

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Des Sciences et de le Technologie d'Oran  
Mohamed Boudiaf(USTO.MB)

**FACULTE DES SCIENCES**  
**DEPARTEMENT DE PHYSIQUE**

**MEMOIRE**  
**Pour l'obtention du diplôme de Magister**

**Spécialité** : Physique  
**Option** : Rayonnement et Matière

**Présenté Par :**

**YACINE Fouad**

**Thème**

**ETUDE DES NOUVELLES GENERATIONS DE CELLULES  
PHOTOVOLTAIQUES.**

**Président du jury**: M. BELASRI Ahmed, Professeur.

**Rapporteur** : M. BENABADJI Nouredine, Maitre Conférences A.

**Examineur** : M. ABDELAOUI Mustapha, Maitre Conférences A(co- Rapporteur).

**Examineur** : M. HASSINI Abdelatif, Maitre Conférences A.

**Invité** : M. BOUADI Abed, Maitre Assistant A.

**Année Universitaire : 2010/2011**

## *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire à :*

*Mes chers parents. Toute ma famille.*

*Tous qui donnent une contribution de réalisation de ce mémoire.*

*YACINE FOUAD.*

## ***Remerciements***

*Le modeste travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au laboratoire du rayonnement et matière LAAR à l'université des sciences et de technologie d'Oran (USTO.MB), sous la direction de Monsieur le professeur **BELBACHIR**, Je le remercie d'avoir accueilli dans son laboratoire.*

*Je suis très reconnaissant, à Monsieur **BENABADJI Nouredine** Maitre Conférences A, d'avoir accepté de diriger ce travail et je lui exprime ma très profonde reconnaissance pour sa grande gentillesse, son soutien et sa disponibilité.*

*J'exprime aussi mes sincères remerciements à Monsieur **BELASRI Ahmed**, Professeur, Monsieur **ABDELAOUI Mustapha**, Maitre Conférences A (co- Rapporteur), à Monsieur **HASSINI Abdelatif**, Maitre Conférences A, et à Monsieur **BOUADI Abed**, Maitre Assistant A, pour l'intérêt qu'ils ont manifesté pour ce travail en acceptant d'être les jurys de cette thèse et d'examiner ce mémoire.*

---

**Introduction Générale**.....1

**Chapitre I : L'ÉNERGIE SOLAIRE**

<b>I.1 Le Défi Energétique :</b>	2
I.1.1. Besoins énergétiques mondiaux, un enjeu majeur	2
I.1.2. Des énergies polluantes et non-renouvelables	3
- L'énergie nucléaire	4
- Les énergies fossiles et leur impact sur le climat	4
-Des énergies aux ressources limitées	6
I.1.3. Les énergies renouvelables : un rôle à jouer	7
- Le gisement éolien	7
- Le gisement solaire	7
<b>I.2 Définition générale:</b>	9
I.2.1. Coordonnées terrestres	9
I-2-1-A/ Longitude	9
I-2-1-B /La latitude	9
I-2-1-C/ L'altitude	9
I.2.2. Rappels de quelques éléments de géométrie	10
I-2-1-A/ les coordonnées horaires	11
I-2-1-B / les coordonnées horizontales	11
I-2-1-C// La déclinaison du Soleil	11
I.2.3. Le soleil	12
- Caractéristiques générales	12
- Son énergie : Energie « humainement » inépuisable	13
I.2.4. Le rayonnement solaire	15
- Différents types de rayonnement	15
- Répartition géographique du rayonnement solaire	16
- Caractéristique de rayonnement solaire	16
- Quelques grandeurs photométriques	18

## **Chapitre II : CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES**

<b>II.1 Principe de l'effet photovoltaïque</b> .....	20
II.1.1. Histoire du photovoltaïque .....	20
II.1.2. Les différents types de centrales photovoltaïques.....	21
II.1.2. a) Les systèmes photovoltaïques autonomes .....	22
II.1.2. b) Les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau .....	23
II.1.2. c) Les éléments d'une centrale photovoltaïque raccordée au réseau.....	24
- Couplage des modules photovoltaïques avec la charge.....	24
- Batteries .....	25
- Régulateur de charge .....	25
- Convertisseur .....	25
II.1.2. d) Panneaux solaires ou capteurs photovoltaïques.....	25
<b>II.2 Dimensionnement de projets photovoltaïques:</b> .....	27
II.2.1. Besoins en électricité .....	27
II.2.2. Eligibilité des projets et subventions .....	27
II.2.3. Estimation de la production .....	27
II.2.4. Les filières technologiques du photovoltaïque .....	28
II.2.5. Aides à la décision .....	29
<b>II.3 Types de cellules photovoltaïques</b> .....	29
II.3.1. Les cellules photovoltaïques inorganiques .....	29
II.3.1.1. La filière silicium .....	29
II.3.1.2. Cellules couches minces : les chalcogénures.....	32
II.3.1.3. Les cellules III-V multijonctions.....	32
II.3.1.4. Les cellules nanocristallines à colorant (ou cellules de Grätzel).....	33
II.3.2. Les cellules photovoltaïques organiques .....	33
- Différents exemples pour différentes Types de cellules .....	34
- Situation nationale .....	35

## **Chapitre III : L'énergie photovoltaïque organique**

<b>III.1 Conversion d'énergie : les différentes technologies solaires</b> .....	36
III.1.1. Solaire à concentration thermodynamique .....	36

---

III.1.2. Solaire thermique .....	36
III.1.3. Solaire Photovoltaïque .....	37
<b>III.2 Les Semi-Conducteurs Organiques .....</b>	<b>37</b>
III.2.1. Nature des semi-conducteurs organiques.. .....	37
III.2.2. Polymères semi-conducteurs les plus étudiés.....	37
III.2.3. bande énergétique des polymères semi-conducteurs.....	38
III.2.4. Le dopage : obtention de polymères conducteurs.....	39
III.2.5. Amélioration de la mise en forme des polymères conjugués.....	41
<b>III.3 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque organique.....</b>	<b>42</b>
III.3.1. Rappel sur le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque inorganique.....	42
- L'absorption optique des semi-conducteurs inorganiques.....	42
- Créations des charges. Les excitons.....	44
- Mobilité et collecte des porteurs de charges .....	44
III.3.2. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque organique .....	45
- Absorption des photons – création des excitons .....	45
- Diffusion des excitons.....	46
- Dissociation des excitons .....	47
- Transport des charges jusqu'aux électrodes .....	48
<b>III.4 Caractéristique courant-tension et paramètres des cellules solaires organiques.....</b>	<b>49</b>
III.4.1. Caractéristique courant-tension I(V).....	49
III.4.2. Courant de court-circuit $I_{cc}$ .....	50
III.4.3. Tension à circuit ouvert $V_{co}$ .....	50
III.4.4. Facteur de forme FF .....	50
III.4.5. Rendement quantique externe EQE.....	50
III.4.6. Rendement de conversion en puissance $\eta$ .....	51
III.4.7. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque organique .....	52

---

## **Chapitre IV : Caractérisation d'un module PV**

<b>IV.1 Partie théorique</b> .....	54
IV.1.1. Caractéristiques I(V).....	54
IV.1.2. L'influence de la résistance Rsh .....	55
IV.1.3. L'influence de la résistance shunt sur la puissance dissipée .....	56
IV.1.4. L'influence de la température T .....	57
IV.1.5. Caractéristiques I(V) et P(V) d'un panneau photovoltaïque .....	58
<b>IV.2 Partie simulation et validation du programme développé</b> .....	60
IV.2.1. Description Hardware.....	61
IV.2.1. a) Afficheur 04 digits .....	61
IV.2.1. b) Les Capteurs .....	61
IV.2.1. c) Le microcontrôleur PIC16F876A .....	63
IV.2.2 .Définition des différentes parties des vues réalisées .....	66
<b><u>Conclusion Générale</u></b> .....	70
<b><u>Annexe</u></b> .....	
<b><u>Références Bibliographie</u></b> .....	

<b>Figure I-1 :</b> Evolution de la consommation d'énergie mondiale entre 1973 et 2007 En MTEP, et répartition par source.....	03
<b>Figure I-2 :</b> Température globale moyenne de 1850 à nos jour .....	04
<b>Figure I-3 :</b> Evolution du taux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère terrestre Dans les dernières 10000 années.....	05
<b>Figure I-4 :</b> Exemples de fermes solaires - Calvià , Mallorca, Spain (image de gauche) Et Lucainena de las Torres, Andalusia, Spain (image de droite) .....	09
<b>Figure I-5 :</b> coordonnées terrestre .....	10
<b>Figure I-6 :</b> le mouvement de la terre autour de soleil.....	10
<b>Figure I-7:</b> les coordonnées horaires et horizontales.....	11
<b>Figure I-8 :</b> spectre solaire .....	13
<b>Figure I-9 :</b> la photosphère .....	14
<b>Figure I-10:</b> Rayonnement global .....	15
<b>Figure I-11:</b> Répartition de l'énergie solaire dans le monde .....	16
<b>Figure I-12:</b> le rayonnement solaire et le nombre d'air masse .....	17
<b>Figure I-13 :</b> Représentation graphique des spectres AM0, AM1, 5 .....	18
<b>Figure II-1 :</b> Production mondiale d'électricité d'origine photovoltaïque .....	21
<b>Figure II-2:</b> Différence entre la consommation domestique et la production photovoltaïque au cours d'une journée .....	22
<b>Figure II-3 :</b> Exemple de suiveur solaire (sun tracker) .....	23
<b>Figure II-4:</b> Schéma de principe d'une installation raccordée au réseau .....	24
<b>Figure II-5 :</b> Principe de fonctionnement d'un panneau photovoltaïque .....	25
<b>Figure II-6:</b> Rendement (en %) des différentes technologies de cellules photovoltaïques En laboratoire .....	26
<b>Figure II-7:</b> Répartition de la production photovoltaïque mondiale en 2006 en % Et suivant les différentes filières.....	28
<b>Figure II-8 :</b> Répartition des matériaux sur le marché mondial Du photovoltaïque .....	30



<b>Figure III-1</b> : Structures chimiques des principales familles de polymères conjugués .....	38
<b>Figure III-2</b> : Conductivités électroniques de polymères conjugués à divers taux de dopage..	40
<b>Figure III-3</b> : Structures chimiques de polymères conjugués substitués .....	41
<b>Figure III-4</b> : Diagramme de bandes d'énergie dans l'espace d'un semi-conducteur à Gap direct (a) et à gap indirect (b). .....	43
<b>Figure III-5</b> : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque organique. ....	46
<b>Figure III-6</b> : Conditions de dissociation de l'exciton ( $E_{ex} > PI - AE$ ). ....	47
<b>Figure III-7</b> : Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule Photovoltaïque .....	49
<b>Figure III-8</b> : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque organique .....	52
<b>Figure IV-1</b> : Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire .....	54
<b>Figure IV-2</b> : L'influence de la résistance shunt sur les caractéristiques courant-tension D'une cellule solaire .....	55
<b>Figure IV-3</b> : L'influence de la résistance shunt sur la puissance dissipée .....	56
<b>Figure IV-4</b> : L'influence de la température T sur les caractéristiques I(V) d'un Panneau PV .....	57
<b>Figure IV-5</b> : Aperçu de la carte .....	60
<b>Figure IV-6</b> : Schéma partiel de l'Afficheur 04 digits .....	61
<b>Figure IV-7</b> : Schéma partiel du Capteur de courant .....	62
<b>Figure IV-8</b> : Schéma partiel du Capteur de température .....	62
<b>Figure IV-9</b> : Le microcontrôleur PIC16F876A .....	63
<b>Figure IV-10</b> : Définition des dimensions de la feuille de travail .....	65
<b>Figure IV-11</b> : Définition des différentes parties de l'interface réalisée .....	66
<b>Figure IV-12</b> : l'interface de la carte sous PROTEUS .....	67
<b>Figure IV-13</b> : lancement de la simulation .....	67
<b>Figure IV-14</b> : Aperçu de la simulation de la carte .....	68
<b>Figure IV-15</b> : Aperçu de connexion avec la carte d'acquisition .....	68
<b>Figure IV-16</b> : Les différentes caractéristiques d'un module PV .....	69

# **INTRODUCTION GENERALE**

## Introduction Générale

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui, exposé à la lumière (photons), génère de l'électricité. C'est l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène.

Le courant obtenu est fonction de la lumière incidente. L'électricité produite est fonction de l'éclairement, la cellule photovoltaïque produit un courant continu.

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium (Si) et plus rarement d'autres semi-conducteurs : sélénure de cuivre et d'indium ( $\text{CuIn}(\text{Se})_2$  ou  $\text{CuInGa}(\text{Se})_2$ ), tellure de cadmium (CdTe), etc.

Elles se présentent généralement sous la forme de fines plaques d'une dizaine de centimètres de côté, prises en sandwich entre deux contacts métalliques, pour une épaisseur de l'ordre du millimètre.

Les cellules sont souvent réunies dans des modules solaires photovoltaïques ou panneaux solaires, en fonction de la puissance recherchée.

**CHAPITRE I**  
**L'énergie Solaire**

## **Introduction :**

Comme pour toutes les applications de l'énergie solaire, une bonne connaissance du gisement solaire est nécessaire à l'étude des systèmes photovoltaïques, surtout dans une optique de développement des marchés et des technologies. Par gisement solaire, on entend ici les différentes caractéristiques du rayonnement solaire, susceptibles d'influencer les performances d'un système en un lieu donné. Dans un premier temps, on rappellera quelques données de base concernant les différentes énergies qui existe ainsi leur spécification en suite en fait une définition générale concernant coordonnées terrestres et quelques éléments de géométrie et en termine par une brève description des différents types de rayonnement.

Les applications photovoltaïques requièrent des présentations spécifiques des données de rayonnement, qui peuvent être différentes selon le niveau de détail des études envisagées, mais aussi selon le système projeté (selon qu'il est, par exemple, autonome ou relié au réseau).

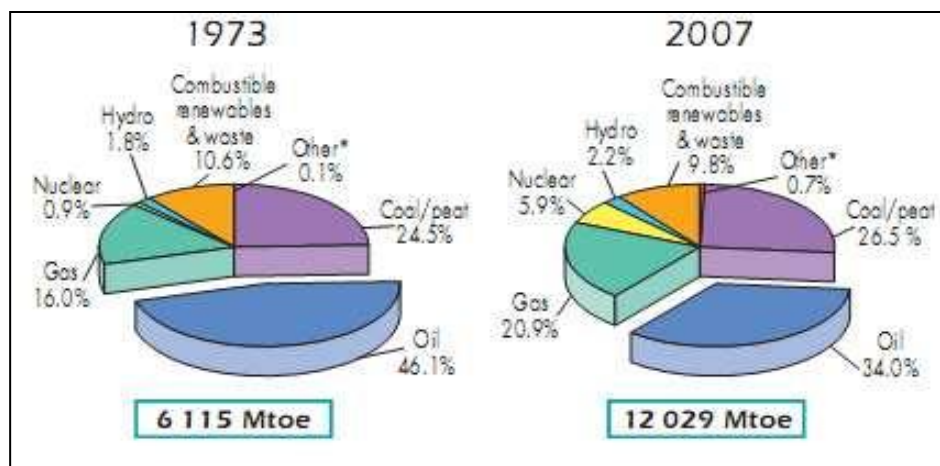
[1]

## **I.1. Le Défi Energétique :**

### **I.1.1. Besoins énergétiques mondiaux, un enjeu majeur :**

Le scénario de référence proposé par l'agence **IEA** (*International Energy Agency*) montre qu'un accroissement de 40% des besoins en énergie surviendra entre aujourd'hui et 2030, si aucune politique gouvernementale forte n'est mise en place. Plus d'un tiers de cette croissance de demande serait alors soutenu par l'usage de charbon.

