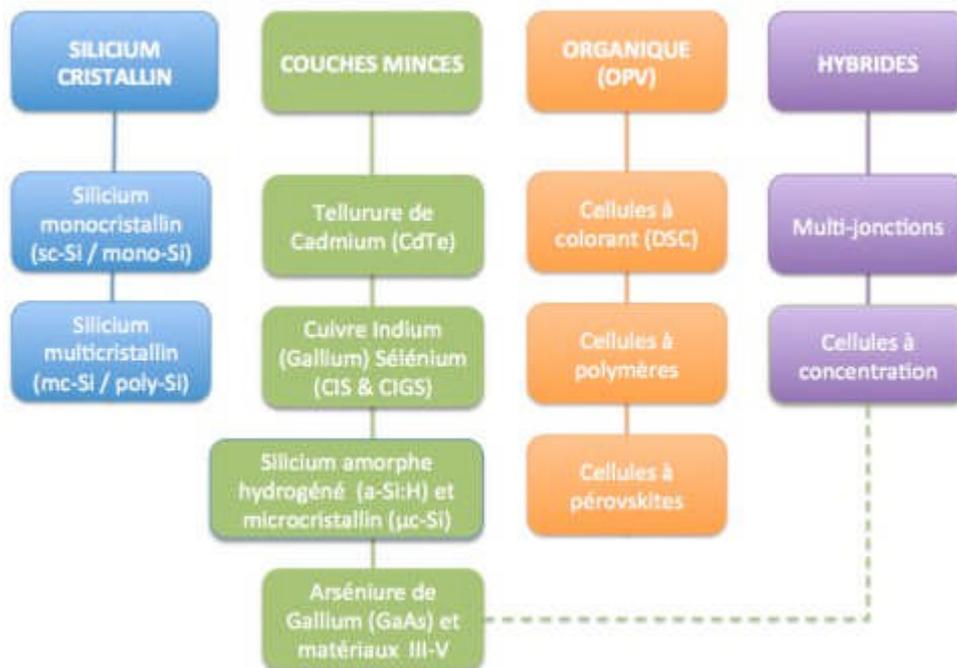


Figure 12: Classification des principales technologies de cellules solaires PV

### AVANTAGES ET INCONVENIENTS

LA technologie photovoltaïque présente un nombre d'avantages et d'inconvénients.

#### - Avantages

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages. D'abord, une haute fiabilité. Elle ne comporte pas de pièces mobiles qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. Ensuite, le caractère modulaire des cellules photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances variables. Les entretiens sont réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.

**Matière : découverte Energies renouvelables : le solaire photovoltaïque ESE M1**  
**USTOMB Département : ELN AN 2020**  
**CHAPITRE 3 : LA SOURCE PHOTOVOLTAÏQUE**

---

Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

Cette énergie est gratuite.

### **Inconvénients**

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients. La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé. Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%). Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru.

Il y'a le problème d'intermittence et le caractère aléatoire.

### **PROPRIETES**

Plus la longueur d'onde est courte, plus il y'a d'énergie dans l'onde. L'énergie solaire reçue est fonction de la durée d'ensoleillement, de la masse d'atmosphère traversée, de l'inclinaison des rayons, de la nébulosité (nuages, brouillards,...).

Une autre dépendance est celle de la saison, l'heure, la latitude, l'altitude, l'état du ciel... Le flux solaire reçu au niveau du sol dépend aussi de :

- l'orientation, la nature et l'inclinaison de la surface terrestre,
- la latitude du lieu de collecte, de son degré de pollution ainsi que de son altitude...

### **ASSOCIATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES**

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque (PV), ne produit qu'une très faible puissance électrique. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module. On le définit comme étant le regroupement de plusieurs cellules solaires en série, fournissant de la sorte des grandeurs de sortie appréciables (tensions).

Dans notre cas, on utilisera un module photovoltaïque, fait de 36 cellules solaires polycristallines disposées en série. Nos modules photovoltaïques sont de type Kyocera LA 361 K51 orientés 35° sud.

Les connexions en série de plusieurs modules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Le courant de sortie, et donc la puissance, sera proportionnelle à la surface du module et au nombre de modules connectés en parallèle. En associant les modules PV en série (*somme des tensions de chaque cellule*) et/ou en parallèle (*somme des intensités de chaque cellule*), on peut constituer un générateur ou champ PV, selon les besoins des applications visées.

On appellera  $N_s$ , le nombre de modules photovoltaïques connectés en série formant une branche. On appellera  $N_p$  le nombre de branches mises en parallèle. Le produit :

$$N_t = N_p \cdot N_s$$

donnera le nombre total de modules utilisés.

Pour notre cas, le générateur photovoltaïque GPV est composé de plusieurs modules ou panneaux connectés soit en série, soit en parallèle, soit en configuration mixte (série et

parallèle). Le système photovoltaïque est alors l'ensemble du générateur photovoltaïque(GPV), des équipements et de la charge.

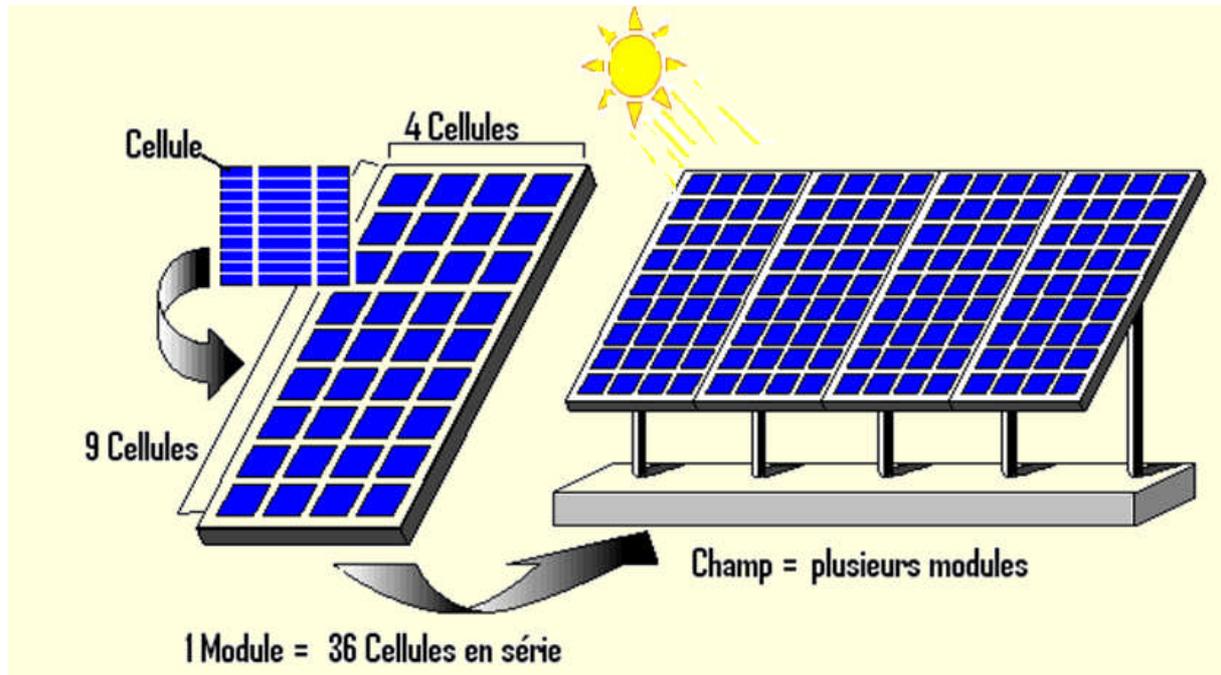


Figure 13 : Notion de module PV , de générateur PV

### Modélisation électrique

Sous ensoleillement, la cellule photovoltaïque peut être représentée par un circuit électrique équivalent schématisé par la Figure 14.

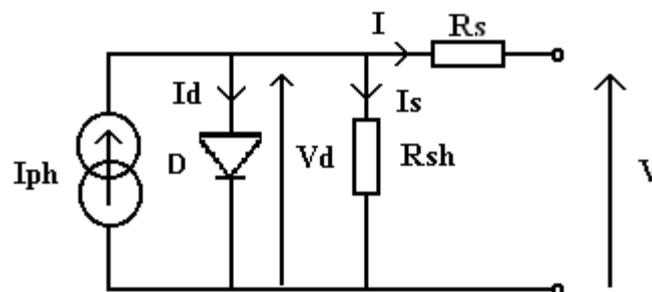


Figure 14 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

Ce modèle fait apparaître :

Le générateur du photo courant  $I_{ph}$  : c'est le courant photo généré. Il est assimilé au courant de court-circuit  $I_{cc}$ .

La diode D qui symbolise la jonction PN.

La résistance  $R_s$  résistance série prend en compte les résistances de contacts et de connexions.

La résistance shunt  $R_{sh}$  symbolise le courant de fuite au niveau de la jonction.

Ce comportement peut être décrit par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_d - I_s$$

I : courant de sortie

$I_s$  : courant d'obscurité.

$I_d$  : courant direct de la diode. Il est exprimé par l'équation suivante:

$$I_d = I_o \cdot \left[ \exp\left(\frac{V_d}{A.U_T}\right) - 1 \right]$$

$V_d$  : tension au niveau de la diode.

$I_o$  : courant de saturation. Il est surtout conditionné par l'évolution de la température.

A : correspond au facteur d'idéalité. Il dépend du semi conducteur utilisé ainsi que de sa nature (monocristallin, polycristallin, amorphe...);

$U_T$  : potentiel thermique.

$$U_T = \frac{K_b \cdot T}{q}$$

$K_b$ : constante de Boltzmann =  $1.3810^{-23}$  J/°K.

T: température de la jonction en degrés Kelvin.

q: charge de l'électron =  $1.610^{-19}$  Coulombs.