La période de 1973 à nos jours a connu un doublement de la consommation d'énergie dans le monde, passant de 6115 à 12029 MTEP, (voir Figure 1), alors que la consommation dans l'**OCDE** (Organisation de Coopération et de Développement Economique) n'a augmenté que de 50%, passant de 3724 à 5433 MTEP. Cette différence de croissance tient au développement exponentiel des économies des pays émergents, petits consommateurs d'énergie aujourd'hui, mais grands consommateurs de demain du fait de leur forte croissance et de leur industrialisation. A ces disparités de croissance de la demande énergétique s'ajoutent des disparités dans le mix énergétique. On désigne par mix énergétique la répartition par source de la production d'énergie dans un pays. Les pays émergents ont en effet largement plus recours aux énergies fossiles que les pays de l'**OCDE**, qui ont misé pour certains d'entre eux sur l'énergie nucléaire, et commencent à se tourner vers les énergies renouvelables.



**Figure I-1 :** Evolution de la consommation d'énergie mondiale entre 1973 et 2007 en MTEP, et répartition par source

La croissance de la demande en énergie demandera des réponses fortes de la part des états. Produire 73% d'énergie en plus qu'aujourd'hui d'ici à 2030 demandera des investissements énormes que le monde sera amené à fournir. Mais la question se pose plutôt en terme de mix énergétique : vers quelles sources d'énergie les états se tourneront-ils afin de répondre à la hausse de la demande ? A ces questions s'ajoutent des facteurs géopolitiques complexes : choix politiques (énergie nucléaire, encouragement de telle ou telle source d'énergie via des subventions...) mais aussi situation géographique (accès à l'énergie géothermique, hydroélectrique, gisement éolien important...) et enfin des choix stratégiques (indépendance énergétique).

### I.1.2. Des énergies polluantes et non-renouvelables :

L'Homme sait depuis des millénaires tirer de la Terre toutes sortes de matériaux, dont certains lui ont servi et lui servent encore à produire de l'énergie. Par essence non-renouvelables, ces ressources commencent à s'épuiser et le scénario d'une pénurie mondiale de certaines d'entre elles ne fait plus partie de la science-fiction. Mais nombre des sources d'énergie utilisées par l'homme possède des contreparties importantes.

➤ **L'énergie nucléaire :**

Les accidents d'exploitation de centrales nucléaires de Tchernobyl en Ukraine, Three Miles Island aux U.S.A et le dernier de Fukushima au Japon ont jeté une ombre sur cette technologie que les progrès en terme de fiabilité et de sécurité ont du mal à dissiper.

Le problème de la gestion des déchets reste entier : on enfouit aujourd'hui des déchets radioactifs dont la durée de demi-vie est de l'ordre de 10000 ans, et d'un million d'années pour certains. Qu'advient-il d'eux dans un siècle, ou un millénaire ? La stabilité géologique d'une région est-elle assurée sur d'aussi longues périodes ?

Le point positif de cette technologie est qu'elle ne rejette pas de gaz à effet de serre autre que la vapeur d'eau dans l'atmosphère. Les opinions publiques dans les pays occidentaux restent donc divisées sur son utilisation car le risque est parfois jugé trop grand pour le bénéfice obtenu.

➤ **Les énergies fossiles et leur impact sur le climat :**

Le cas des énergies fossiles est aujourd'hui au centre de nombreux débats au niveau mondial. Ce sont le charbon, le pétrole et le gaz trouvés dans des gisements souterrains issus de la décomposition d'organismes vieux de millions d'années. [9]

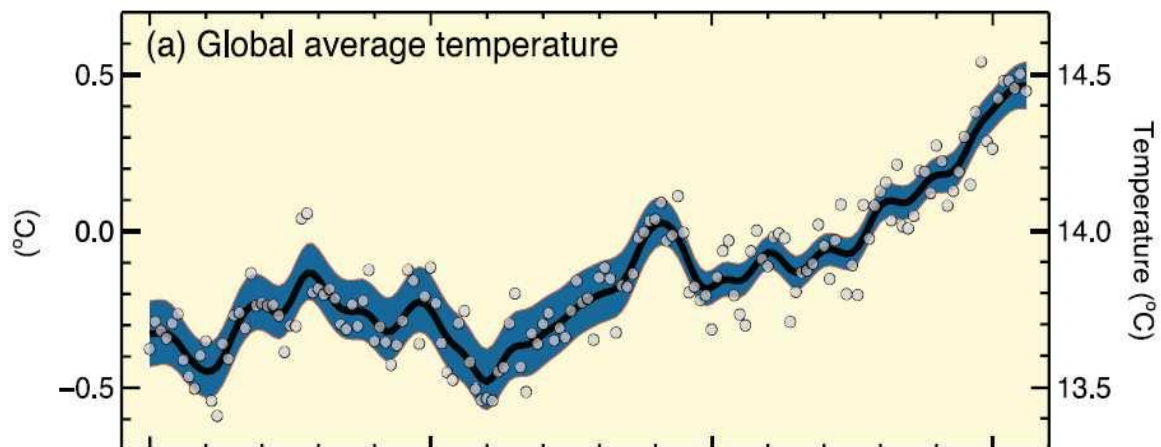
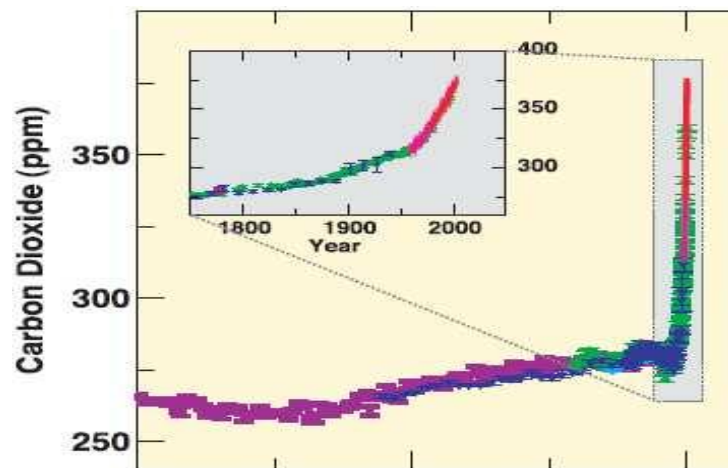


Figure I-2 : Température globale moyenne de 1850 à nos jours

On observe depuis le début du 20<sup>e</sup> siècle un réchauffement climatique global. Entre cette date et la fin du 20<sup>ème</sup> siècle, la température moyenne globale a en effet augmenté de près de 1°C. Ce réchauffement est en corrélation avec une hausse du taux de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, hausse attribuée par une majorité de scientifiques aux activités humaines (**Figure 3**). Ce CO<sub>2</sub> participe à l'effet de serre, soit le confinement des rayonnements solaires dans l'atmosphère terrestre. Au lieu d'être réfléchi dans l'espace, certains rayonnements émis par le sol sont captés par le CO<sub>2</sub>, participant ainsi au réchauffement global de l'atmosphère.



**Figure I-3 :** Evolution du taux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère terrestre  
Dans les dernières 10000 années

Ce réchauffement a de plus entraîné une fonte des calottes polaires et un réchauffement global des océans, entraînant une hausse du niveau des mers de près de 15 cm dans ce même laps de temps. La fonte des glaces participe également en soi au réchauffement climatique. Les rayons normalement réfléchis par la glace et la neige sont absorbés par les océans mis à nus. Le réchauffement climatique s'accélère donc par ce biais.

On peut prévoir la nature des conséquences de ce réchauffement mais difficilement leur ampleur. L'Organisation Internationale des Migrations a publié un rapport en 2008 qui souligne le développement des flux migratoires dus au changement climatique. D'ici à 2050, ces migrations devraient concerner 200 millions de personnes. Le Rapport met cependant en garde sur les disparités dans les chiffres présentés par les experts, le chiffre des émigrants se situant



entre 50 et 800 millions de personnes selon les études prises en compte. Ces migrations seront causées par l'engloutissement des atolls dont l'altitude par rapport au niveau de la mer est trop faible, ou encore des populations fuyant les zones côtières trop souvent frappées par les phénomènes météorologiques violents, qui ont doublés en deux décennies. Ces personnes pourraient entraîner des instabilités au niveau régional, national voir international en créant des déséquilibres démographiques et en venant s'ajouter aux migrations économiques. [10]

La croissance du nombre de catastrophes naturelles liées au climat entraîne également des coûts de plus en plus importants pour réparer les habitations et infrastructures détruites. On peut citer l'exemple du cyclone Gonu en 2007. Outre le fait que ce cyclone frappa une région peu habituée à ce genre d'évènement météorologique, il battit alors tous les records pour la mer d'Oman en termes de vitesse de vent (plus de 240 km/h), et on estime le coût total de ses dévastations à plus de 200 millions de dollars US.

➤ **Des énergies aux ressources limitées :**

On peut trouver différents chiffres sur les ressources disponibles en uranium (en fonction des hypothèses prises sur l'évolution du mix énergétique mondial et le cours du métal), mais le fait certain est que ces ressources sont limitées, à seulement 60 ans dans l'état actuel des connaissances et du prix du marché. De nouvelles technologies de réacteurs et surtout de nouveaux cours de la matière première pourrait rendre les ressources connues fiables pour des millénaires.

Le charbon est l'énergie fossile la plus disponible. L'Agence Internationale de l'Energie estime que les réserves naturelles prouvées de charbon peuvent durer encore 137 ans au rythme de croissance actuel.

Le cas du pétrole est plus inquiétant, car il ne touche pas seulement le secteur de l'industrie mais aussi celui des transports. Les références à analyser ici sont très hétéroclites. Les organismes qui les émettent sont aussi bien des **ONG** (GreenPeace...) que des instances internationales (Agence Internationale pour l'Energie...) ou nationales. Dans ce dernier cas, on notera l'étude publiée par le UK Energy Research Center (émanation du gouvernement anglais), qui tient compte de plus de 500 études portant sur les prévisions de consommation de l'industrie et la production du pétrole. [11]

✓ Les conclusions de ce rapport sont les suivantes : le pic de production de pétrole arrivera certainement avant 2030, il existe un risque prononcé qu'il adienne même avant 2020. Les études éloignant ce pic au delà de 2030 sont jugées « au mieux optimistes et au pire improbables ». Contrairement à ce que l'on pourrait croire, un tel scénario ne signerait pas la fin de l'émission de gaz à effet de serre à outrance. Le rapport s'inquiète en effet, en cas de pénurie de pétrole, à un retour à une industrie tirant son énergie du charbon, et souligne l'importance d'investir dès maintenant dans des alternatives renouvelables afin d'éviter à tout prix ce scénario. [11]

Une fois le pic de production passé, il est impossible de prédire combien de temps l'épuisement des ressources prendra. Il sera fonction principalement de la vitesse avec laquelle les industries et les transports se tourneront vers d'autres énergies et les cours du pétrole, imprévisibles du fait du manque de données sur l'offre et la demande à cette échéance de 2030. Le gaz enfin devrait connaître son pic de production après 2030, d'après l'**US Energy Information Administration**.

### I.1.3. Les énergies renouvelables : un rôle à jouer :

Les gisements fossiles ne sont pas les seuls à pouvoir soutenir la demande croissante du monde en énergie. De plus, l'urgence de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> comme préconisé par le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (**GIEC**) pousse les nations à développer les énergies renouvelables, peu ou pas émettrices de gaz à effet de serre. Les gisements éolien et solaire devraient être les principales sources d'énergie renouvelables dans le siècle à venir, et pourraient répondre en partie à ces problématiques.

#### ➤ Le gisement éolien :

L'énergie éolienne pourra jouer un rôle non négligeable dans le mix énergétique de demain. Les projections du scénario énergétique tendanciel à 2030 pour la France indiquent une production éolienne de 43 GWh.

#### ➤ Le gisement solaire :

Chaque année, la Terre reçoit 1,56.10 kWh en énergie solaire, ce qui représente plus de 10000 fois la consommation mondiale d'électricité ! Il existe deux façons d'exploiter cet incroyable gisement : convertir le rayonnement en chaleur puis (éventuellement) en électricité (voie thermodynamique) ou convertir le rayonnement directement en électricité (voie photovoltaïque).

- Dans le cas de la voie thermodynamique, on peut capter la lumière avec des matériaux absorbants (typiquement noirs) qui vont convertir la lumière en chaleur. Les ballons d'eau chaude solaires fonctionnent ainsi. Un panneau absorbant est mis sur le toit de la maison et l'énergie thermique récupérée sert à chauffer l'eau du robinet. On peut atteindre des températures comprises entre 60 et 80°C de la sorte.

Une approche plus industrielle consiste à disposer des miroirs concentrateurs autour d'un dispositif contenant un fluide caloporteur. Le fluide caloporteur, mis en contact avec un second réseau d'eau via des échangeurs thermiques fait passer celle-ci en phase vapeur, ce qui permet de faire tourner une turbine. De telles centrales existent déjà et permettent une production d'électricité de l'ordre de quelques mégawatts à plusieurs centaines de mégawatts (cas de la centrale **de Luz Solar Energy** en Californie). Des bacs de sels fondus permettent le stockage de l'énergie thermique excédentaire (jusqu'à plus de 550°C) et ainsi de lisser la production avec la possibilité de continuer de produire de l'électricité durant la nuit. On parle, pour ces technologies, de centrales solaires thermodynamiques.

- Dans le cas de la voie photovoltaïque, on convertit directement 3 à 40% de l'énergie lumineuse incidente en courant continu. La force de cette approche est la simplicité de mise en œuvre comparée à la précédente. Les faiblesses sont les mêmes : le problème du stockage de l'énergie produite lors de la journée ou des journées ensoleillées pour continuer de la distribuer la nuit ou les journées où la couverture nuageuse est trop importante pour permettre un fonctionnement correct des cellules.

L'aspect intéressant de ce mode de production vient du peu d'entretien que nécessite un panneau photovoltaïque une fois posé, et le fait que toutes les surfaces exposées au soleil sont candidates pour recevoir de tels panneaux. Ces deux points donnent un avantage significatif à filière solaire photovoltaïque par rapport à la filière solaire thermodynamique. Là où la première fonctionne sans entretien, la seconde est une usine à part entière, avec l'entretien et les risques industriels que cela implique. Là où la première ne nécessite qu'un toit, la seconde demande un terrain découvert pour les concentrateurs et le procédé en lui-même.

On comprend que l'avantage de l'énergie solaire photovoltaïque tient donc dans le fait qu'elle peut utiliser des surfaces inutilisées jusque là, et ne nécessite pas en soi de surface au sol.

Néanmoins, cela n'empêche pas de grandes fermes photovoltaïques d'être créées (Figure 4).



**Figure I-4 :** Exemples de fermes solaires - Calvià , Mallorca, Spain (image de gauche)  
Et Lucainena de las Torres, Andalusia, Spain (image de droite)

## **I.2. Définition générale :**

I.2.1. Coordonnées terrestres : Tout point de la surface terrestre est repérée par ces coordonnées :

### **I-2-1-A/ Longitude :**

La longitude d'un lieu correspond à l'angle formé par deux plans méridiens (passant par l'axe des pôles), l'un étant pris comme origine (méridien de Greenwich  $0^\circ$ ) et l'autre déterminé par le lieu envisagé. La longitude sera désignée ici par la lettre «  $\lambda$  ».

Longitude OUEST  $\lambda < 0^\circ$

Longitude EST  $\lambda > 0^\circ$

Un écart de  $1^\circ$  de longitude correspond à un écart de 4 minutes de temps légitime. [5]

➤ Pour Oran la longitude est de :  $0^\circ 642'$ .

### **I-2-1-B /La latitude :**

C'est l'angle entre l'équateur et le rayon de la terre qui passé par le lieu considéré. Pour la ville d'Oran la latitude est environ de  $35^\circ 691'$ .

### **I-2-1-C/ L'altitude :**

L'altitude d'un point correspond à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique (niveau moyen de la mer), on l'exprime généralement en mètre. [5]

➤ Pour Oran Altitude est environ 60 m

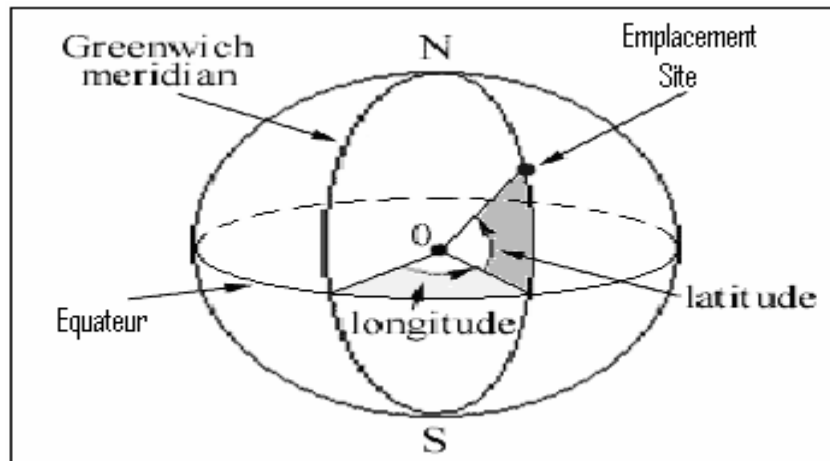


Figure I- 5 : coordonnées terrestre [4].

### I.2.2. Rappels de quelques éléments de géométrie :

La trajectoire de la terre autour du soleil s'appelle « l'elliptique ». La distance terre soleil ne varie que  $\pm 1,7\%$  par rapport à sa valeur moyenne qui est de  $1,49675 \cdot 10^8$  km. Cette distance est minimale au début de janvier et maximale au début de juillet.

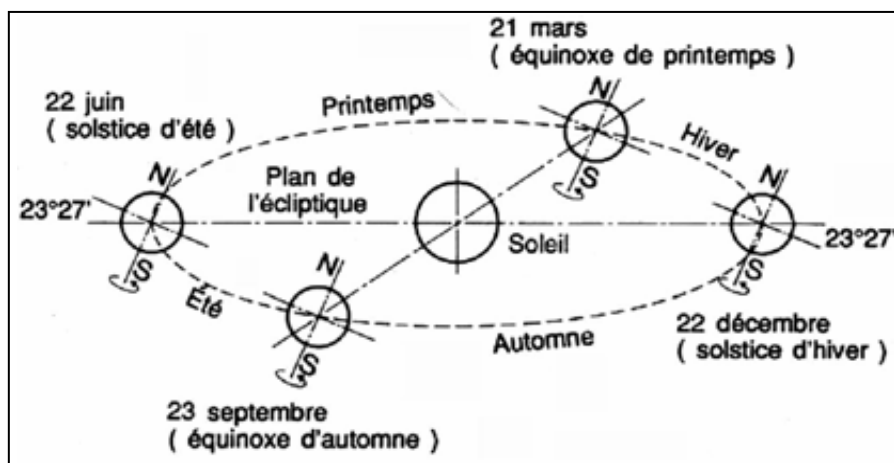


Figure I-6 : le mouvement de la terre autour de soleil [4]

**I-2-2-A/ les coordonnées horaires :**

Les coordonnées horaires dont le repère est donné par l'axe des pôles et le plan de l'équateur, le méridien du lieu étant pris comme origine. Chaque point de l'espace est repéré par sa déclinaison  $\delta$  et son angle horaire  $\omega$ . [4]

**I-2-2-B/ les coordonnées horizontales :**

Les coordonnées horizontales dont le repère est donné par la verticale du lieu (zénith) et le plan de l'horizon. Le méridien du lieu est encore utilisé comme origine. Chaque point de l'espace est repéré par sa hauteur  $\gamma$  et son azimut  $\psi$ . [4]

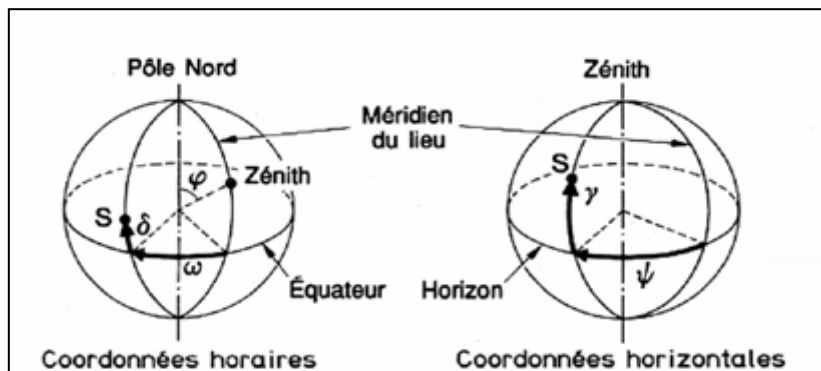
**I-2-2-C/ La déclinaison du Soleil :**

L'angle du zénith avec le plan équatorial est la latitude  $\phi$  du lieu. La déclinaison du Soleil est l'angle de la droite Terre Soleil avec le plan équatorial. Elle varie entre  $+23^{\circ} 27'$  (au solstice d'été, 22 juin) et  $-23^{\circ} 27'$  (au solstice d'hiver, 22 décembre) ; sa valeur est nulle aux équinoxes (21 mars et 23 septembre) .La valeur de la déclinaison au jour  $J$  (compté à partir du début de l'année) est approximée, à  $1^{\circ}$  près, par la formule :

$$\delta = 23.45 \sin (0.986J - 80^{\circ}) \dots\dots\dots (I-1)$$

Pour un jour fixé, la déclinaison peut être considérée comme constante ; sur la sphère céleste, le Soleil décrit alors un petit cercle, parallèle au plan de l'équateur, avec une vitesse angulaire constante de un tour par 24 heures. À un instant  $t$ , exprimé en temps solaire vrai, L'angle horaire du Soleil est simplement (en degrés) [4]

$$\omega = 15(t - 12) \dots\dots\dots (I-2)$$



**Figure I-7:** les coordonnées horaires et horizontales [4]

### I.2.3. Le soleil :

#### ➤ Caractéristiques générales :

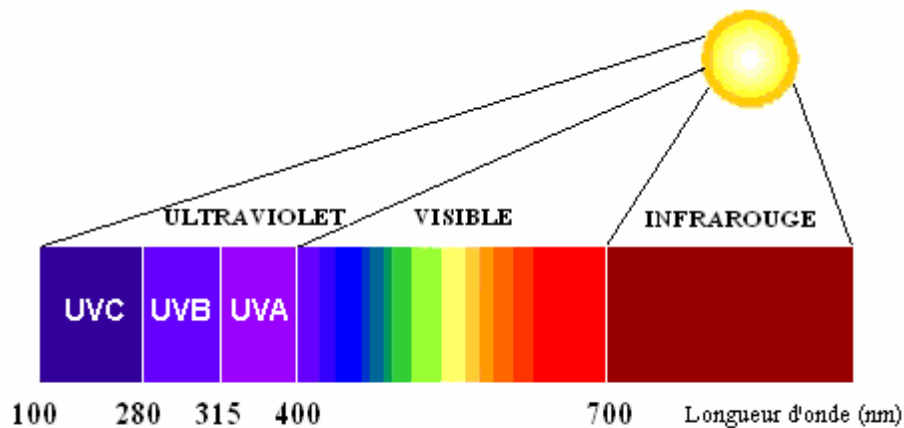
Le Soleil est une « petite » étoile, une boule de gaz, dont le diamètre est de 1 391 000 km, et qui est placée à 150 000 000 km de nous (périhélie : 147,1 millions de km et aphélie : 152,1 millions de km). Cette distance est si grande que sa lumière nous parvient 8 minutes après avoir été émise. N'oublions pas qu'elle voyage à la vitesse de 300 000 km/s, c'est-à-dire qu'elle fait 7 fois le tour de la Terre en 1 seconde.

Quant à son volume, il pourrait contenir 1 300 000 Terre. Avec une densité de 1,41 (contre 5,5 pour la Terre), sa masse est de 330 000 fois celle de la Terre ( $1,99 \cdot 10^{30}$  kg ou 2 milliards de milliards de milliards de tonnes). Il représente 99,867 % de la masse totale du système solaire, c'est-à-dire que l'ensemble de toutes les planètes et comètes ne représente que le millième du Soleil.

Il a déjà effectué 20 tours de la Galaxie en traversant des densités variables de poussières qui interceptent une partie du rayonnement qu'il nous envoie. Cela a dû certainement avoir des conséquences sur le climat terrestre.

Bien que sa lumière soit 600 000 fois plus élevée que celle de la Lune (son miroir), il n'est visible qu'à une distance de 60 al (année-lumière).

Notre Soleil est donc une énorme boule de gaz composée de 70% d'hydrogène et de 28% d'hélium, les 2% restants représentent la plupart des autres atomes présents dans l'univers. Il ne faut pas oublier non plus que les étoiles sont les usines qui créent tous les matériaux existant dans l'univers, à partir de l'hydrogène. Plus de 60 éléments chimiques furent identifiés, tel OH (radical hydroxyle), CH (radical méthylique) et aussi du titane, du plomb, du mercure, du chlore, du silicium, cuivre, calcium, indium, antimoine, zirconium, rhodium, etc... On trouve, par exemple, 9 atomes d'or pour 1000 milliards d'atomes d'hydrogène, soit la bagatelle de 10 millions de milliards de tonnes d'or ( $1 \cdot 10^{16}$  tonnes). Outre les atomes, l'analyse du spectre solaire a permis de découvrir des molécules complexes (figure 8).



**Figure I-8** : spectre solaire

Il n'a pas de surface à proprement parlé, mais la température de radiation, si on assimile le Soleil à un corps noir, est de 5 700 K selon la loi de Stephan (0 Kelvin = - 273,15 °C. C'est le zéro absolu; l'agitation moléculaire est stoppée), ce qui lui donne sa couleur jaune. La couleur est en relation directe avec la longueur d'onde, laquelle est liée à la température. Ainsi, en analysant la couleur, nous pouvons obtenir facilement sa température de radiation.

Au centre, il règne une pression 220 millions de fois plus grande que la pression atmosphérique de notre Terre (soit un gros pétrolier sur le bout du doigt !) qui est de 1033 hecto-pascal au niveau de la mer, entraînant une température de 15 millions K, et plusieurs Millions de degrés dans les couches supérieures de son atmosphère (> 10 000 km à plusieurs millions de km).

➤ **Son énergie : Energie « humainement » inépuisable :**

C'est une gigantesque bombe thermonucléaire dont la puissance, émise sous forme de photons, représente un chiffre considérable:  $3,82 \cdot 10^{26}$  Watts. C'est le résultat de la combustion de 596 millions de tonnes par seconde d'hydrogène convertis en 592 millions de tonnes par seconde d'hélium. La perte, 4 millions de tonnes/seconde, se traduit sous forme de rayonnement gamma. Chaque  $\text{cm}^2$  de sa surface émet une énergie de 6 kilowatts. Mais il n'arrive sur Terre que 5 milliardièmes ( $5 \cdot 10^{-9}$ ) de cette puissance.

Cette pile thermonucléaire fonctionne grâce à la transformation de 4 noyaux d'atomes d'hydrogène qui fusionnent pour fournir 1 noyau d'atome d'hélium avec la libération d'une énergie de 25000 mégawatts par gramme et par seconde (100 milliards de bombes à hydrogène de 1 mégatonne).



Cette énergie provient du centre. La pression comprime les noyaux d'hydrogène et permet ainsi la fusion. Il ne faut pas confondre la fusion avec la fission, qui casse les noyaux dans une bombe atomique. La fusion d'un gramme d'hydrogène libère 140 milliards de calories, la calorie étant la quantité de chaleur nécessaire pour faire passer un gramme d'eau de 15°C à 16°C. Cela correspond à 0,14 W/cm<sup>2</sup>.