En reportant l'équation (4.3) dans (4.2), on aboutit à:

$$I = I_{ph} - I_o \cdot \left[ \exp\left(\frac{V_d}{A.U_T}\right) - 1 \right] - \frac{V_d}{R_{sh}}$$

Or  $V_d = V + R_s \cdot I$

V : tension de sortie.

Ainsi,

$$I = I_{ph} - I_o \cdot \left[ \exp\left(\frac{V + R_s \cdot I}{A.U_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}}$$

La résistance  $R_{sh}$  est souvent négligée car elle présente une valeur appréciable.

Ainsi notre équation (4.7) devient :

$$I = I_{cc} - I_o \cdot \left[ \exp\left(\frac{V + R_s \cdot I}{A.U_T}\right) - 1 \right]$$

De même:

$$V = -R_s \cdot I + A.U_T \cdot \ln\left[\frac{I_{cc} - I + I_o}{I_o}\right]$$

I, V seront donc les grandeurs de sortie de la cellule photovoltaïque.

Ce modèle a l'avantage d'être simple et implantable sur bon nombre de simulateurs. Il permet d'obtenir le comportement d'une cellule PV.

## PARAMETRES EXTERNES

Les constats montrent que l'exploitation d'une énergie comme le photovoltaïque peut s'avérer complexe et inefficace sans une bonne connaissance des conditions d'exploitations.

Pour faciliter une meilleure compréhension du comportement des générateurs PV, nous avons fait une synthèse en fonction de différentes contraintes. En effet, les performances d'une cellule ou module photovoltaïque sont caractérisées par un certain nombre de paramètres, extraits de la caractéristique courant-tension I-V. Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes I-V, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivants.

#### - Courant de court-circuit

Le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) est le courant qui circule dans la cellule ou dans le module sous ensoleillement, sans application de tension. Il est proportionnel à l'ensoleillement  $E_s$ . Cette corrélation est déterminée expérimentalement par:

$$I_{cc} = K_i' \cdot E_s$$

où  $E_s$  est l'ensoleillement et  $K_i'$  est une constante.

Ce courant se confond avec le photo-courant  $I_{ph}$ . En annulant la tension V dans l'équation I-V, on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_o \left( e^{\frac{R_s I_{cc}}{A U_T}} - 1 \right) - \frac{R_s I_{cc}}{R_{sh}}$$

Pour la plupart des cellules photovoltaïques (la résistance série étant faible), on peut négliger le terme

$I_o \left( e^{\frac{R_s I_{cc}}{A U_T}} - 1 \right)$  devant  $I_{ph}$ . L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} \approx \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}}$$

$R_{sh}$  présentant une forte valeur, on obtient

$$I_{cc} \approx I_{ph}$$

#### - Tension de circuit ouvert

C'est la tension  $V_{oc}$  pour laquelle le courant débité par le générateur PV est nul. C'est la tension maximale d'une cellule photovoltaïque ou d'un module PV. Son expression est déduite de l'équation selon :

$$0 = I_{ph} - I_o \left( e^{\frac{V_{oc}}{A U_T}} - 1 \right) - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}$$

la tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) varie peu avec l'ensoleillement. De plus, la tension de circuit-ouvert est linéaire avec la température de fonctionnement. La tension de circuit ouvert permet d'évaluer le courant  $I_o$  :

$$I_o = \frac{I_{ph} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{A U_T}\right) - 1}$$

Sa valeur est donnée par :

$$V_{oc} = A.U_T.Ln\left[\frac{I_{ph}}{I_o} + 1\right]$$

### Puissance optimale

Les valeurs  $V_{opt}$  et  $I_{opt}$  sont définies de telle sorte que le produit  $V_{opt} \cdot I_{opt}$  soit maximal. Ce produit correspond à la puissance maximale  $P_{opt}$  pouvant être délivrée par la cellule photovoltaïque ou le GPV . La puissance utile maximale :

$$P_{opt} = V_{opt} \cdot I_{opt}$$

s'obtient en optimisant le produit courant tension.

La puissance du générateur PV sera optimale si chaque cellule fonctionne à sa puissance maximale notée  $P_{max}$  ou  $P_{opt}$ . Cette puissance est le maximum d'une caractéristique puissance-tension P-V du générateur, et correspond au produit d'une tension optimale notée  $V_{opt}$  et d'un courant optimal noté  $I_{opt}$ . Ainsi, pour  $N_s$  cellules en série dans une branche et des branches elles-mêmes ( $N_p$ ) en parallèle soumises aux mêmes conditions de travail, la puissance optimale disponible en sortie du générateur PV est donnée par :

$$P_{opt} = N_s \cdot N_p \cdot P_{opt1}$$

avec  $P_{opt1}$  la puissance optimale au niveau d'un module.

Pour qu'un générateur PV ainsi constitué puisse fonctionner de façon optimale, il faut que les ( $N_s \cdot N_p$ ) cellules se comportent toutes de façon identique. Elles doivent pour cela être issues de la même technologie, du même lot de fabrication et qu'elles soient soumises aux mêmes conditions de fonctionnement (ensoleillement, température, vieillissement et inclinaison..).

## PROPRIETES

La Figure ci-dessous montre la caractéristique I-V obtenue à une température  $T=25^\circ\text{C}$  et un ensoleillement  $E_s=100\%$  équivalent à  $1000\text{W/m}^2$  : conditions standards de fonctionnement d'un module photovoltaïque.

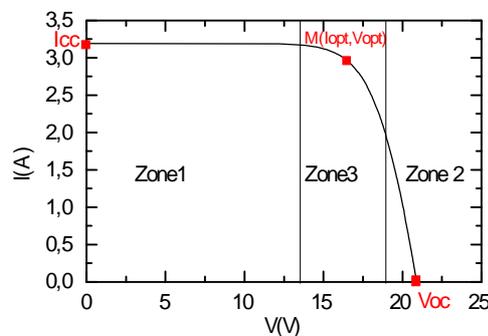


Figure 15: Caractéristique I-V,  $E_s=100\%$ ,  $T=25^\circ\text{C}$

Nous pouvons décomposer donc la caractéristique courant-tension (I-V) du module photovoltaïque en 3 zones :

**Matière : découverte Energies renouvelables : le solaire photovoltaïque ESE M1**  
**USTOMB Département : ELN AN 2020**  
**CHAPITRE 3 : LA SOURCE PHOTOVOLTAÏQUE**

---

- Une zone assimilable à un générateur de courant  $I_{cc}$  proportionnel à l'ensoleillement, (Zone 1),
- Une zone assimilable à un générateur de tension  $V_{oc}$  (Zone 2),
- Une zone 3 où l'impédance interne du générateur varie très fortement. C'est le coude de la caractéristique qui a la spécificité d'être une zone intermédiaire entre un fonctionnement en générateur de courant et un générateur de tension. Elle s'affirme par une évolution conjointe, très significative des grandeurs de sortie I-V. C'est dans la Zone 3 qu'est situé le point de fonctionnement noté M pour lequel la puissance fournie par le générateur est maximale. Ce point est appelé point de puissance optimale, caractérisé par le couple  $(I_{opt}, V_{opt})$ , et seule une charge dont la caractéristique passe par ce point, permet d'extraire la puissance maximale disponible dans les conditions considérées.

La puissance électrique disponible aux bornes d'une cellule photovoltaïque ou du GPV est fonction de nombreux paramètres : du matériau photosensible, des caractéristiques du rayonnement incident, de la quantité d'énergie reçue, de la surface de la cellule, de ses dimensions géométriques, de la forme de la cellule, de la température et de l'ensoleillement de fonctionnement et de la charge qui lui est connectée. Le module photovoltaïque peut fonctionner selon toute combinaison de courant et de tension présente sur sa courbe courant - tension mais, en réalité, il fonctionne selon une seule combinaison à un moment donné. Cette combinaison n'est pas déterminée par les modules seuls mais bien par les caractéristiques électriques du circuit qui y est raccordée (charge).

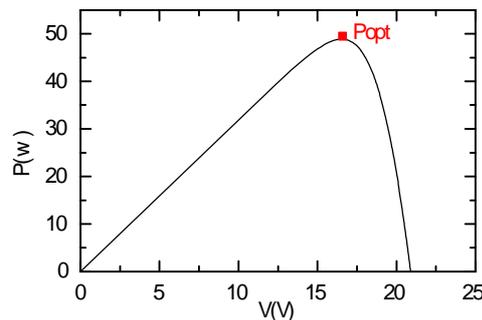


Figure 16: caractéristique P-V  $E_s=100\%$ ,  $T=25^\circ\text{C}$

La Figure ci dessus révèle la variation de la puissance de sortie P du module photovoltaïque en fonction de la tension V. Cette puissance P est calculée par:

$$P = V.I = -R_s.I^2 + A.U_T.I.Ln\left[\frac{I_{cc} - I + I_o}{I_o}\right]$$

avec  $R_{sh}$  négligée. Comme montré en Figure, quand la tension augmente, la puissance a tendance à croître jusqu'à atteinte du pic  $P_{opt}$  à partir duquel elle décroît. Ce pic  $P_{opt}$  est fourni par la résolution de l'équation suivante :

$$\frac{dP}{dI} = -2.R_s.I + A.U_T.Ln\left[\frac{I_{cc} - I + I_o}{I_o}\right] - \frac{A.U_T.I}{I_{cc} - I + I_o} = 0$$

Le courant  $I_{opt}$  est solution de l'équation:

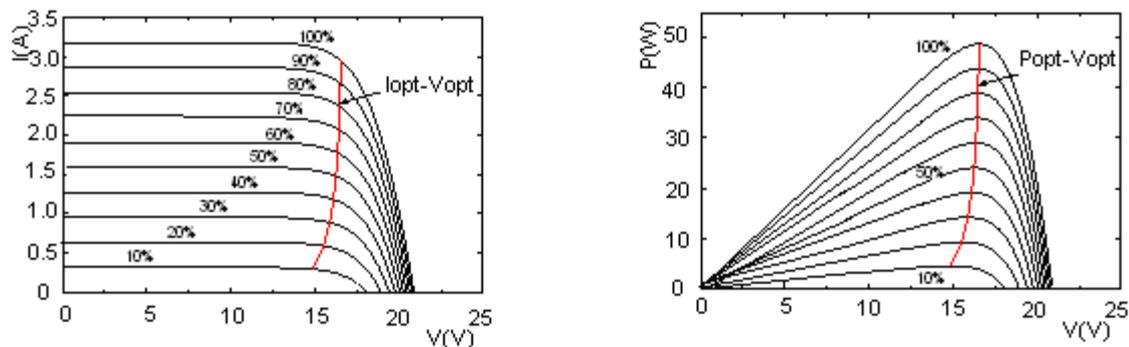
$$I_{cc} = I_{opt} + I_o \cdot \left[ \exp\left[\frac{(2.I_{opt}.R_s)}{A.U_T} + \frac{I_{opt}}{I_{cc} - I_{opt} + I_o}\right] - 1 \right]$$

### EVOLUTION DE LA CARACTERISTIQUE I-V DU MODULE PHOTOVOLTAÏQUE

Les cellules photovoltaïques présentent les caractéristiques fortement non linéaires tension-courant qui dépendent de facteurs multiples. Pour un module, son comportement en fonction du flux lumineux  $E_s$  et de la température  $T$ , l'influence des résistances série et shunt, ou concernant son interaction avec la charge s'apparente au cas d'une cellule élémentaire. La fluctuation de la caractéristique I-V du module photovoltaïque est liée d'une façon très étroite à l'ensoleillement et la température. Nous allons dégager l'influence de l'ensoleillement pour une température constante de  $25^\circ\text{C}$  d'une part puis de la température d'une autre part sur certaines grandeurs caractéristiques du module photovoltaïque pour un  $E_s$  constant [8]. Parmi ces grandeurs, nous soulignerons particulièrement: le courant de sortie  $I$ , la tension de sortie  $V$ , la puissance  $P$ , le courant optimal  $I_{opt}$ , la tension optimale  $V_{opt}$ , la puissance optimale  $P_{opt}$ , le courant de court-circuit  $I_{cc}$ , la tension en circuit ouvert  $V_{oc}$ .

#### Influence du flux lumineux

L'évolution de la caractéristique I-V vis à vis de l'ensoleillement pour une température constante ( $25^\circ\text{C}$ ) se résume par la (Figure 17 a), et ce pour un module photovoltaïque.



a- Caractéristiques I-V

b- caractéristiques P-V

Figure 17: Caractéristiques du générateur photovoltaïque vis-à-vis de  $E_s$

Les influences de l'ensoleillement  $E_s$  et de la température  $T$  sur la puissance pouvant être délivrée par un module PV sont importantes. Les variations du courant et de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'ensoleillements à température maintenue constante sont montrés en (Figure 17).

La Figure représente les caractéristiques I-V d'un module photovoltaïque à  $25^\circ\text{C}$  et sous diverses valeurs de l'ensoleillement. A chacune de ces valeurs du flux lumineux correspond une puissance électrique maximale que pourrait fournir le module.

En conséquence de l'augmentation de l'ensoleillement, les grandeurs de sortie  $I, V$  croient améliorant de la sorte la puissance recueillie au niveau du générateur. De la Figure , on voit que la tension de circuit ouvert du module photovoltaïque correspondant au point d'intersection de la courbe avec l'axe horizontal change peu avec les changements de l'ensoleillement. Les tensions  $V_{oc}$  par exemple à  $E_s=50\%$  et à  $E_s=100\%$  sont rapprochées. En effet, les valeurs sont de  $V_{oc}=20\text{V}$  à 50% d'ensoleillement et  $20.8\text{V}$  à 100% d'ensoleillement.

Le photo-courant  $I_{cc}$  est pratiquement proportionnel à l'ensoleillement. Par contre, la tension de circuit ouvert n'en dépend pas.

Lorsque l'ensoleillement varie pour une température donnée, le courant de court-circuit  $I_{cc}$  varie proportionnellement à l'ensoleillement. Dans un même temps, la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  varie très peu.

Notons aussi la légère diminution de la tension du circuit ouvert  $V_{oc}$  suite à une chute du flux lumineux.

### Influence de la température

Les caractéristiques des modules photovoltaïques, comme tout autre composant semi-conducteur dépendent de la température.

Le comportement du module photovoltaïque en fonction de la température est plus complexe. On maintient un ensoleillement constant de 100%, pour diverses T. Le déplacement de la caractéristique I-V selon la température est surtout occasionné par la variation de  $V_{oc}$  suivant T.

A mesure que la température augmente, les caractéristiques I-V et P-V obéissent à un déplacement indiqué respectivement en Figure .

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules photovoltaïques. La tension du circuit ouvert  $V_{oc}$  est inversement proportionnelle à la température, c.-à-d., une élévation de la température produit une diminution de tension. Par contre, pour une tension constante, le courant de court circuit est directement proportionnel au rayonnement photovoltaïque et varie peu avec des variations de la température .

Cette diminution est montrée par la Figure ci-dessous. L'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible.

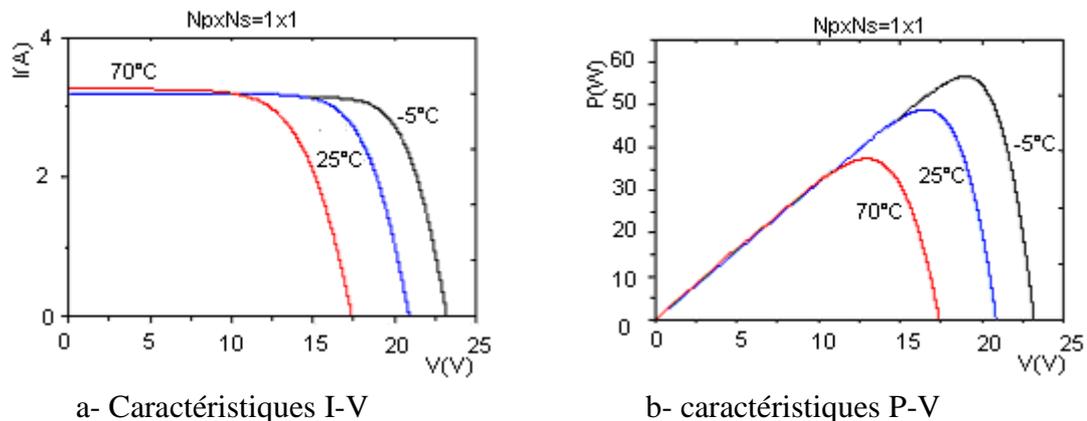


Figure 18 : Caractéristiques du générateur photovoltaïque vis-à-vis de la température

Le courant de saturation  $I_0$  et le potentiel thermique  $U_T$  sont aussi sensibles à la température. Le domaine de variation du courant  $I_{cc}$  est restreint. De ce fait, l'impact de la température sur  $I_{cc}$  n'est pas prépondérant. On assiste à une augmentation linéaire de  $I_{cc}$  égale à peu près à  $1.6\text{mA}/^\circ\text{C}$ .

### Influence du vieillissement

D'autres facteurs externes tels que la poussière, le masquage non uniforme (ombres, feuilles mortes..) peuvent affecter la caractéristique I-V du module photovoltaïque entraînant de la sorte la modification de ses caractéristiques. Leur influence peut être assimilée à une baisse d'ensoleillement. Le vieillissement se traduit par la variation des résistances  $R_s$  et  $R_{sh}$ . Les performances d'une cellule photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que la résistance série est grande ou que la résistance shunt est faible.



A l'équilibre, la chaleur générée à l'intérieur du module est évacuée par différents phénomènes qui dépendent tous de la température interne du module. Si cette dépendance est connue, on peut donc déterminer la température interne du module.

### **Modèle thermique linéaire**

La solution la plus simple consiste à supposer que le flux de chaleur est égal à

$$W_Q = (T_{\text{jonction}} - T_{\text{ambiante}}) / R_{\text{th}}$$

Il s'agit d'un modèle simpliste. T est la température.

$W_Q$  = flux de chaleur et  $R_{\text{th}}$  = la résistance thermique

La résistance thermique est obtenue par la formule suivante :

$$R_{\text{th}} = \frac{(NOCT - T_{\text{amb}})}{(800 - P_{\text{elec}})}$$

$P_{\text{elec}}$  étant la puissance électrique fournie par le panneau.

NOCT est " Nominal Operating Cell Temperature ". Cette température correspond à la température de jonction d'un panneau soumis aux conditions suivantes :

Un Es des cellules de 800 W/m<sup>2</sup>

Une température ambiante de 20°C

Une exposition à un vent de 1 m/s

Une installation permettant le refroidissement libre des deux faces du panneau ( par opposition au montage sur un toit).

On observe un rapport de l'ordre de 29 W/(m<sup>2</sup> K) pour un champ photovoltaïque libre, et de 13 W / (m<sup>2</sup> K) dans le cas d'un champ photovoltaïque mal ventilé (incorporé à une façade).

### **Modèle thermique non linéaire**

Dans une modélisation plus moderne, on distinguera dans les phénomènes d'évacuation de la chaleur

- la convection naturelle (dominante en l'absence de vent)
- la convection forcée (dominante en présence de vent)
- le rayonnement
- éventuellement la conduction thermique entre la jonction et la surface du module.

La convection naturelle et le rayonnement sont des phénomènes fortement non linéaires.