Le transfert d'énergie du centre vers la surface s'effectue par rayonnement et par convection. La zone de convection est limitée par la photosphère, épaisse de 200 km, et appelée ainsi parce que presque la totalité du rayonnement visible provient d'elle. Elle a une apparence granuleuse, provoquée par la turbulence de la partie supérieure de la zone de convection. La taille d'une granule peut dépasser celle de la France et la durée de vie peut aller de 10 minutes à plus de 10 heures, selon la taille (photo ci-dessous). [6]

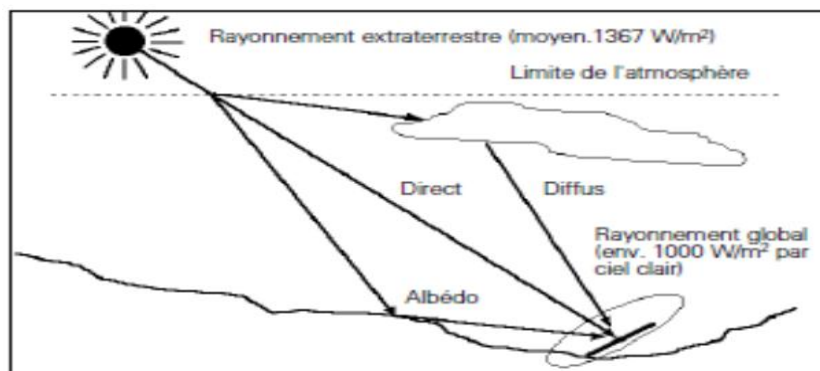


**Figure I-9** : la photosphère

Cette pression empêche les photons d'atteindre la surface dès leur création. Ainsi, ils mettent 2 millions d'années pour sortir des profondeurs du Soleil, tandis qu'il leur faut 8 minutes pour arriver sur Terre. Quant aux neutrinos, fabriqués en même temps, ils sortent instantanément. Absolument rien, n'est capable de les arrêter. Par conséquent, il est très difficile de les étudier. Ainsi, la recherche des neutrinos nous renseigne sur la lumière qui sortira dans 2 millions d'années du Soleil. Aujourd'hui, le taux est inférieur à ce que l'on attendait. Cela peut signifier que dans 2 millions d'années, la température sera plus basse avec des conséquences très importantes sur l'environnement terrestre.

#### I.2.4. Le rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire global est composé du rayonnement direct, du rayonnement diffus et de l'albédo (voir figure 10). L'évaluation d'installations solaires nécessite des données d'irradiance, c'est-à-dire du flux d'énergie incidente sur une surface donnée par unité de temps et de surface, exprimée en  $W/m^2$  ; ou son intégration sur une durée déterminée, l'irradiation en:  $kWh/m^2$



**Figure I-10:** Rayonnement global

- **Différents types de rayonnement :** En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes : [3][6]

##### **a) Le rayonnement direct :**

Le rayonnement direct est le rayonnement solaire incident sur un plan donné et provenant d'un angle solide centré sur le disque solaire. [3][6]

##### **b) Le rayonnement diffus :**

Le rayonnement diffus est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions.

La conversion photovoltaïque utilisant les modules utilise aussi bien le rayonnement direct que le rayonnement diffus. [3][6]

**c) L'albédo :**

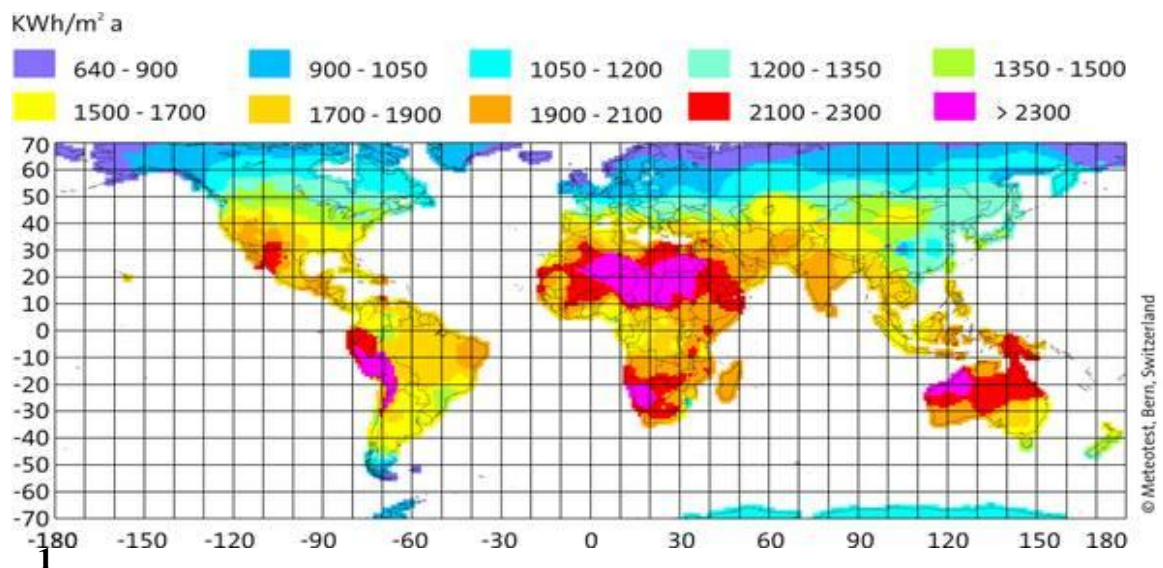
C'est la fraction d'un rayonnement incident diffusée ou réfléchi par un obstacle. Ce terme étant généralement réservé au sol aux nuages, c'est une valeur moyenne de leur réflectance pour le rayonnement considéré et pour tous les angles d'incidences possible. Par définition, le corps noir possède un albédo nul. [3][6]

**d) Le rayonnement global :**

C'est tout simplement la somme de ces diverses contributions. [3][6]

**➤ Répartition géographique du rayonnement solaire :**

Au niveau géographique, l'énergie solaire reçue est inégalement répartie. Dans les régions les plus chaudes du globe, l'ensoleillement annuel peut atteindre 2300 kWh/m<sup>2</sup>.an (Figure 11). En Europe centrale, l'ensoleillement moyen est de 1100 kWh/m<sup>2</sup>.an.



**Figure I-11:** Répartition de l'énergie solaire dans le monde

**➤ Caractéristique de rayonnement solaire :****a) L'atmosphère :**

Les couches atmosphériques modifient profondément la distribution spectrale du rayonnement solaire. Il subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite des phénomènes complexes d'absorption et de diffusion par les poussières et les aérosols

(les poussières des cendres, des micros cristaux, des micros gouttelette, des fumées de pollution industrielle dont la taille varie de 0.5 à 10 µm.) ainsi la couche d'ozone absorbe la majeure partie du rayonnement ultraviolet, tandis que la vapeur d'eau absorbe le rayonnement infrarouge. [3]

**b) Masse d'air :**

Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus son rayonnement est modifié.

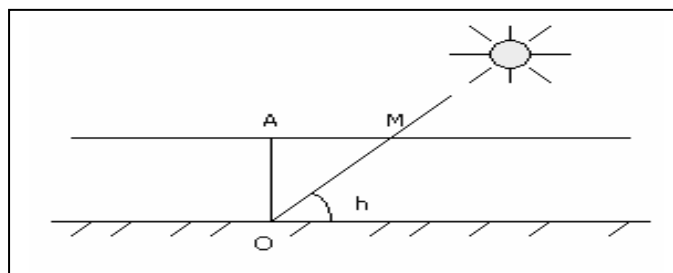
On appelle « masse d'air »,  $m$ , la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement directe pour atteindre le sol (par ciel clair), par rapport à une traversé vertical au niveau de la mer. Cela dépend de la hauteur angulaire du soleil ( $h$ ). à l'aide des points O, A et M, on écrit la longueur du trajet du soleil travers l'atmosphère :

$$OM = \frac{OA}{\sin h} \dots\dots\dots (I-3)$$

On appelle  $m$  le rapport  $OM / OA$ , soit  $1/\sin h$ .

A une pression  $p$  différente de 1013 mbar et à altitude  $z$  (km), on désignera par masse atmosphérique ou nombre d'air masse le nombre: [3]

$$m = \frac{p}{1013 \times \sin h} \exp\left(-\frac{z}{7.8}\right) \dots\dots\dots (I-4)$$



**Figure I-12:** le rayonnement solaire et le nombre d'air masse [4]

**Exemple :**

- Soleil au zénith (au niveau de la mer) on obtient les conditions :  $AM_1$  ( $m = 1/\sin 90^\circ = 1$ )
- Avec un soleil à  $30^\circ$  sur l'horizon, on obtient les conditions :  $AM_2$  ( $m = 1/\sin 30^\circ$ )
- par convention  $AM_0$ , désigne le rayonnement solaire hors atmosphère. [4]

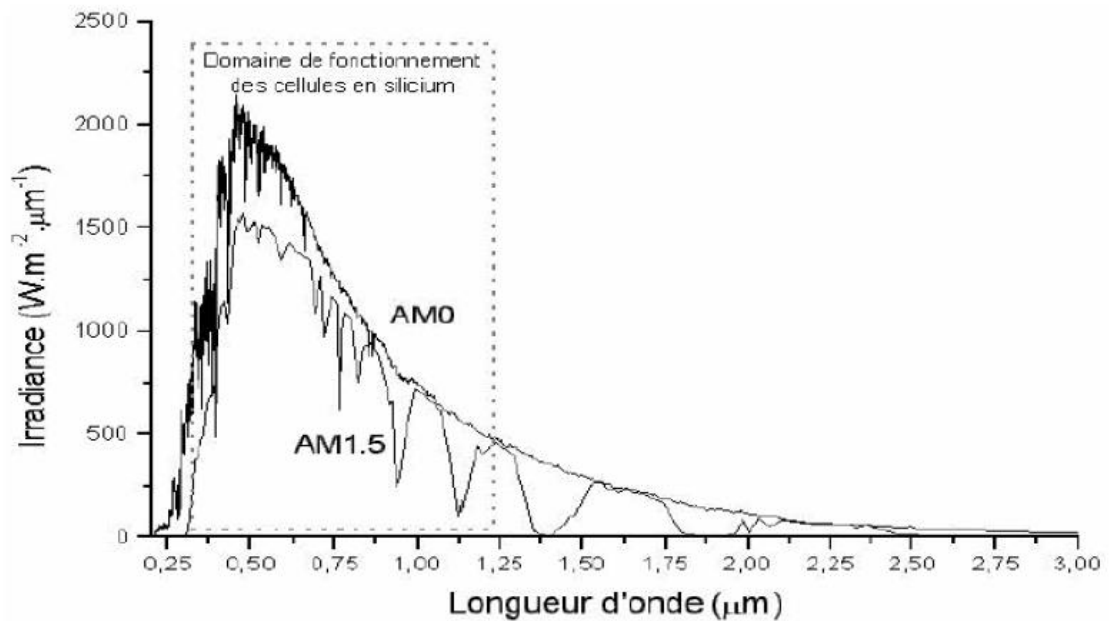


Figure I-13 : Représentation graphique des spectres AM0, AM1, 5

➤ **Quelques grandeurs photométriques :**

**a) Le Flux :**

Le flux lumineux est la valeur instantanée d'un débit de rayonnement. On peut mesurer le flux émis par une source, transporté par un faisceau ou encore reçu par un détecteur. Il peut être mesuré par la puissance qu'il transporte ou par le nombre de photons qu'il transporte par unité de temps, pour une surface  $S$  déterminée. Le flux lumineux s'exprime en Watts (W). [8]

**b) L'intensité Lumineuse :**

L'intensité  $I$  d'une source de rayonnement est le rapport entre le flux  $d\Phi_s$  qu'elle émet dans un petit angle solide donné et la valeur de celui-ci.  $I$  est en  $\text{w/sr}$ . [8]

**c) L'éclairement :**

L'éclairement  $E$  est la valeur locale du rapport entre le flux reçu par une surface élémentaire d'un récepteur et l'aire de cette surface, soit : [8]

$$E = \frac{d\phi}{ds} \dots\dots\dots (I-5)$$

$E$  est en  $W/m^2$ .

**d) L'exposition :**

L'exposition  $H$  d'une surface réceptrice en un point donné est l'intégrale de l'éclairement en ce point pendant un intervalle de temps donné : [8]

$$H = \int E dt \dots\dots\dots (I-6)$$

$H$  est donc en  $J.m^2$ .

**e) La Luminance :**

Considérons une source de faible surface  $dS$  entourant un point  $O$ . Soit  $dI$  l'intensité de l'élément dans une direction  $D$ , et  $A$  l'angle formé par  $d$  et la normale à l'élément. [8]

$$L = \frac{dI}{(dS \cos A)} \dots\dots\dots (I-7)$$

**Conclusion :**

Cette étude théorique concernant le gisement .nous avons rappelé des définitions générales sur le rayonnement solaire (caractéristique des rayonnements solaires, les coordonnées terrestres) et nous avons aussi rappelé quelques éléments de géométrie, les différents types de rayonnement.

Nous avons terminé par des définitions sur les notions de flux, l'intensité lumineuse, et l'éclairement.

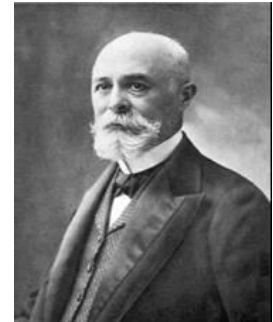
**CHAPITRE II**  
**Cellules Photovoltaïques**

## II.1. Principe de l'effet photovoltaïque

### II.1.1. Histoire du photovoltaïque :

Le terme photovoltaïque provient de « photo » qui signifie lumière, et de « voltaïque » qui signifie électricité, désignant donc la production d'électricité à partir de lumière.

L'effet photovoltaïque a été découvert par Antoine Becquerel (voir photo) et son fils Alexandre Becquerel en 1839. L'effet photoélectrique (L'émission d'électrons par un matériau soumis à

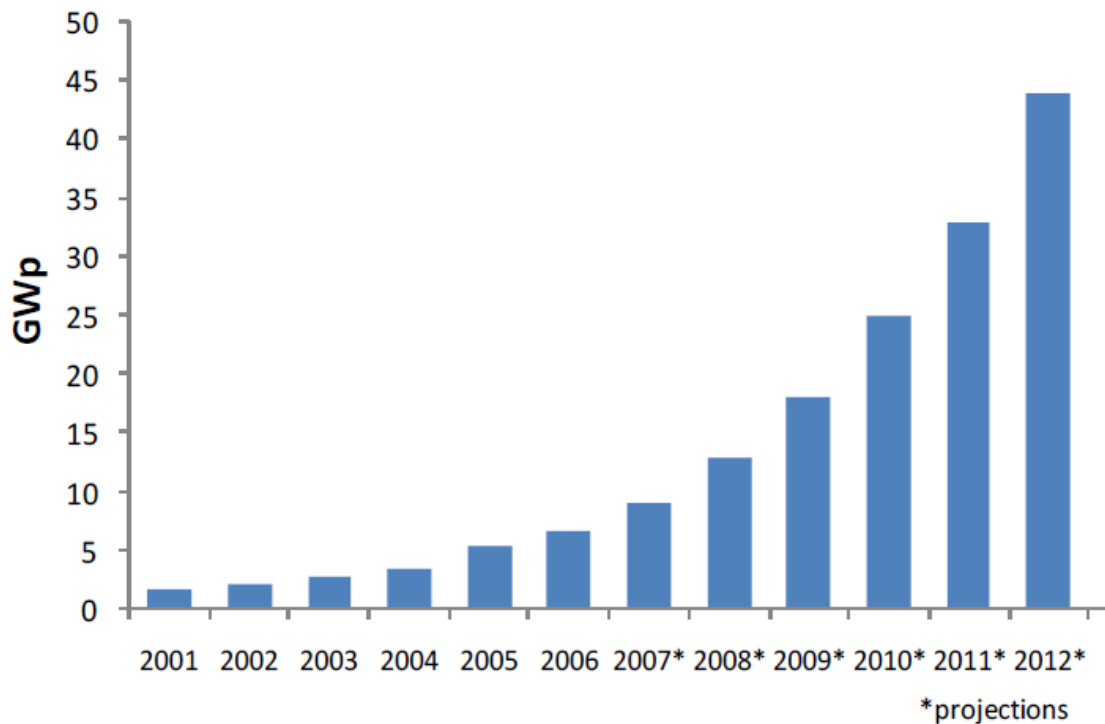


l'action de la lumière) fût découvert quant à lui en 1887 par le physicien allemand Heinrich Rudolf Hertz mais c'est Albert Einstein qui a réussi le 1er à l'expliquer intégralement, ce qui lui valut le prix Nobel physique en 1921.