Citons la possibilité d'introduire dans le modèle une capacité thermique. Il est en tout cas utile pour la conduite des essais d'avoir une idée des temps caractéristiques des transitoires thermiques.

### **Détermination expérimentale**

Pour établir le modèle thermique, on effectuera des mesures où on laisse s'établir l'équilibre thermique.

Les essais peuvent être faits pour différents environnements (air calme, vent de vitesse connue...).

En utilisant le modèle électrique, on peut déduire des mesures électriques la valeur de la température de jonction.

On relie alors l'écart entre la température de jonction et la température ambiante à la puissance dissipée dans le module.

## **GROUPEMENT DES MODULES PV ET PROTECTION**

Comme précité, la puissance disponible aux bornes d'une cellule est très faible. Il est donc nécessaire d'associer en série et en parallèle de telles cellules pour obtenir des modules de puissance compatible avec la charge. Les performances d'un générateur photovoltaïque sont déterminées à partir de ces courbes. La connaissance du profil de ces courbes caractéristiques, pour une gamme d'ensoleillement la plus large possible, permet d'évaluer les puissances maximales délivrées.

Les caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque varient en fonction de la température, de l'ensoleillement et, de façon générale, des conditions de fonctionnement.

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit  $I_{cc}$  et de la tension à vide  $V_{oc}$  varient. La caractéristique d'un générateur PV constitué de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à celle d'une cellule (module) élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (ensoleillement et température uniformes).

### **1. Groupement série**

La tension maximale fournie par la cellule solaire s'évalue aux environs de  $V_{oc}=0.5V$ . Cette tension étant très faible, il s'avère nécessaire de connecter les cellules solaires en série dans le souci d'obtenir une tension appréciable (cas de modules solaires). Si la tension recueillie à la sortie d'un module  $V_1$  ne répond pas aux besoins de la charge à alimenter, on procédera à une association en série des modules telle que montrée en Figure ci dessous.

Les modules solaires étant groupés en série doivent être traversés par le même courant. Par ailleurs, ils doivent être identiques et soumis aux mêmes conditions ; La caractéristique I-V résultante s'obtient en additionnant point par point les tensions, étant données des valeurs communes de courant. Soient  $I$ ,  $V$  respectivement le courant et la tension d'une cellule (ou module solaire), pour une configuration série nous avons:

$$I_T = I$$

et

$$V_T = N_s \cdot V$$

où  $I_T$  et  $V_T$  sont le courant et la tension de sortie pour cet assemblage.

La cellule solaire, n'étant qu'une diode, peut être par conséquent traversée par un courant inverse ou être soumise à une tension négative. De plus, la résistance thermique de la cellule solaire étant faible, il peut y avoir augmentation de la température au niveau de la cellule solaire engendrant sa destruction. Afin d'éviter le fonctionnement en récepteur de la cellule solaire (module photovoltaïque), une protection s'impose par l'emploi de diodes. Chaque diode empêche le courant de s'inverser et bloque donc son groupe de cellules (ou de modules solaires) si celui ci devient récepteur. Si un groupement débite moins qu'un autre par occultation par exemple, ce groupe sera neutralisé.

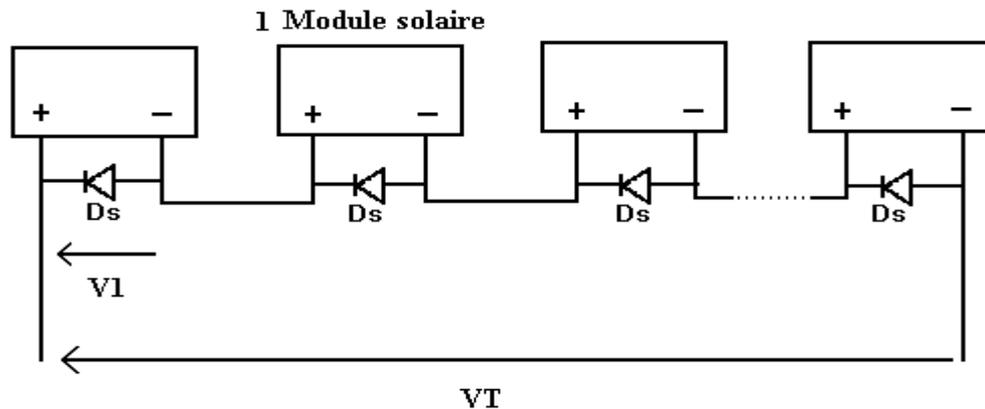


Figure 21: Disposition des diodes de protection

A titre d'exemple, si nous avons  $N+1$  modules connectés en série pour un dysfonctionnement (endommagement d'un module solaire par exemple), celui ci subira une tension qui équivaut à  $N$  fois la tension d'un module solaire. Pour tous les courants supérieurs à  $I_{cc}$  du module dégradé, la tension devient négative et élevée. Le point de fonctionnement est sur la caractéristique I-V du module, dans la zone des tensions négatives. Le module est en fonctionnement récepteur puisque sa tension est négative. On assiste à une dissipation de puissance importante dans le module endommagé, dissipée par les autres modules. Pour pallier à ce problème, on a recours à une diode disposée en antiparallèle. Généralement, il y'a lieu de mettre ces diodes de protection pour des groupements excédant 30 voire 40 cellules solaires montées en série.

## 2. Groupement parallèle

Certains équipements à alimenter nécessitent de forts courants d'utilisation. Pour ce faire, la manière adéquate de garantir cet apport en courant est de connecter en parallèle les modules solaires comme montré par la Figure ci-dessous.

Généralant la même tension, il est important de relier des modules solaires ayant les mêmes caractéristiques électriques.

La caractéristique résultante I-V s'obtient en additionnant point par point les courants pour des valeurs de tensions communes. Pour  $I$ ,  $V$  courant et tension d'un module solaire, on aura pour un groupement parallèle de modules solaires:

$$I_T = N_p \cdot I$$

$$V_T = V$$

avec  $V_T, I_T$  : grandeurs courant et tension de sortie du GPV

La condition pour un groupement parallèle est d'avoir des modules ayant des  $V_{oc}$  identiques. Dans le cas contraire, le module présentant le plus petit  $V_{oc}$  fonctionnera en récepteur. Pour toute tension supérieure à  $V_{oc}$  du module dégradé, le courant devient négatif. Par conséquent, les autres éléments dissiperont de la puissance. Aussi afin de pallier à ce problème, on adopte des diodes anti-retour ' $D_p$ ' en série avec chaque branche des modules parallèles. La diode  $D_p$  déconnecte le module qui lui est associé une fois que celui ci a tendance à passer en fonctionnement récepteur. En fait, on pourrait imaginer de protéger ainsi chaque cellule solaire, la sécurité obtenue serait excellente mais le coût des diodes et des

branchements tout à fait déraisonnable. Ces diodes ne travaillent qu'en cas de déséquilibre pour dévier le courant vers la charge et de le détourner de l'élément anormal.

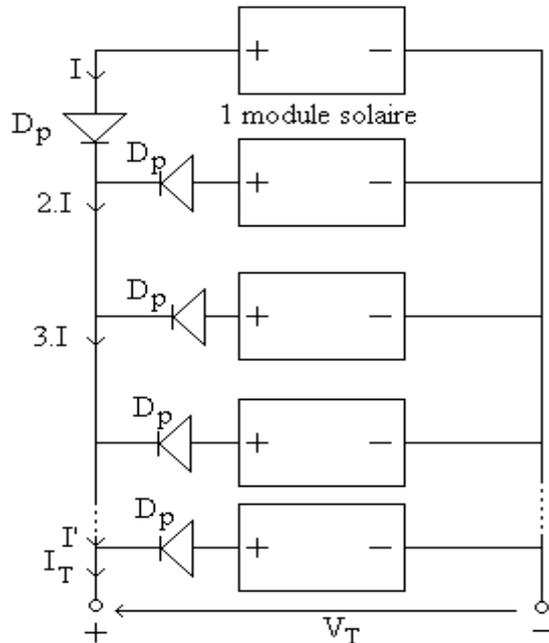


Figure 22: Disposition des diodes pour des modules groupes en parallèle

### 3. groupement mixte

Des puissances appréciables sont exigées par certaines charges. On fait donc appel à des configurations mixtes: connexions de plusieurs branches  $N_p$  en parallèle, chaque branche comportant un nombre  $N_s$  de modules reliés en série telles que:

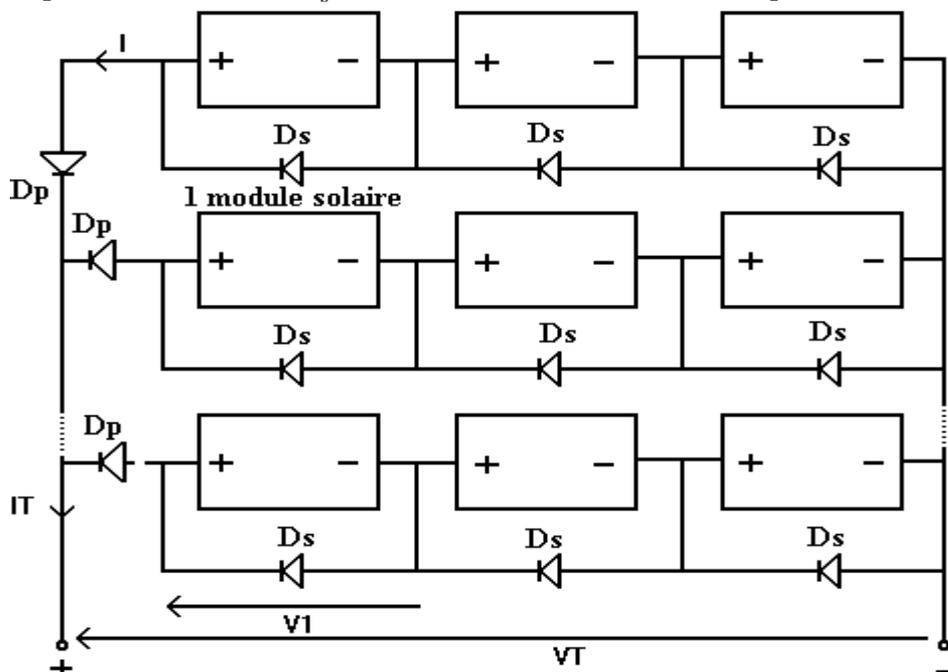


Figure 23: Groupement mixte et protection

On aura:

et

$$I_T = N_p \cdot I$$

$I_T$  et  $V_T$  sont les grandeurs de sortie du GPV,

$I$  et  $V$  sont les grandeurs de sortie du module solaire.