En 1954, trois chercheurs américains (Charpin, Pearson et Price) des laboratoires BELL mirent au point la première cellule photovoltaïque en silicium avec un rendement de 4%. Les cellules photovoltaïques virent leur première application pour fournir de l'énergie électrique au satellite Vanguard en 1958. Une première maison alimentée par des cellules photovoltaïques fut construite par l'université de Delaware aux Etats-Unis en 1973.

A partir de 1975, les pompages solaires se sont développés, en particulier pour le Sahel. A partir de 1980, des maisons photovoltaïques et des électrifications rurales ont été faites, en Polynésie, au Kenya, en Inde, en République Dominicaine, etc. A partir de 1995, des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001 et les projections sont assez optimistes pour les années à venir, comme le montre la Figure. [12]





**Figure II-1 :** Production mondiale d'électricité d'origine photovoltaïque

De plus, des politiques fiscales incitatives ont été mises en place dans de nombreux pays et notamment en France pour encourager les populations à s'équiper de panneaux photovoltaïques. En outre, l'énergie photovoltaïque n'a pas seulement vocation à concurrencer les autres énergies raccordées au réseau pour une utilisation domestique ou industrielle, mais se destine à d'autres applications très spécifiques comme le domaine spatial, l'alimentation électrique de sites isolés (habitations dans le désert, balises maritimes, ...) ou encore comme une alternative aux piles dans les biens de consommations portables (montres, téléphones portables,...).

### II.1.2. Les différents types de centrales photovoltaïques :

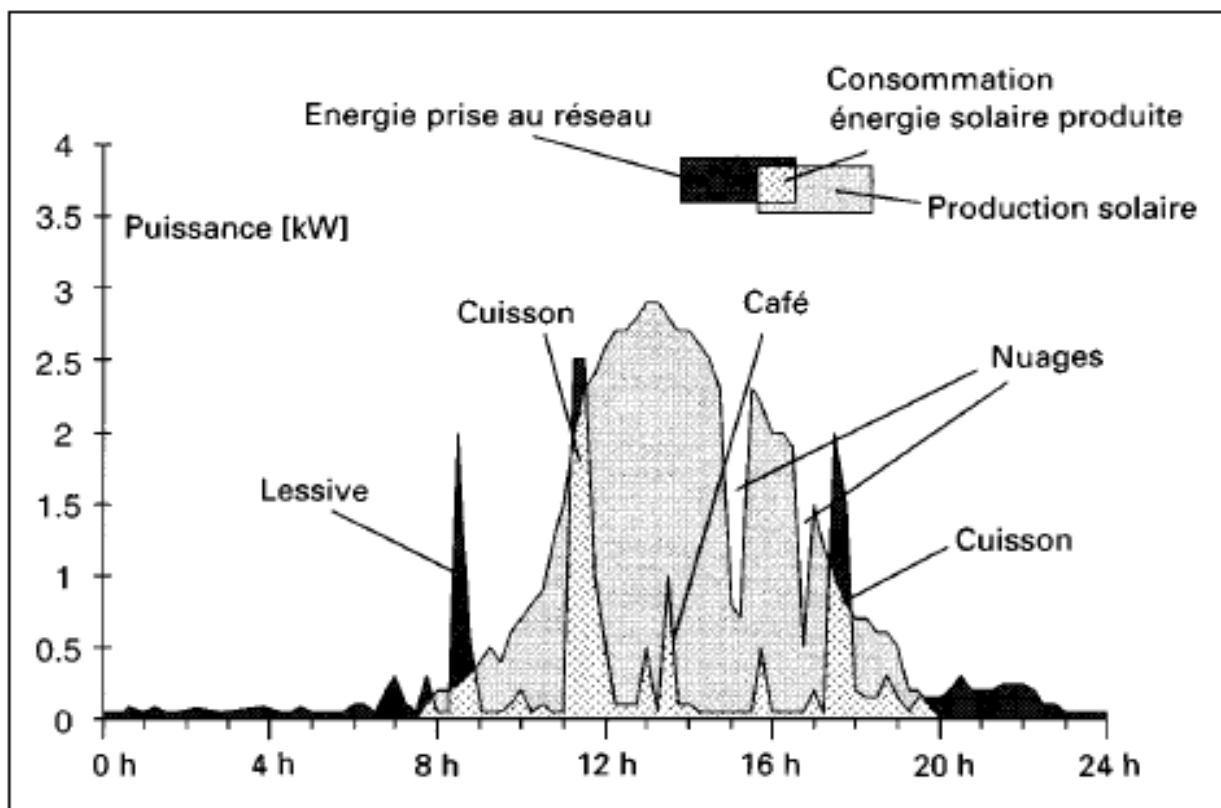
L'énergie photovoltaïque est exploitée de multiples façons. On peut distinguer les installations autonomes et les installations raccordées au réseau.

### II.1.2. a) Les systèmes photovoltaïques autonomes :

Les systèmes photovoltaïques peuvent être adaptés pour répondre à tous besoins, petits ou grands : calculatrices, montres, matériel de télécommunication, panneaux de signalisation, feux de stationnement, et balises météo.

Pionnières, les centrales photovoltaïques autonomes sont destinées à des consommateurs éloignés du réseau électrique (refuges en montagne, relais hertziens, stations de pompage agricole). La figure II-2 montre que la production solaire n'est pas adaptée à la consommation d'énergie dans un logement. Les centrales domestiques autonomes sont donc onéreuses du fait du coût de stockage de l'énergie, souvent sous forme de batteries, et sont parfois utilisées en complément d'un autre générateur d'énergie (diesel, essence, gaz, éolien).

Les installations autonomes peuvent avoir des dimensions «familiales», ou alimenter les besoins d'une collectivité, d'un village.



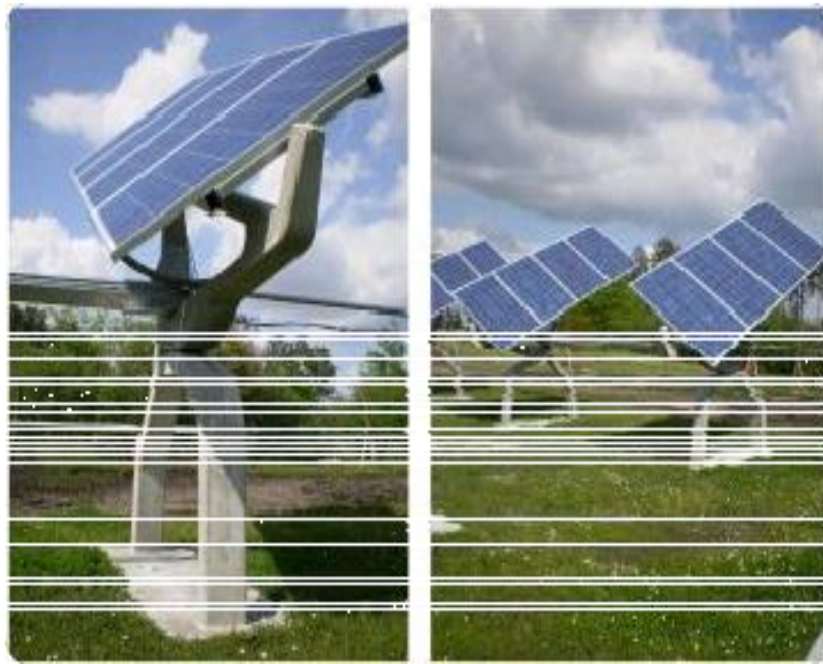
**Figure II-2:** Différence entre la consommation domestique et la production photovoltaïque au cours d'une journée

### **II.1.2. b). Les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau :**

Dans les années 80 est apparue la pratique d'échange d'énergie avec le réseau. De cette façon, les installations photovoltaïques peuvent se dispenser d'un système de stockage par batteries ; le réseau se comporte donc comme un stockage virtuel d'énergie. En plus de sa fonction traditionnelle de répartiteur de l'énergie produite par les gros producteurs, le distributeur assure maintenant le rôle de compensateur entre les excédents et les insuffisances de la production d'électricité d'origine solaire. La problématique de l'apport économique d'une production électrique d'origine solaire dans un réseau de distribution est complexe et a fait l'objet d'études par la Pacific Gas & Electric Company en 1992 ainsi que par l'association HESPUL pour la France en 2007. [13]

Selon le syndicat des énergies renouvelables SOLER, les technologies actuelles permettraient de couvrir toute la consommation électrique du pays à partir d'une surface de panneaux de 5 000 km<sup>2</sup>, soit environ la surface qu'occupe aujourd'hui la totalité des côtés sud des toits.

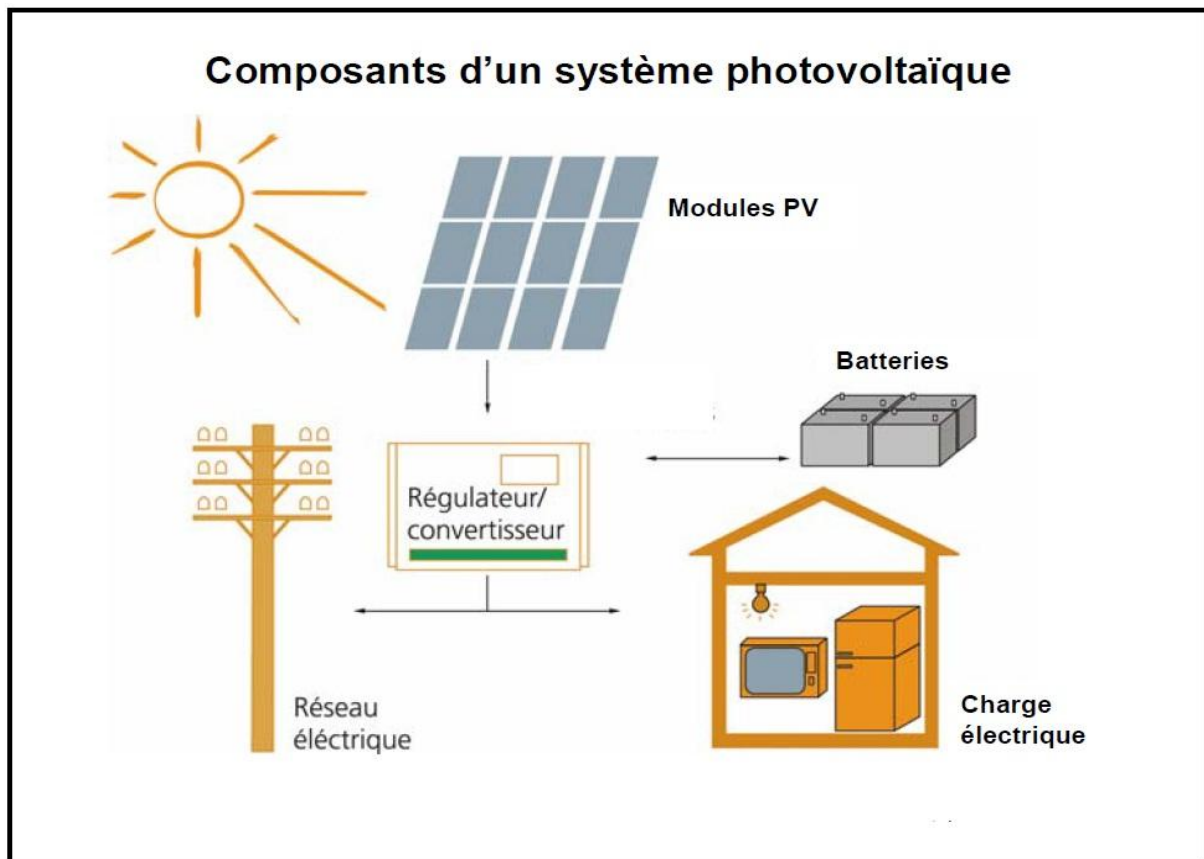
Les grandes centrales solaires de production sont installées sur des toitures de grands bâtiments ou au sol, alors parfois dotés de suiveurs (« *trackers* » en anglais) solaires sur un ou deux axes afin d'augmenter le rendement (Figure II-3).



**Figure II-3 :** Exemple de suiveur solaire (sun tracker)

### II.1.2. c). Les éléments d'une centrale photovoltaïque raccordée au réseau :

Les composants d'un système photovoltaïque raccordé au réseau sont (Figure II-4) les panneaux photovoltaïques, les boîtiers de jonction, les convertisseurs/onduleurs, le compteur, et les autres composants (protections contre la foudre, fusible, disjoncteurs, interrupteur programmable). Le boîtier de jonction relie électriquement les différents panneaux entre eux. [14]



**Figure II-4:** Schéma de principe d'une installation raccordée au réseau

➤ *Couplage des modules photovoltaïques avec la charge :* 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 d'une charge de type « batterie », c'est elle qui fixe la tension, dès lors la tension de la batterie sera choisie en conséquence.

-Dans le cas du branchement d'une charge résistive, il faut que l'impédance de la charge évolue pour que les modules restent à leur point de fonctionnement optimal. Si ce n'est pas le cas, il est parfois utile de coupler un adaptateur de charge (maximum power tracker).

-Un adaptateur de charge est un dispositif électronique qui crée une impédance fictive pour que le point de fonctionnement des modules soit toujours à puissance optimale. [14]

➤ **Batteries** : Les batteries sont utilisées pour stocker l'énergie électrique sous une forme chimique. Elles restituent l'énergie électrique au besoin selon ses caractéristiques:

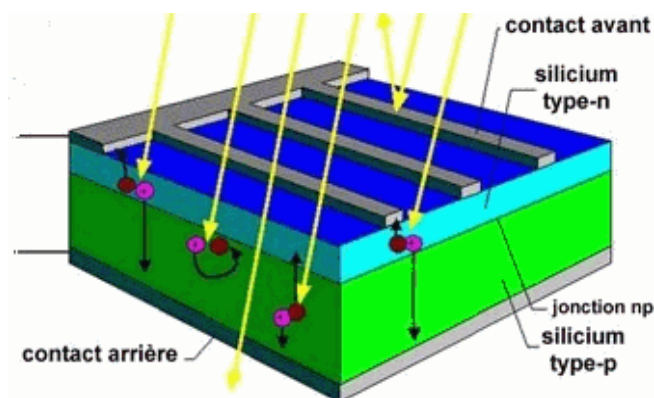
- Capacité de stockage (Ah) (selon temps de décharge  $C_n$ ) (où  $n$  = nombre d'heures pour la décharge).
- Tension nominale (V).
- Durée de vie (Nombre de cycles).
- Courant de charge et de décharge (A).

➤ **Régulateur de charge** : Le régulateur de charge a pour fonction principale de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes. Il est un élément essentiel pour la durée de vie de la batterie.

➤ **Convertisseur** : Un convertisseur est utilisé pour transformer la forme d'électricité. Onduleur CC/AC ou bien Convertisseur CC/CC. [14]

#### **II.1.2. d). Panneaux solaires ou capteurs photovoltaïques :**

Un panneau solaire est composé de plusieurs cellules photovoltaïques reliées entre elle en série ou en parallèle. Une cellule classique est composée d'un semi-conducteur de type P et d'un autre de type N qui produiront du courant à leur jonction sous l'effet des photons (Figure II-5). Les panneaux sont aussi appelés photopiles du fait qu'ils produisent toujours du courant continu.



**Figure II-5** : Principe de fonctionnement d'un panneau photovoltaïque

• Un Panneau solaire peut être défini par sa surface et son rendement de conversion, mais, en général, c'est sa puissance crête, notée  $P_c$ , qui est la principale caractéristique donnée par les fabricants. La puissance crête standard d'un capteur photovoltaïque est la puissance électrique qu'il peut fournir sous un Éclairement perpendiculaire de  $1 \text{ kW/m}^2$  avec une température de cellule de  $25^\circ\text{C}$ . La puissance crête s'exprime en watt crête par mètre carré ( $\text{Wc/m}^2$ ). La puissance crête des panneaux photovoltaïque actuelle est de  $100 \text{ à } 200 \text{ Wc/m}^2$ .

Le rendement est le pourcentage d'énergie qu'est capable de restituer un panneau par rapport à celle qu'il a reçu du soleil. La durée de vie des panneaux est de 20 à 30 ans mais le rendement diminue avec l'âge.

Le graphique ci-dessous (Figure II-6) montre l'évolution de la recherche en matière de rendement des panneaux. En 20 ans, les rendements des panneaux ont été multipliés par quatre. En laboratoire, les rendements sont aujourd'hui de l'ordre de 40% alors qu'en vente le maximum est proche de 18%. [15]

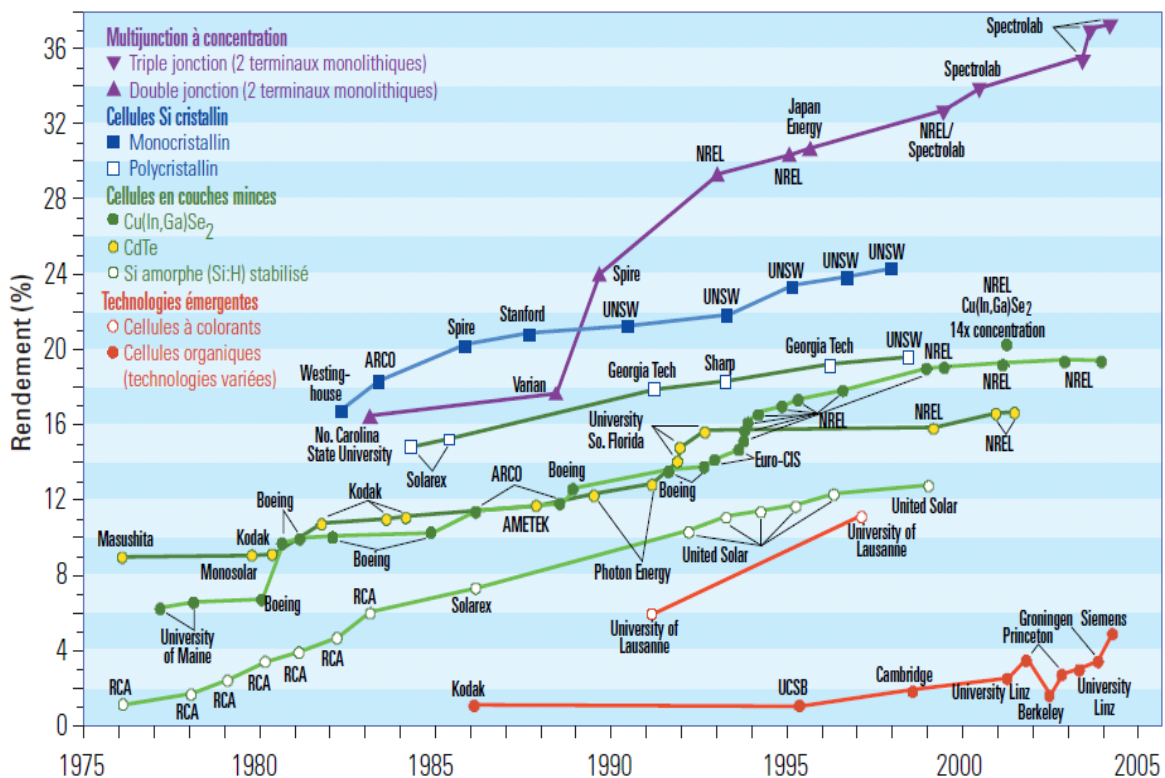


Figure II-6: Rendement (en %) des différentes technologies de cellules photovoltaïques en laboratoire.

## **II.2. Dimensionnement de projets photovoltaïques :**

Le dimensionnement s'élabore principalement à partir d'une estimation des besoins en production d'électricité, l'éligibilité au niveau des autorisations et les estimations de production (irradiation réelle).

### **II.2.1. Besoins en électricité :**

Dans le domaine domestique, même si toute la production électrique peut être revendue, on essaye en général de produire l'équivalent de la consommation du foyer. De même, pour les projets en toitures industrielles, on essaye généralement de dimensionner la production pour qu'elle corresponde à la consommation du bâtiment, hors eau chaude.

### **II.2.2. Eligibilité des projets et subventions :**

Tous les projets ne sont pas éligibles et il faut obtenir les autorisations (démarches d'urbanisme et autorisation d'exploitation) nécessaires pour débiter les travaux. Le lieu peut être sur un site protégé ou en copropriété. La proximité d'un aéroport peut également être un problème dû à la réflexion du soleil sur les panneaux qui pourrait gêner les pilotes d'avion. De même, le climat n'est pas homogène et le sud est plus favorisé que le nord en termes d'ensoleillement. Des panneaux recouverts de neige la moitié de l'année ne sont pas rentables. Des ombrages locaux (arbres, autre bâtiment,...) ou dans l'environnement (montagne) peuvent aussi empêcher une installation d'être rentable.

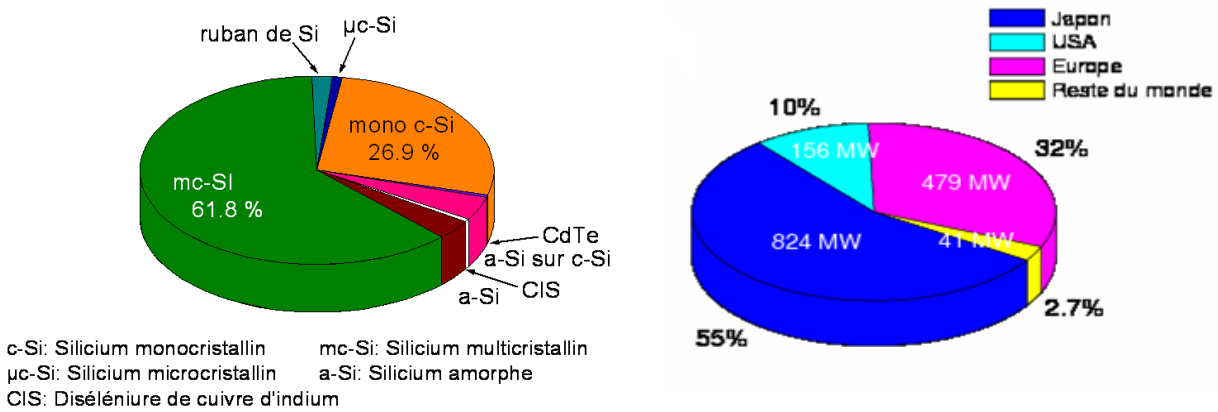
Enfin, l'orientation de la toiture ainsi que la surface disponible ne sont pas toujours favorables.

### **II.2.3. Estimation de la production :**

Il s'agit d'évaluer la puissance photovoltaïque qu'il est possible d'installer. Cette évaluation devra tenir compte de divers types de contraintes (le climat et le rayonnement solaire local, la surface disponible et l'architecture de la charpente, l'orientation des surfaces, l'homogénéité du champ, la technologie choisie, les ombrages).

II.2.4. Les filières technologiques du photovoltaïque :

La filière silicium représente actuellement 99% du marché des modules photovoltaïques (Figure II-7). Il est l'un des éléments les plus abondants sur Terre, parfaitement stable et non toxique. On trouve plusieurs technologies pour le photovoltaïque silicium détaillées ci-après



**Figure II-7:** Répartition de la production photovoltaïque mondiale en 2006 en %  
Et suivant les différentes filières

- Etant donné le prix encore élevé des panneaux photovoltaïques, il est nécessaire de choisir des orientations/inclinaisons très favorables à la production d'énergie. Pour une estimation grossière, un pourcentage d'efficacité selon l'orientation (Tableau II-1) est appliqué à la puissance crête fournie par le constructeur du panneau. Le choix de l'orientation, s'il est possible, dépendra du rayonnement solaire.

FACTEURS DE CORRECTION POUR UNE INCLINAISON ET UNE ORIENTATION DONNÉES					
INCLINAISON		☀ 0°	☀ 30°	☀ 60°	☀ 90°
ORIENTATION		0°	30°	60°	90°
Est		0,93	0,90	0,78	0,55
Sud-Est		0,93	0,96	0,88	0,66
Sud		0,93	1,00	0,91	0,68
Sud-Ouest		0,93	0,96	0,88	0,66
Ouest		0,93	0,90	0,78	0,55

: position à éviter si elle n'est pas imposée par une intégration architecturale

source Hespul

NB : ces chiffres n'incluent pas les possibles masques qui pourraient réduire la production annuelle.

**Tableau II-1:** Rendement selon l'orientation des panneaux



### II.2.5. Aides à la décision :

Plusieurs logiciels gratuits en ligne permettent de faire des estimations. Ils tiennent compte pour la plupart du lieu géographique, de la technologie des panneaux, de la surface des modules et de l'orientation et inclinaison de la toiture, par exemple *PVGIS* est un logiciel d'estimation du gisement solaire et de la production d'un système photovoltaïque couplé au réseau dans toute l'Europe. Ce logiciel a été développé par le centre de recherche de l'institut pour l'environnement et le développement durable de la commission européenne.

Pour des études plus poussées, il existe des logiciels comme **Archélios** (logiciel libre et gratuit mais avec des bases de données payantes), ou des logiciels payants comme *PVSOL* ou *PVsyst*.

## **II.3. Types de cellules photovoltaïques :**

Selon la nature des matériaux utilisés on distingue deux grandes classes : les cellules photovoltaïques inorganiques et les cellules photovoltaïques organiques :

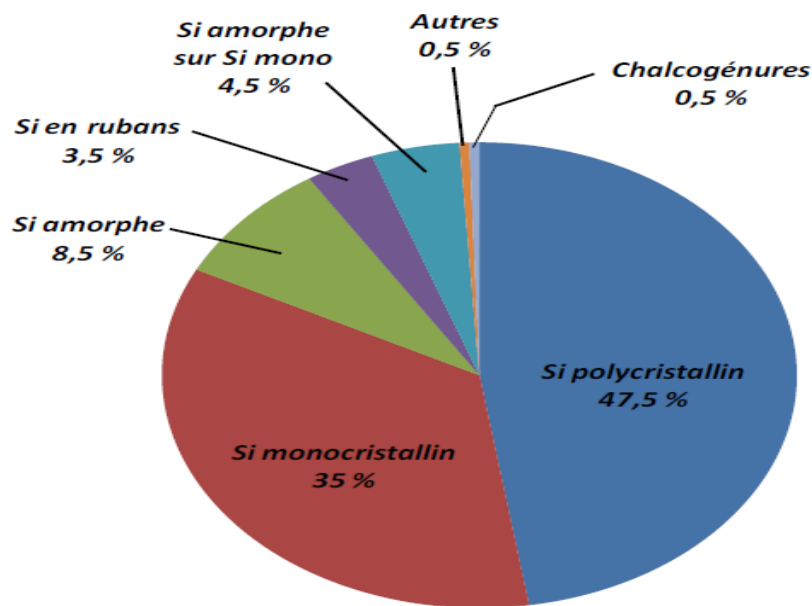
### II.3.1. Les cellules photovoltaïques inorganiques :

Les cellules photovoltaïques inorganiques qui dites aussi au silicium, représentent 99 % des ventes mondiales de panneaux solaires, la technologie de cette filière est la plus avancée, pour preuve, la faible différence entre le rendement théorique de 27 % et les meilleurs modules de laboratoire d'un pied carré qui ont un rendement de 20,8 % ; ainsi le rendement du meilleur module commercial de grande taille (1 m<sup>2</sup>), est de 15,3 %. On peut distinguer plusieurs grandes filières : [16]

#### **II.3.1.1. La filière silicium :**

La filière silicium représente actuellement 99% du marché des modules photovoltaïques comme le montre la Figure II-8. Il est l'un des éléments les plus abondants sur Terre, parfaitement stable et non toxique. On trouve plusieurs technologies pour le photovoltaïque silicium détaillées ci-après ; d'une part les cellules à base de silicium massif (monocristallin, polycristallin, rubans,...) dites de « première génération » et qui constituent

à l'heure actuelle l'essentiel des modules photovoltaïques commercialisés et d'autre part la technologie à base de silicium en couche mince.



**Figure II-8 :** Répartition des matériaux sur le marché mondial Du photovoltaïque.

#### **a) Cellules au silicium monocristallin :**

Il existe deux méthodes par lesquelles il est possible d'obtenir du silicium monocristallin de qualité microélectronique, mais nécessitant cependant une dépense d'énergie considérable, proche du MWh. [15] Les siliciums obtenus sont appelés Cz (méthode Czochralski) et FZ (« Float Zone »), et permettent d'obtenir des rendements de conversion records en laboratoire, de l'ordre de 25 % pour des cellules de 4 cm<sup>2</sup> [16], soit supérieurs de huit points à ceux de l'industrie. Les inconvénients de cette technologie sont les rendements faibles obtenus sous un faible éclairage et surtout le coût prohibitif de production des matériaux.