Sur la Figure, l'intérêt de la diode  $D_p$  est qu'elle évite qu'une branche mise en parallèle ne fonctionne en récepteur.

Pour la diode  $D_s$ , elle dévie le courant lorsque le module correspondant est défectueux.

### Applications de l'énergie solaire

De façon générale, les applications de l'énergie solaire peuvent être classées en deux grandes sections:

- les systèmes isolés.
- les systèmes raccordés au réseau.

#### Les systèmes isolés

- Télécommunications ( téléphonie mobile, répéteurs radio et télévision ,bornes d'appel d'urgence ,télécommande.....).
- Électrification rurale (postes de police et de frontière, électrification de refuges et auberges de montagne, postes de soins de premier niveau,....).
- Applications agricoles (pompage d'eau, électrification de bâtiments industriels,.....).
- Applications pour l'élevage (pompages d'eau pour l'abreuvement du bétail, systèmes de traite et de refroidissement du lait....).
- Éclairage public (panneaux publicitaires, arrêts de bus, éclairage de tunnels....).
- Signalisation (signalisation routière, indicateurs de l'heure et la température sur la voie publique, radiophares et radiobalises à usage aéronautique.....).
- Contrôle (actionnement de vannes, contrôles et stations météorologiques et sismiques, caméras de TV pour la surveillance et la mesure du trafic routier...).

#### Systemes connectés au réseau électrique

Il s'agit d'une application récente et innovante des systèmes photovoltaïques, consistant à faire une installation photovoltaïque et un onduleur capable de transformer l'énergie fournie par les panneaux et l'injecter dans le réseau électrique.

#### Exemple de pompage d'eau par voie solaire

Monter de l'eau à la surface à l'aide d'une pompe alimentée par des panneaux solaires est assez simple et efficace, surtout dans les pays bien ensoleillés. Le pompage photovoltaïque est d'ailleurs une des applications les plus répandues dans les pays du Sud, et les premières pompes « solaires » datent des années 1970.

Ces systèmes fonctionnent « au fil du soleil ». Tant qu'il y'aura du soleil, le système fonctionnera. L'eau est remontée quand il y'a du soleil, et stockée dans un réservoir ou citerne placés en hauteur. On réalise un stockage en eau et non un stockage chimique. On peut

donc se passer de batteries. La figure 24 montre la structure d'une telle installation.

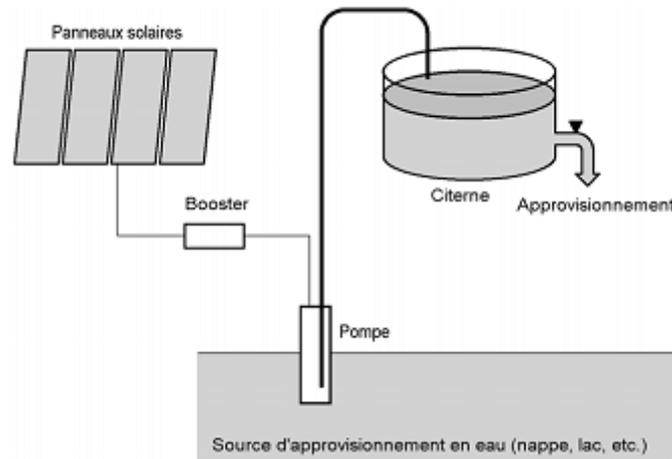


Figure 24 : Principe d'un système de pompage au fil du soleil

## REFERENCES

FZ ZERHOUNI , DEVELOPPEMENT ET OPTIMISATION D'UN GENERATEUR ENERGETIQUE HYBRIDE PROPRE A BASE DE PV-PAC, doctorat ES SCIENCES en ELN, Département d'ELN, faculté du génie électrique, USTOMB, 2009.

<https://www.photovoltaique.info/fr/realiser-une-installation/choix-du-materiel/caracteristiques-des-panneaux-photovoltaïques/technologies-de-cellules-solaires-photovoltaïques/>

TABANI & ATTOUCHE, contrôle dans un système à énergie propre, Master en ELN, Département d'ELN, faculté du génie électrique, USTOMB, 2019. (Encadrante : FZ ZERHOUNI)

Tomislav Pavlovic, Green Energy And Technology , The Sun And Photovoltaic Technologies, Springer 2020.

Anne Labouret, Pascal Cumunel, Jean-Paul Braun, Benjamin Faraggi, Cellules solaires, 5ème édition, les bases de l'énergie photovoltaïque Dunod, 2010.

Deren Yang, Handbook of Photovoltaic Silicon, Springer Berlin Heidelberg, 2019.

<https://perso.uclouvain.be/ernest.matagne/SOLAIRE/SEM10/S10P15.HTM>

SITES CONSULTES EN JUIN 2020.

### CONNEXION DIRECTE GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE-CHARGE

La connexion directe GPV-CHARGE est le système le plus simple auquel on a fait recours au départ. C'est le système minimal, le plus économique (en terme du nombre et de la complexité des éléments constituant notre système) qu'on peut envisager. Actuellement, il reste encore beaucoup d'applications où une connexion directe entre un GPV et une charge est effectuée. Ce choix est principalement lié à la simplicité de l'opération due fondamentalement à l'absence d'électronique, sans parler d'un faible coût. La Figure 1 montre ce cas. L'inconvénient de cette configuration, c'est qu'elle n'offre aucun type de « réglage » de fonctionnement. Le transfert de la puissance optimale disponible aux bornes du GPV vers la charge n'est pas non plus garanti.

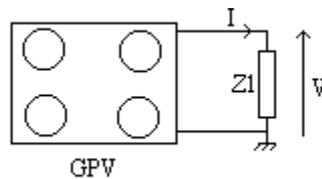


Figure 1 : Principe du couplage direct

Le principe du couplage direct GPV-CHARGE repose sur le transfert de la puissance de sortie de la source photovoltaïque vers l'équipement à alimenter, sans aucun système intermédiaire. Ce fonctionnement est reconnu sous la nomination "fonctionnement au fil du soleil". Le point de fonctionnement est particulièrement dominé par plusieurs facteurs à savoir :

- la charge,
- les conditions de fonctionnement: ensoleillement, température,
- les types de connexions établies des modules photovoltaïques (parallèle, série, mixte)...

Etant donnée une charge de type DC couplée directement au générateur photovoltaïque, le point de fonctionnement est donné par l'intersection de la caractéristique électrique de la charge à celle du GPV.

Pour s'assurer que les cellules travaillent à leur puissance maximale, il faut veiller à ce que la charge impose ce point de fonctionnement optimal. Dans le cas du branchement d'une charge résistive, il faut que l'impédance de la charge évolue pour que les modules restent tout le temps à leur point de fonctionnement optimal afin d'assurer une bonne exploitation des cellules photovoltaïques. Ceci n'est pas toujours le cas.

Nous supposons que la nature de la charge est de type continu (DC). En effet, une charge de type alternative n'est pas du tout compatible avec la connexion directe car le GPV fournit un courant continu. Pour la connexion d'un GPV à une charge alternative, nous avons obligatoirement besoin d'un étage d'adaptation spécifique de type onduleur. Trois types de charges DC typiques existent : une charge purement résistive, une charge de type source de tension et une charge de type source de courant. Sur la Figure 2, nous avons représenté les caractéristiques courant-tension I-V d'un GPV ainsi que les caractéristiques I-V des trois types de charges.

Nous pouvons identifier le point de fonctionnement où la puissance fournie par le générateur est maximale : point M pour un courant optimal ( $I_{OPT}$ ) et une tension optimale

( $V_{OPT}$ ). Ensuite, nous pouvons trouver le point d'intersection entre les caractéristiques I-V du générateur et celles des trois types de charges :

- 1) point A pour une charge résistive,

**CHAPITRE 4 : Systèmes photovoltaïques**

- 2) point B pour une charge de type source de tension,
- 3) point C pour une charge en source de courant,

correspondants à des valeurs de puissance inférieures à la puissance maximale disponible  $P_{OPT}$ . Donc, une perte d'une partie de la puissance dé livrable aux bornes du générateur PV peut se produire ce qui implique à la longue des pertes de production énergétique importantes. Ceci n'est pas observé, dans tous les cas de connexion directe GPV- Charge.

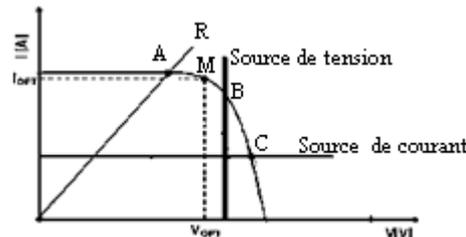


Figure 2 : Types de charges en connexion directe

### STOCKAGE BATTERIE

Les GPV sont usuellement choisis par l'utilisateur cause de leur autonomie. Or, les conditions météorologiques (forte nébulosité) ou la nuit restreignent l'emploi de l'énergie solaire. Vu le caractère intermittent de l'énergie solaire, la priorité de recourir un stockage. Ce stockage peut consister en différentes formes d'énergie pour assurer l'adaptation temporelle de l'offre à la demande. Dans le cas du pompage de l'eau, ce stockage peut consister en un réservoir. Cependant, dans les applications les plus courantes, ce stockage peut résider en des batteries. L'énergie emmagasinée est sous forme électrique. Ce stockage permet d'absorber les chutes de production pendant les périodes de faibles insulations. Les batteries sont des dispositifs dont les conditions de fonctionnement influencent l'efficacité de stockage et leur fiabilité.