#### **b) Cellules au silicium polycristallin :**

Le silicium polycristallin est produit par des techniques de croissance qui assurent la formation d'une structure colonnaire avec de gros cristaux (dénommé silicium multi- cristallin) afin de limiter les effets néfastes des joints de grains. Cependant, le matériau multicristallin est d'une part contraint et disloqué, et d'autre part contaminé par des

impuretés résiduelles de la matière première de silicium. Cette dernière est en partie constituée par des rebuts de l'industrie de la microélectronique, c'est-à-dire le silicium monocristallin Cz ou FZ. Les rendements de conversion industriels, qui étaient de l'ordre de 8 à 10% avant 1980, sont actuellement de 16 à 17 % pour des grandes plaquettes de 200 cm<sup>2</sup> [15]. Il s'agit de la technologie la plus représentée sur le marché du photovoltaïque car elle allie à la fois des rendements de conversion élevés avec un coût de production faible par rapport à la filière silicium monocristallin.

### **c) Silicium en ruban auto-supporté :**

Les techniques de production de silicium cristallin en rubans autosupportés ont été très séduisantes sur le plan technologique. La plus connue est basée sur l'effet de capillarité entre deux lèvres de carbone. Ces rubans ont connu de nombreux développements au niveau de la recherche et, pour certains d'entre eux, jusqu'à la conception de chaînes de production pré-industrielles. Cependant, la vitesse de croissance linéaire extrêmement lente (quelques cm/min) pousse les industriels à abandonner progressivement cette technologie. Les meilleurs Rendements obtenus sont néanmoins de l'ordre de 15 %. [15]

### **d) Silicium amorphe :**

Depuis les années 1970, des recherches intensives ont été entreprises pour utiliser du silicium non cristallisé, c'est-à-dire à l'état amorphe. Ce sont les cellules des calculatrices ou des montres dites « solaires ». Le silicium amorphe présente plusieurs avantages, en particulier son fonctionnement possible en intérieur sous faible éclairage contrairement Au silicium cristallin, son fort coefficient d'absorption, sa faible consommation énergétique durant le cycle de production et son aptitude à être déposé sur des grandes surfaces (de l'ordre de 1 m<sup>2</sup>). Cependant, les cellules photovoltaïques à base de silicium amorphe présentent de faibles rendements (inférieurs à 10 % au niveau industriel) et une diminution assez rapide de leurs performances au cours du temps [15]. L'avenir des couches de silicium amorphe passera probablement, par un mariage avec le silicium cristallin. En effet, les hétérostructures à base de silicium amorphe/silicium cristallin (structure HIT de Sanyo [16]) présentent des rendements de laboratoire de plus de 21 % et de 16 % en production industrielle.

### **II.3.1.2. Cellules couches minces : les chalcogénures**

#### **a) Matériaux à base de tellure de cadmium**

Jusqu'à une date récente, il était admis que la filière à base de Sulfure de Cadmium et de Tellure de Cadmium (CdS-CdTe) représentait l'une des approches les plus prometteuses pour le photovoltaïque terrestre. La valeur de 1,45 eV de la bande d'énergie interdite du CdTe est idéalement adaptée au spectre solaire [15]. En outre, son très grand coefficient d'absorption fait que la quasi-totalité du spectre est absorbée sur une profondeur de 2  $\mu\text{m}$ . Les résultats de rendement de conversion sont très encourageants : près de 11 % sur une surface de 4900  $\text{cm}^2$  [16]. Cependant, les problèmes d'environnement associés à l'utilisation du Cadmium freinent les tentatives de développement de cette filière.

#### **b) Matériaux à base de séléniure de cuivre indium**

Avec un coefficient d'absorption 100 à 1000 fois plus fort que celui du silicium cristallin (dans la gamme de 1,1 à 2,6 eV), le Diséléniure de Cuivre et d'Indium (CIS) est un matériau très prometteur [15]. Ce composé type I-III-VI, de structure chalcopyrite, a un rendement théorique de l'hétérojonction (n)CdS-(p)CuInSe<sub>2</sub> qui se situe autour de 25 %. Les cellules à base de composés chalcopyrites quaternaires de type Cu(Ga,In)(Se,S)<sub>2</sub> ont récemment atteint des rendements de conversion record de 18,8 % en laboratoire [17]. Malgré les difficultés connues pour maîtriser cette filière à grande échelle, un rendement de 12,8 % a été obtenu sur le plan industriel par ZSW [15].

### **II.3.1.3. Les cellules III-V multijonctions :**

La filière des dispositifs multijonctions, dite de « troisième génération » permet d'accéder aux rendements records dans le domaine de l'énergie photovoltaïque, mais se cantonne pour le moment aux applications spatiales. Cette technologie repose sur l'utilisation de plusieurs cellules de bandes interdites différentes, chacune optimisée pour une partie différente du spectre solaire. Les rendements les plus élevés ont été obtenus avec des structures basées sur des empilements de composés III-V en épitaxie. Ces dispositifs, parfois appelés « tandems » fonctionnent déjà, et permettent d'atteindre un rendement de 32 % avec Système triple-jonction GaInP/GaAs/Ge sous un spectre standard [17]. Grâce à des systèmes De concentrateurs de lumière, permettant de décupler la puissance solaire reçue par la cellule, des rendements de plus de 40 % ont même été obtenus avec cette technologie ce qui constitue

un record absolu en terme de conversion photovoltaïque [18].

#### **II.3.1.4. Les cellules nanocristallines à colorant (ou cellules de Grätzel) :**

Inspirée par la photosynthèse, l'équipe de Michael Grätzel a développé au début des années 1990 des cellules solaires fonctionnant selon un principe différent de celui décrit dans les paragraphes précédents [19]. Ces cellules sont composées d'un électrolyte, d'un colorant et d'un oxyde semi-conducteur inorganique. Le meilleur rendement certifié reporté est de 10,4% pour une cellule de  $1 \text{ cm}^2$  et est à mettre au profit de la société **Sharp** [16].

Des tests de stabilité effectués montrent que la durée de vie des cellules est de 20 ans en fonctionnement. Cependant, à cause de fuites possibles de l'électrolyte liquide, celui-ci est remplacé par des électrolytes solides pour lesquels les rendements chutent alors à 6,7 %.

#### **II.3.2. Les cellules photovoltaïques organiques :**

Si l'effet photovoltaïque a été observé dans les matériaux organiques depuis plus de 30 ans, les premières cellules présentaient des rendements de conversion en énergie  $\varepsilon$  très faibles, de l'ordre de 10–5 %. Dès 1978, Merritt prévoyait que les valeurs de  $\varepsilon$  pourraient dépasser les 1 % [20], mais ce n'est qu'en 1986 que ce rendement a été atteint avec les travaux de Tang (PCE = 0,95 %) [21]. Pendant les années qui suivirent, cette valeur a parfois été reproduite avec des matériaux différents mais elle n'a jamais été améliorée.

Ce n'est que depuis le début du XXI<sup>e</sup> siècle que le rendement a recommencé à croître, atteignant 2,5 % avec les travaux publiés par Shaheen [22], 3,6 % avec ceux de Peumans [23] sous éclairage AM1,5 avec une puissance lumineuse de  $100 \text{ mW.cm}^{-2}$  et enfin 4,2 % avec une double hétérostructure de C60 et de phthalocyanine de cuivre.

Aujourd'hui, le record au niveau industriel est détenu par la firme Konarka avec un rendement qui dépasse les 5 % [16]. L'équipe de Heeger a même obtenu un rendement de 6,7 % avec des cellules de type « tandem ». Cette valeur reste encore très faible si on la compare aux rendements obtenus par les autres technologies. Cependant, plusieurs raisons justifient les efforts consentis pour développer la filière organique, et qui résident dans les avantages que présentent ces matériaux. En effet, ils peuvent être mis en forme facilement, par voie sèche ou voie humide (tournette, jet d'encre,...) avec des techniques issues de l'industrie de la microélectronique. De plus, les quantités de matériaux utilisées sont relativement faibles, les films ayant des épaisseurs de 100 nm. L'ingénierie moléculaire permet en outre d'adapter les valeurs de la bande interdite et des niveaux d'énergie.

Enfin, cette technologie permettrait d'accéder à des modules photovoltaïques flexibles et/ou de grandes surfaces.

➤ **Différents exemples pour différents Types de cellules :**

### Silicium cristallin

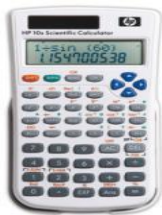


Centrale solaire de Pocking, Allemagne  
*M. Bucher, Shell Solar*



Quartier de Vénissieux  
*TENESOL*

### Silicium amorphe



Calculatrice « solaire »  
*HP*

### Multijonction III-V



Satellite Artemis  
*ESA*

### Organique

Résultat : une peinture, ou plutôt la cellule photovoltaïque en plastique polymère, flexible et résistant. Une véritable révolution car ce matériau est aussi beaucoup plus efficace : il ne se contente pas d'absorber la lumière visible, mais peut aussi exploiter la lumière infrarouge. Bref, le rendement augmente de 30 % par rapport aux cellules photovoltaïques en plastique habituelles.

Le chercheur imagine déjà de recouvrir les routes ou les bâtiments avec cette peinture pour produire de l'électricité en grosse quantité. La technologie, à peaufiner d'ici à 7 ans, pourrait même s'appliquer aux vêtements.



- ✓ **Situation nationale** : Sur le plan national, l'Algérie a mis en place un plan fixant les orientations de la politique énergétique :
  - une priorité à la recherche énergétique renouvelable (principalement pour l'énergie solaire).
  - une réduction d'impôts sur les coûts des matériaux accordée aux particuliers qui choisissent des matériels de production d'électricité faisant appel aux sources d'énergies renouvelables.
  
- Ces mesures ont pour but de faire un pas vers le contrôle de ces énergies pour un meilleur rendement économique et technologique.

## **CHAPITRE III**

### **L'énergie Photovoltaïque Organique**



### **III.1. Conversion d'énergie : les différentes technologies solaires:**

Il existe principalement trois façons d'utiliser directement l'énergie solaire : la thermodynamique, la thermique et le photovoltaïque.

#### **III.1.1. Solaire à concentration thermodynamique:**

Le solaire à concentration thermodynamique est une technologie qui utilise des miroirs qui concentrent l'énergie solaire vers un tube contenant un fluide caloporteur qui chauffe jusqu'à une température pouvant atteindre 500°C. La chaleur obtenue est transférée à un circuit d'eau, la vapeur alors produite actionne une turbine couplée à un alternateur qui produit de l'électricité. L'un des grands avantages de cette technologie provient du fait que la chaleur peut être stockée, permettant ainsi aux centrales solaires de produire de l'électricité pendant la nuit.

La centrale ANDASOL 1, à Grenade, a ainsi une autonomie de 7 heures, mais des projets en cours ont comme objectif une autonomie de 20 heures.

Les miroirs qui collectent l'énergie solaire (placés à 3 ou 4 mètres du sol) forment une zone d'ombre sur le sol, cependant il arrive suffisamment de lumière pour cultiver des fruits ou des légumes. Une partie de l'eau douce formée sur place par condensation en sortie de turbine, peut être utilisée pour l'arrosage.

Compte tenu de son potentiel énorme, le solaire à concentration se développe aujourd'hui dans plusieurs pays, en particulier dans le sud-ouest des Etats-Unis et en Espagne où de très nombreux projets sont en cours de réalisation. A Sanlúcar La Mayor, la première centrale solaire commerciale d'Europe (PS 10) a été inaugurée en mars 2007. Mais les puissances sont beaucoup plus faibles que celles des centrales nucléaires : 10 à 50 MWe (électrique) contre 800 à 1600 MWe pour une centrale nucléaire.

#### **III.1.2. Solaire thermique:**

Le solaire thermique consiste à transformer les rayonnements solaires en chaleur, et à la récupérer principalement par chauffage de l'eau. Cette source d'énergie renouvelable commence à se développer sous nos latitudes dans les maisons individuelles. Son utilisation se fait principalement pour produire l'eau chaude sanitaire, mais elle peut être utilisée comme complément pour le chauffage de la maison. Différents types de capteurs solaires thermiques existent. Les panneaux solaires plus performants reprennent ce principe, mais la surface qui reçoit l'énergie solaire, appelée absorbeur, est

enfermée dans une enceinte transparente et hermétique, provoquant un effet de serre et augmentant le rendement de l'ensemble. Ceci permet notamment un fonctionnement en hiver. L'extraction de la chaleur se fait grâce à la circulation du fluide caloporteur dans un conduit recevant l'énergie calorifique.

### III.1.3. Solaire Photovoltaïque:

La lumière solaire (photons) transmet son énergie aux électrons contenus dans un semi-conducteur (qui constitue une cellule photovoltaïque) capable de convertir le rayonnement solaire en électricité. Les électrons sont alors mis en mouvement, produisant ainsi un courant électrique.