Un fonctionnement à puissance optimale du GPV à des conditions de travail fixes peut être obtenu en première approximation par une tension constante. Le récepteur qui peut vérifier cette hypothèse serait une batterie de f.e.m sensiblement égale à  $V_{opt}$ . Le choix des batteries peut par exemple, reposer sur cette condition afin d'assurer une utilisation efficace du GPV. Ceci fait l'objet de cette présente étude.

Le type de la batterie dépend de la nature du matériau pour les plaques ainsi que la nature de l'électrolyte. L'emploi de la batterie, dans la plupart des systèmes peut remplir, suivant l'application, plusieurs fonctions essentielles.

- la batterie peut servir comme "tampon" entre le générateur photovoltaïque et la charge. La batterie imposera sa tension au GPV. De ce fait, il est préférable de choisir une batterie dont la tension se situe dans la zone de puissance optimale du GPV. Ce cas se présente lorsque la charge sollicite un fonctionnement à tension constante.
- la batterie peut être un moyen de stockage et de protection. Le rayonnement solaire qui arrive la surface du GPV est un rayonnement incontrôlé, aléatoire. La puissance délivrée par le générateur photovoltaïque peut donc ne pas s'adapter aux besoins de la charge que l'on désire assurer. L'énergie électrique produite en excès, pour ne pas être gaspillée doit être nécessairement déviée vers les batteries pour une utilisation ultérieure.
- la batterie peut être un moyen d'alimentation nocturne: Cette dernière sera chargée pendant le jour par le générateur photovoltaïque pour pouvoir se substituer à lui la nuit si la charge demande un fonctionnement ininterrompu pendant 24 heures.

**CHAPITRE 4 : Systèmes photovoltaïques**

En résumé, le principal avantage de la batterie est de permettre le fonctionnement du récepteur en l'absence d'ensoleillement.

**2. Fonctionnement du système GPV-batterie**

Plusieurs modèles de simulation de la batterie ont été élaborés dans la littérature. Le plus classique est le modèle I-V. C'est le modèle le plus simple établissant la relation entre le courant et la tension au niveau de la batterie pendant sa charge. Il est formulé par l'équation :

$$V = V_b + R_b \cdot I$$

V, I sont la tension et le courant de sortie,

$V_b$  est la tension de la batterie en circuit ouvert,

$R_b$  est la résistance interne de la batterie

Ce modèle suppose  $V_b$ ,  $R_b$  constants.

Par cette présente approche, on se dirige, à titre d'exemple, vers un générateur photovoltaïque alimentant directement une batterie d'accumulation pendant le jour en vue de son utilisation postérieure.

Notre système consiste en un générateur photovoltaïque connecté à la fois à une batterie de voltage  $V_b$ , de résistance interne  $R_b$  et à une charge ohmique R d'après la Figure :

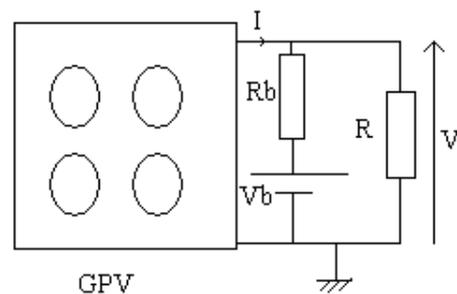


Figure 3: Couplage direct GPV-Batterie-charge

Le circuit équivalent, en accord avec le théorème de Thevenin se présente comme suit:

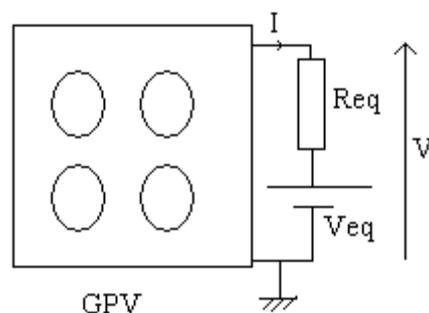


Figure 4 : Circuit équivalent de Thevenin

$$V = V_{eq} + R_{eq} \cdot I$$

avec

$$V_{eq} = \frac{R \cdot V_b}{R_b + R}$$

$$R_{eq} = \frac{R_b \cdot R}{R_b + R}$$

Pour notre exemple, on suppose une batterie alimentée par un module solaire ( $N_p = N_s = 1$ ) selon la Figure 5. La tension de la batterie étant fixe ou lentement variable, on l'intercale entre deux valeurs extrêmes  $V_{b\max}$  et  $V_{b\min}$ .

Pendant la phase de fonctionnement du système, la tension  $V_b$  au niveau de la batterie fluctue d'une valeur minimale  $V_{b\min}$  vers une valeur maximale  $V_{b\max}$  correspondant par exemple, respectivement au niveau de décharge et pleine charge de la batterie.

Négliger  $R_b$  qui est généralement faible conduit à une tension quasiment constante:

$$V = V_b \tag{5.23}$$

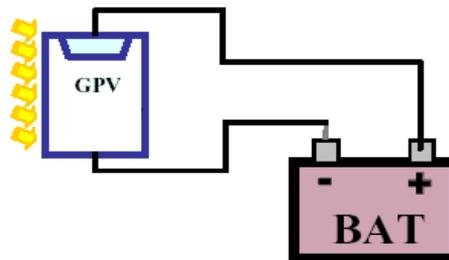


Figure 5: Connexion GPV-batterie

On admettra que la tension de fonctionnement de notre batterie se situera dans la plage de variation de tension limitée par  $V_{b\min}$  et  $V_{b\max}$ .

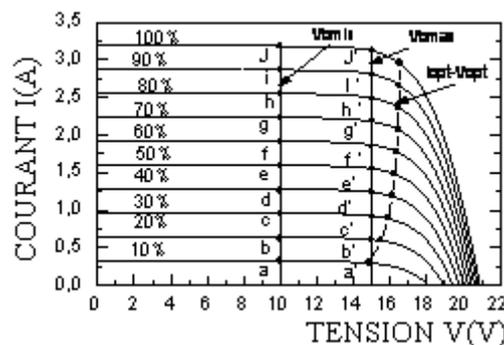


Figure 6: Caractéristiques I-V de la connexion directe GPV-batterie

Pile à combustible, Hacheur, Onduleur, Etude d'un exemple de système global (l'hybridation), Problème de dimensionnement d'une installation photovoltaïque, *Maximum Power Point Tracker* (MPPT).

## PILE A COMBUSTIBLE

Une pile à combustible (PAC) est un générateur qui convertit directement en énergie électrique, l'énergie chimique issue de la réaction entre un combustible (hydrogène, méthanol...) et un comburant (généralement oxygène ou air). Elle comprend en général, deux électrodes poreuses, l'anode alimentée en combustible et la cathode alimentée en comburant, séparées par un électrolyte. La réaction produit un ou plusieurs résidus, dont de l'eau le plus souvent, et surtout de l'énergie électrique. Le principe des piles à combustible est connu à partir d'une constatation effectuée par l'anglais W.R. Grove en 1839.

**Matière : découverte Energies renouvelables : le solaire photovoltaïque ESE M1**  
**USTOMB Département : ELN AN 2020**  
**CHAPITRE 4 : Systèmes photovoltaïques**

Les PAC ont par ailleurs des performances qui dépendent fortement des conditions de fonctionnement liées à l'environnement dans lequel elles se trouvent. De plus, le pilotage de ces systèmes demeure délicat en raison du grand nombre de paramètres physiques mis en jeu tels la température du stack, les pressions, les débits, le taux d'hydratation du combustible et du comburant... Toutes ces grandeurs ont des impacts sur le fonctionnement du système qui demeurent souvent difficiles à estimer. En effet, les grandeurs sont liées par des relations fortement non linéaires, souvent difficiles à modéliser.

La pile à combustible est un convertisseur fonctionnant selon le principe inverse de l'électrolyse de l'eau.

L'hydrogène est le principal combustible envisagé qui peut être produit à partir de sources énergétiques diverses. Depuis sa découverte, la pile à combustible n'a pas pu être développée à l'échelle industrielle à cause de coûts de production élevés et de matériaux chers et difficiles à produire. Cependant, les récents progrès technologiques concernant les matériaux et l'épuisement des stocks de combustibles fossiles motivent la recherche et le développement.

On passe directement de l'électricité à l'hydrogène et inversement, par la réaction réversible en Figure 7, au moyen de procédés électrochimiques propres et efficaces, impliquant respectivement des électrolyseurs ou des piles à combustibles.

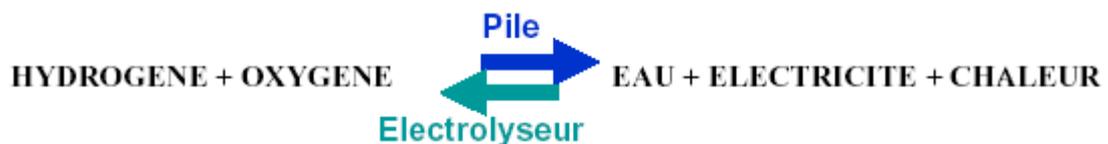


Figure 7 : Complémentarité électricité – hydrogène

Les avantages de l'hydrogène sont nombreux :

- c'est un atome abondant sur terre (sous forme d'eau),
- c'est la molécule la plus énergétique : 120 MJ/kg, soit 2,2 fois le gaz naturel,
- il n'est ni polluant, ni toxique,
- sa combustion dans l'air ne génère que de l'eau,
- c'est le plus léger des gaz ce qui est un facteur positif vis à vis de la sécurité (grande vitesse de diffusion dans l'air),
- son transport est aisé
- ses modes de production sont variés et il est le combustible idéal des piles à combustible

Il convient aussi de résumer ses inconvénients. L'hydrogène est le plus inflammable et le plus explosif des gaz et à cause du faible rayon de sa molécule, il fuit ou diffuse très facilement.

C'est aussi le plus volatil, ce qui représente un avantage du point de vue de la sécurité car il se dissipe rapidement (il est 14 fois plus léger que l'air). Un des dangers associés à la flamme de l'hydrogène est qu'elle est très chaude (de l'ordre de 3000°C) et invisible.

## **PAC ET BATTERIE**

Une PAC est un générateur qui convertit directement l'énergie d'un combustible (hydrogène pur ou hydrocarbure) en énergie électrique, par un procédé électrochimique. Le bilan de la réaction finale est la production d'électricité, d'eau et de chaleur. De plus, le

#### **CHAPITRE 4 : Systèmes photovoltaïques**

Le courant électrique est produit tant que la pile est alimentée conjointement en combustible et en comburant. C'est ce qui la différencie des batteries, accumulateurs et autres piles, où se trouve stockée sous forme chimique une quantité limitée d'énergie électrique et qui doivent soit être rechargés lorsque c'est possible (batterie de véhicule), ou remplacés (piles pour poste de radio). Une pile à combustible, tout comme une batterie, est constituée de deux électrodes et d'un électrolyte. Il existe cependant des différences notables par rapport aux batteries : la batterie est un dispositif de stockage d'énergie, l'énergie maximum utilisable est déterminée par la quantité de réactant chimique stocké dans la batterie elle-même. La batterie cesse donc de produire de l'électricité lorsque tout le réactant chimique est consommé. Dans une pile à combustible par contre, les électrodes ne sont pas consommées avec le temps et les produits ne sont pas stockés à l'intérieur de la pile. Ainsi, tant que le combustible et le comburant sont fournis à la pile, l'électricité continue de circuler.

### **SYSTEME HYBRIDE**

#### **DEFINITION DE L'HYBRIDATION**

Un système hybride est un système caractérisé par plusieurs sources différentes et/ou plusieurs charges différentes et/ou plusieurs éléments de stockage et/ou plusieurs formes d'énergie (électrique, thermique).

#### **EXEMPLE D'UN SYSTEME HYBRIDE**

L'architecture du système considéré comme exemple, en Figure 8 est composée d'un générateur solaire et d'un système de stockage d'énergie constitué d'un électrolyseur, d'une unité de stockage des gaz et d'une pile à combustible. Le champ photovoltaïque (PV) alimente directement la charge. L'excédent solaire est stocké sous forme chimique. Un électrolyseur (EL) dissocie l'eau en hydrogène et oxygène. Le gaz est stocké sans perte. Dans cette architecture, l'électrolyseur est alimenté directement du générateur photovoltaïque. Les produits de l'électrolyseur ( $H_2$  et  $O_2$ ) seront utilisables pour une pile à combustible. Lorsque le champ solaire ne peut pas fournir la totalité de la demande d'électricité, la pile à combustible est connectée. Elle régénère l'électricité stockée en recombinaison de l'hydrogène et l'oxygène. La pile à combustible produit de l'eau pure qui est stockée pour approvisionner l'électrolyseur.

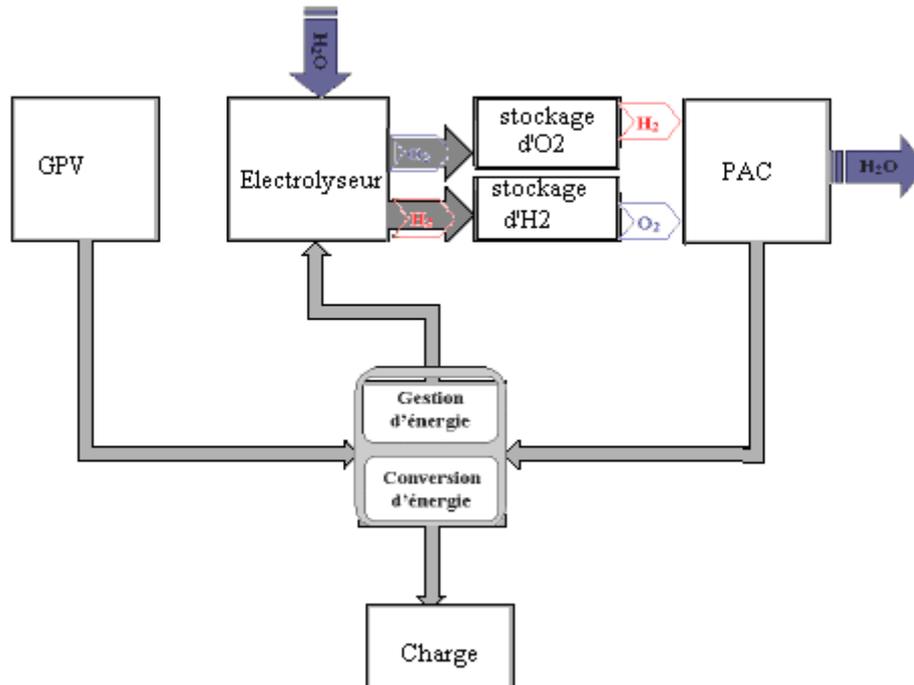


Figure 8: Exemple d'une architecture du système considéré

Les inconvénients majeurs sont le coût d'investissement de l'installation, le rendement et la complexité des composants électrochimiques.

### LE MPPT : maximum power point tracker

Lors de la conception des systèmes photovoltaïques, on essaie souvent d'obtenir le maximum d'énergie solaire afin de répondre aux besoins énergétiques des divers récepteurs utilisés. Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension.

Les variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale. A cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et la charge un ou plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de rattraper à chaque fois le point de puissance maximale. Ces convertisseurs, connus sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking) assurent le couplage entre le générateur PV et le récepteur en forçant le premier à délivrer sa puissance maximale. Pour intégrer les modules au niveau système, le champ PV peut être associé à un organe MPPT (Maximum Power Point Tracking). Il permet d'ajuster, en chaque instant, la puissance électrique fournie par le champ à sa valeur maximale (dans les conditions d'ensoleillement et de température de l'instant considéré) en déplaçant le point de fonctionnement du module sur sa courbe caractéristique.

Deux types de convertisseurs électriques peuvent être utilisés pour la connexion du GPV au système dans lequel il est intégré.

Des convertisseurs DC/DC ainsi que les systèmes de poursuite du point de puissance maximum (MPPT) sont utilisés pour éviter les pertes en puissance. Le convertisseur DC/DC, pour notre cas permet le suivi et le maintien du point maximum de puissance de module photovoltaïque indépendamment de la température, de l'irradiance et de la charge reliée. Ceci pourrait être une bonne pratique d'amélioration du rendement global du système énergétique vert photovoltaïque.

**CHAPITRE 4 : Systèmes photovoltaïques**

Cette qualité d'adaptation détermine le degré d'exploitation des cellules solaires.

Pour que le générateur fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique qui joue le rôle d'adaptateur source-charge. Ainsi, le générateur est alors susceptible de délivrer sa puissance maximale.

Comme nous l'avons montré, le fonctionnement du générateur dépend fortement des caractéristiques de la charge avec laquelle il est associé. En effet, pour différentes valeurs de charges, l'adaptation optimale se produit pour un seul point de fonctionnement particulier, nommé Point de Puissance Maximale (*MPP*). Celui-ci correspond à la puissance maximale que peut délivrer un générateur PV pour une courbe *I-V* donnée. Ainsi, lorsque l'on réalise une connexion directe *source-charge*, le rendement de l'ensemble est alors optimal lorsque le système fonctionne à son *MPP*.

Pour que le générateur fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique qui joue le rôle d'adaptateur source-charge. Ainsi, le générateur est alors susceptible de délivrer sa puissance maximale.

Or, les changements brutaux d'ensoleillement et de charge peuvent survenir. Ainsi, le générateur peut à tout instant avoir sa courbe de puissance modifiée ainsi que son *MPP*. Le MPPT doit suivre ces changements.

Le MPPT est un système qui fera la recherche du *MPP* du GPV. Ce système est intercalé entre le GPV et la charge. Il fournit un degré de liberté noté ' $\alpha$ ' qui nous permettra d'agir sur la caractéristique électrique de la charge vue par le GPV à n'importe quel moment. En exploitant ce degré de liberté, on pourra assurer le transfert de la puissance maximale du GPV vers la charge.

Le MPPT est un convertisseur transformant les grandeurs de l'entrée en des grandeurs de sortie tel montré en Figure 9:

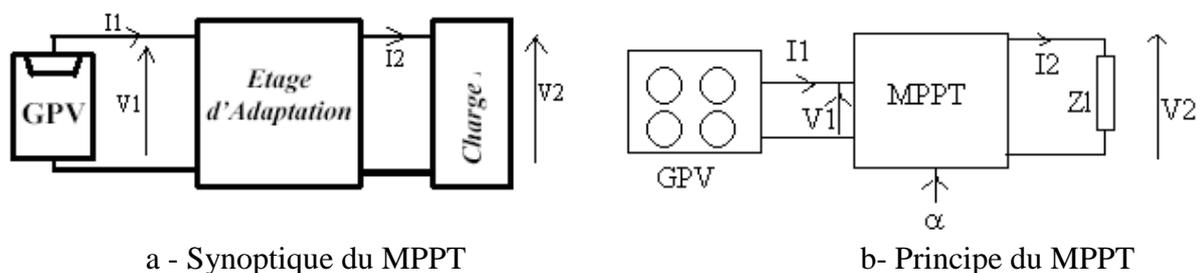


Figure 9 : LE MPPT

Donc, un MPPT (maximum power point tracker) est un convertisseur (CS) statique dont le principe de fonctionnement s'apparente à celui d'un transformateur. Il convertit les grandeurs d'entrée courant et tension  $I_1, V_1$  en des grandeurs de sortie respectivement  $I_2$  et  $V_2$  de même nature selon les équations suivantes:

$$V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2$$

## **HACHEUR**

Pour un hacheur dévolteur (ou série), la tension moyenne de sortie  $V_s$  est inférieure à celle de l'entrée  $E$  du GPV [32].

$$V_s = \alpha \cdot E$$

$$0 \leq \alpha \leq 1$$

Pour un hacheur survolteur (ou parallèle), la tension moyenne de sortie  $V_s$  est supérieure à la tension d'entrée.

$$V_s = \frac{E}{1 - \alpha}$$

$$\alpha > 1$$

La tension moyenne de sortie est supérieure à la tension d'entrée  $E$  du GPV.

En supposant que le MPPT est un dévolteur idéal, on a :

$$V_2 = \alpha \cdot V_1$$

$$I_2 = \frac{I_1}{\alpha}$$

ZI étant la charge à approvisionner par voie solaire, on a :

$$Z_e = \frac{Z_l}{\alpha^2}$$

$Z_e$  est la transformée de  $Z_l$  par le MPPT.

Pour  $\alpha = \alpha_{opt}$ , on a

$$V_1 = V_{opt} \text{ \& } I_1 = I_{opt}$$

*Maximum Power Point Tracker (MPPT).*

## **ONDULEUR**

Un onduleur photovoltaïque doit remplir plusieurs fonctions essentielles dans une installation photovoltaïque raccordées au réseau :

- La conversion du courant et de la tension continus en courant et tension alternatifs compatibles avec le réseau
- La recherche du point de puissance maximum du champ photovoltaïque
- La protection de découplage
- Le contrôle de l'isolement de la partie CC de l'installation photovoltaïque

**Matière : découverte Energies renouvelables : le solaire photovoltaïque ESE M1  
USTOMB Département : ELN AN 2020  
CHAPITRE 4 : Systèmes photovoltaïques**

Dans une installation photovoltaïque raccordée au réseau, l'onduleur occupe une place centrale. Il va transformer le courant et la tension continus, délivrés par le champ photovoltaïque, en un courant et une tension alternatifs compatibles avec le réseau. On distinguera donc toujours la partie continue notée CC (Courant Continu), en amont de l'onduleur, et la partie alternative notée CA (Courant Alternatif), en aval de l'onduleur.

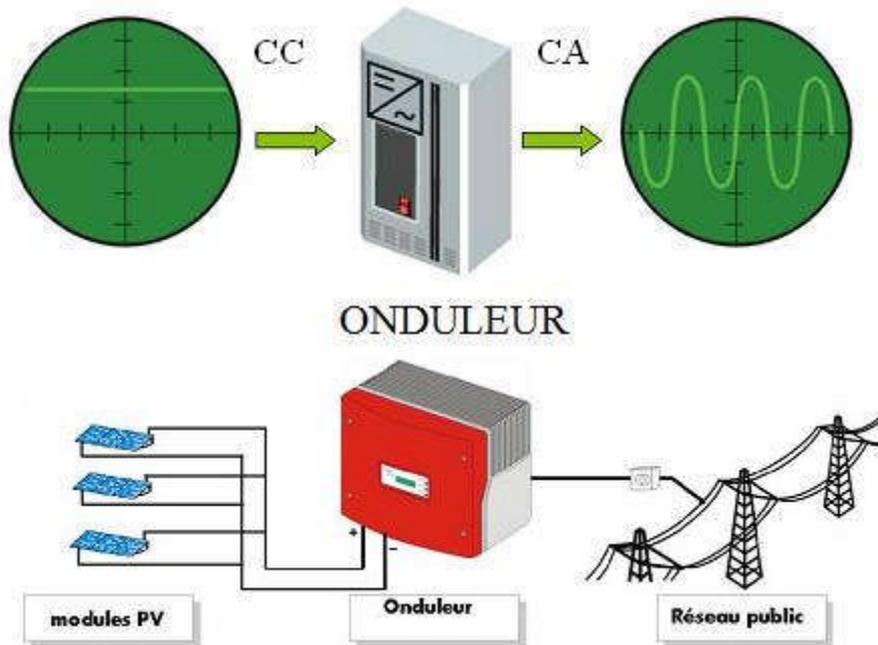


Figure 10 : Onduleur

L'onduleur peut être utilisé pour la recherche du point de puissance maximum (charge de type AC).

Il est à noter que le point de fonctionnement d'un générateur dépend de la charge à ses bornes.

### **Problème de dimensionnement d'une installation photovoltaïque**

Pour dimensionner la surface de panneaux nécessaires on procède en trois étapes :

Etape 1 : Calcul de l'énergie qui sera consommée par jour (voir bilan des puissances et énergies )

Etape 2 : Calcul de l'énergie à produire

Pour que les besoins du client soit assurés, il faut que l'énergie consommée ( $E_c$ ) égale l'énergie produite ( $E_p$ ) à un coefficient près

$$E_p = \frac{E_c}{k}$$

Le coefficient  $k$  tient compte des facteurs suivants :

- l'incertitude météorologique ;
- l'inclinaison non corrigée des modules suivant la saison ;
- le point de fonctionnement des modules qui est rarement optimal et qui peut être aggravé par la baisse des caractéristiques des modules, la perte de rendement des modules dans le temps (vieillesse et poussières) ;

**Matière : découverte Energies renouvelables : le solaire photovoltaïque ESE M1  
USTOMB Département : ELN AN 2020**

**CHAPITRE 4 : Systèmes photovoltaïques**

- le rendement des cycles de charge et de décharge de la batterie (90%) ;
- le rendement du chargeur et de l'onduleur (de 90 à 95%) ;
- les pertes dans les câbles et connexions

Pour les systèmes avec parc batterie, le coefficient k est en général compris entre 0,55 et 0,75.  
La valeur approchée que l'on utilise pour les système avec batterie sera souvent de 0,65.

3 : Calcul de la taille du générateur photovoltaïque (ensemble des panneaux) à installer.  
La puissance crête  $P_{opt}$  des panneaux à installer dépend de l'irradiation du lieu d'installation.  
On la calcule en appliquant la formule suivante :

$$P_c = \frac{E_p}{k \cdot I_r}$$

$P_c$  : puissance crête en Watt crête ( $W_c$ )

$E_p$  : énergie produite par jour ( $Wh/j$ )

$I_r$  : irradiation quotidienne moyenne annuelle ( $kWh/m^2 \cdot jour$ )

Ce qui revient à écrire :

$$P_c = \frac{E_c}{k \cdot I_r}$$

$P_c$  : puissance crête en Watt crête ( $W_c$ )

$E_c$  : énergie consommée par jour ( $Wh/j$ )

$I_r$  : irradiation quotidienne moyenne annuelle ( $kWh/m^2 \cdot jour$ )

Dimensionnement du parc batteries :

Pour réaliser le dimensionnement de la batterie, on procède de la façon suivante :

Etape 1 : On calcule l'énergie consommée ( $E_c$ ) par les différents récepteurs

Etape 2 : On détermine le nombre de jour d'autonomie nécessaire

Etape 3 : On détermine la profondeur de décharge acceptable pour le type de batterie utilisée

Etape 4 : On calcule la capacité ( $C$ ) de la batterie en appliquant la formule ci-dessous

$$C = \frac{E_c \cdot N}{D \cdot U}$$

$C$  : capacité de la batterie en ampère.heure ( $Ah$ )

$E_c$  : énergie consommée par jour ( $Wh/j$ )

$N$  : nombre de jour d'autonomie

$D$  : décharge maximale admissible (0,8 pour les batteries au plomb)

$U$  : tension de la batterie ( $V$ )

**Matière : découverte Energies renouvelables : le solaire photovoltaïque ESE M1**  
**USTOMB Département : ELN AN 2020**  
**CHAPITRE 4 : Systèmes photovoltaïques**

**REFERENCES**

[http://www.photovoltaique.guidenr.fr/cours-photovoltaique-2011/II\\_conversion-alternatif-continu.php](http://www.photovoltaique.guidenr.fr/cours-photovoltaique-2011/II_conversion-alternatif-continu.php).

[http://www.photovoltaique.guidenr.fr/cours-photovoltaique-autonome/VI\\_dimensionnement-installation-photovoltaique-autonome.php](http://www.photovoltaique.guidenr.fr/cours-photovoltaique-autonome/VI_dimensionnement-installation-photovoltaique-autonome.php).

Aurian Arrigoni & Louis-Paul Hayoun, Les installations photovoltaïques, Editions Eyrolles, 2011.

Séverine Busquet, "Etude d'un système autonome de production d'énergie couplant un champ photovoltaïque, un électrolyseur et une pile à combustible : réalisation d'un banc d'essai et modélisation", Thèse Energétique, CENERG, Mines de Paris, 2003.

Ali M. Eltamaly, Almoataz Y. Abdelaziz, Modern Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Energy Systems, *Green Energy and Technology*, Springer International Publishing , 2020.

FZ ZERHOUNI , DEVELOPPEMENT ET OPTIMISATION D'UN GENERATEUR ENERGETIQUE HYBRIDE PROPRE A BASE DE PV-PAC, doctorat ES SCIENCES en ELN, Département d'ELN, faculté du génie électrique, USTOMB, 2009.

SITES CONSULTES EN JUIN 2020.