## **III.2. LES SEMI-CONDUCTEURS ORGANIQUES:**

### III.2.1. Nature des semi-conducteurs organiques:

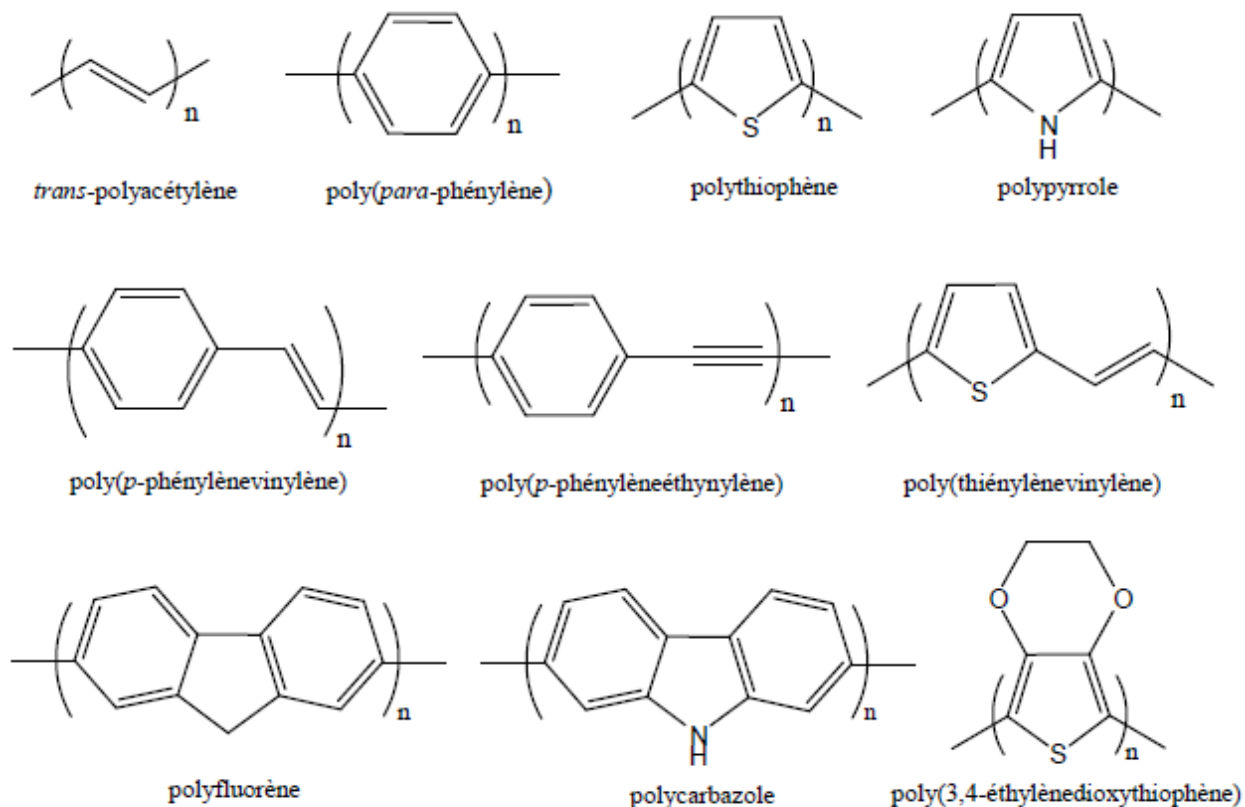
La conduction électronique dans le cas des matériaux organiques et le transport en général nécessitent au préalable la possibilité de création ou d'injection de porteurs de charges libres. Au niveau moléculaire, cela implique une ionisation facile, soit par éjection des électrons des plus hauts niveaux électroniques occupés de la molécule (**HOMO** pour *Highest Occupied Molecular Orbitals*), soit par capture d'électrons dans les plus bas niveaux électroniques inoccupés (**LUMO** pour *Lowest Unoccupied Molecular Orbitals*). Cette extraction ou injection est particulièrement aisée dans le cas des composés disposant d'un système d'électrons  $\pi$  délocalisés [24]. Ces composés se caractérisent par l'alternance régulière de simples et doubles liaisons permettant une délocalisation des électrons le long du squelette. On parle de phénomène de conjugaison. On peut classer les semi-conducteurs organiques en deux catégories : les molécules de faibles masses molaires appelées communément « petites » molécules conjuguées ou bien les polymères conjugués. Nous nous limiterons par la suite au cas des polymères conjugués, qui font l'objet de ce travail.

### III.2.2. Polymères semi-conducteurs les plus étudiés:

L'obtention, en 1977, de polyacétylène présentant une conductivité de  $10^3$  S/cm, a déclenché un véritable engouement pour ce matériau. Cependant, ce dernier présente une faible stabilité environnementale et thermique limitant son utilisation. A la suite de ces

observations, de nombreux polymères conjugués ont été étudiés comme le poly(*para*-phénylène) (PPP), le polypyrrole, le polythiophène (PT),...

De nombreux polymères conjugués issus de ces structures parentales ont été synthétisés comme par exemple le poly(3-hexylthiophène), sur lequel nous reviendrons par la suite, et qui constitue le polymère conjugué conduisant aux meilleurs rendements photovoltaïques organiques.



**Figure III-1** : Structures chimiques des principales familles de polymères conjugués

### III.2.3. bande énergétique des polymères semi-conducteurs:

Un matériau semi-conducteur se caractérise par la présence d'une bande d'énergies interdites dans la structure électronique. Cette partie décrit, de manière simplifiée, les notions de bandes d'énergie des semi-conducteurs organiques.

Les **semi-conducteurs** intrinsèques ont une bande interdite comprise entre 0 à 3 eV. Lorsque les porteurs de charges ne sont soumis à aucune excitation thermique, optique ou électrique, leur bande de valence est complètement remplie et leur bande de conduction est vide.

Les **isolants** possèdent une structure de bandes similaire à celle des semi-conducteurs mais la largeur de la bande interdite est trop importante (supérieure à 4 eV) pour permettre le passage d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction.

La plupart des polymères conjugués se situent à la frontière entre les isolants et les semi-conducteurs (**Tableau III-1**).

Polymères conjugués	Bande interdite (eV)
<i>trans</i> -polyacétylène (PA)	[1,4 - 1,5]
polythiophène (PT)	[2,0 - 2,1]
poly (p-phénylène) (PPP)	2,7
poly (p-phénylènevinylène) (PPV)	2,5
polypyrrole (PPy)	3,2
poly (3,4-éthylènedioxythiophène ) (PEDOT)	1,6

**Tableau III-1** : Valeurs des bandes interdites de certains polymères conjugués

#### III.2.4. Le dopage : obtention de polymères conducteurs:

Le dopage d'un semi-conducteur intrinsèque inorganique consiste à modifier la densité des porteurs de charges par addition délibérée d'impuretés, soit en augmentant le nombre d'électrons (dopage *n*), soit en augmentant le nombre de trous (dopage *p*). Les atomes d'impuretés occupent des positions de substitution dans le réseau cristallin du semi-conducteur.

Le terme de dopage a été étendu aux polymères conducteurs puisque c'est lors de l'introduction « d'impuretés », les contre-ions, qu'ils passent de l'état semi-conducteur (neutre)

à l'état conducteur. Le dopage correspond ici à une oxydation ou à une réduction du polymère. Il est donc de nature différente et réalisé à des taux d'impuretés de 10 à 30 %, contre quelques ppm pour les semi-conducteurs inorganiques. Dans ce cas, on parle donc de dopage chimique ou électrochimique. Il est important de préciser que les polymères conducteurs rivalisent avec les métaux pour certaines applications. En effet, des valeurs de conductivité comprises entre  $10^0$  et  $10^6$  S.cm<sup>-1</sup> sont reportées sachant que celle du cuivre est de l'ordre de  $10^6$  S.cm<sup>-1</sup>.

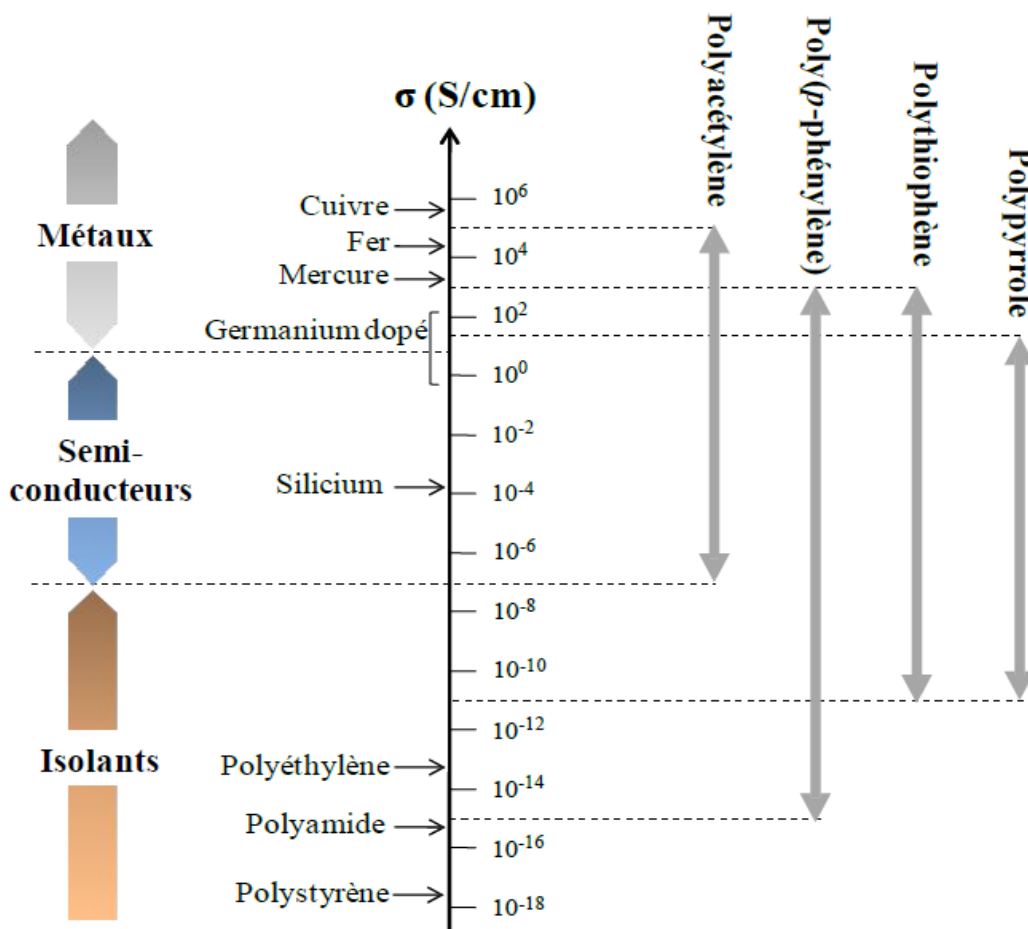
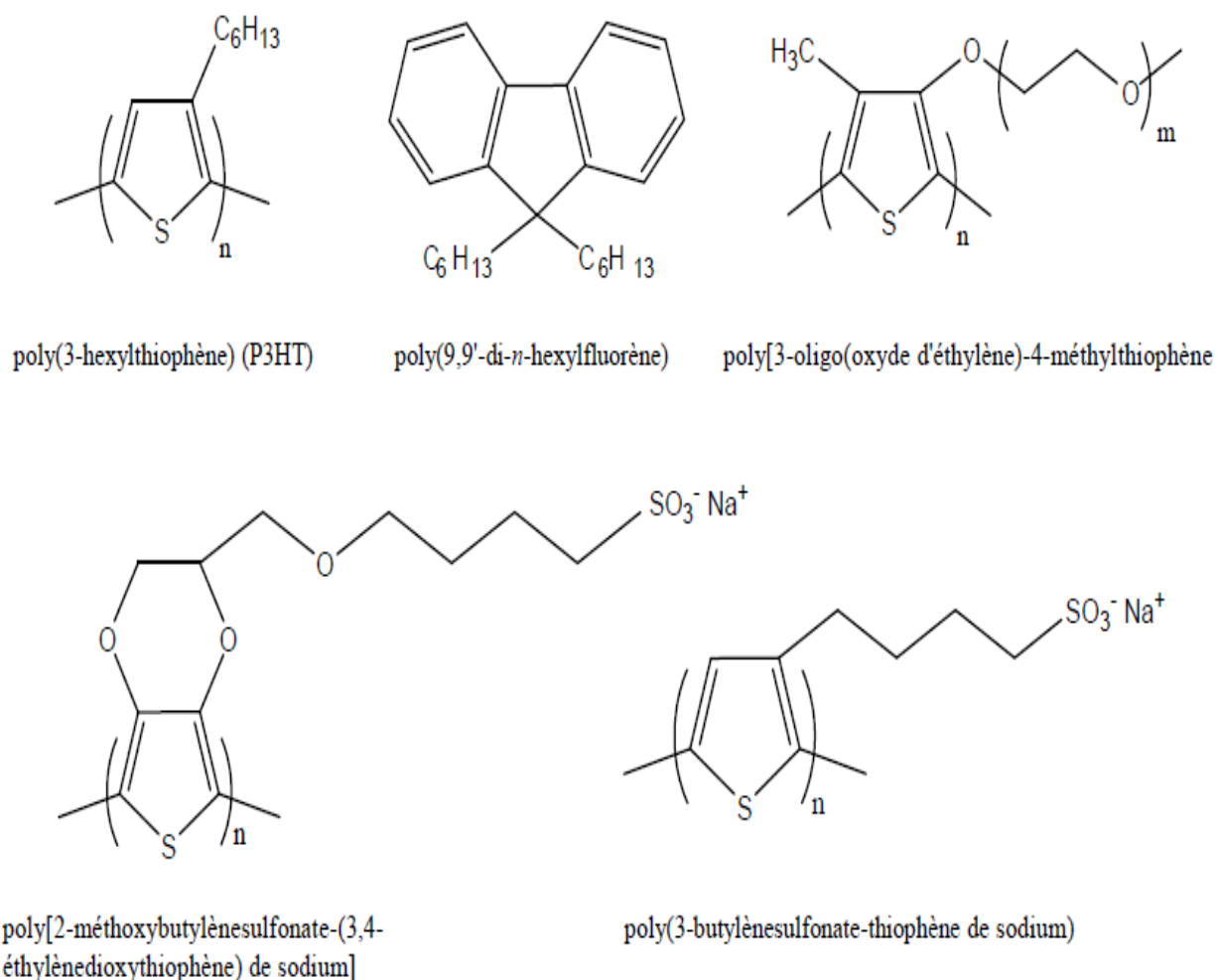


Figure III-2 : Conductivités électroniques de polymères conjugués à divers taux de dopage

### III.2.5. Amélioration de la mise en forme des polymères conjugués:

En raison de leurs caractéristiques moléculaires, la plupart de ces matériaux sont infusibles et pratiquement insolubles dans les solvants organiques usuels. Cette insolubilité a longtemps été un obstacle important à la bonne caractérisation de ces polymères ainsi qu'à l'établissement des relations entre leur structure et leurs propriétés. Toutefois, l'introduction de groupements latéraux flexibles, telles que des chaînes alkyles[25][26] et poly(oxyde d'éthylène) ou encore l'incorporation de fonctions polaires comme les sulfonâtes[27][28] ou les ammoniums quaternaires, ont permis de contrer ce problème en améliorant les interactions polymère-solvant, rendant ainsi ces polymères solubles et facilitant par la même occasion leur mise en forme.



**Figure III-3** : Structures chimiques de polymères conjugués substitués

D'autre part, en vue de développements à plus grande échelle, la synthèse de copolymères à blocs contenant au moins un segment conjugué et une ou plusieurs séquences de chaînes polymères « flexibles » à base de polystyrène, polyisoprène, polyacrylate ou poly(oxyde éthylène) a aussi été une voie explorée ces dernières années. De tels copolymères de type « rigide-flexible » sont connus pour leur capacité à s'auto-organiser en Masse, générant des morphologies originales. [29]

### **III.3. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque organique :**

#### **III.3.1. Rappel sur le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque inorganique :**

Pour obtenir une conversion photovoltaïque efficace, les matériaux choisis doivent satisfaire les conditions suivantes :

- En premier lieu, ils doivent absorber les photons issus du rayonnement solaire incident.
- Des charges libres doivent être créées à l'intérieur de ces matériaux.
- Ces charges doivent ensuite rejoindre les électrodes ce qui suppose des mobilités de porteurs suffisamment élevées associées à une collection de charges efficace.

#### **➤ L'absorption optique des semi-conducteurs inorganiques:**

Lorsque le flux solaire pénètre dans un semi-conducteur inorganique, une partie de ce rayonnement est réfléchi, une autre est absorbée et une dernière composante traverse la couche de matériau sans être absorbée.

Pour une incidence quasi normale sur une surface de séparation entre deux milieux 1 et 2, le coefficient de réflexion, ou la fraction de l'intensité lumineuse réfléchi, est donné par la formule de Fresnel. Si le premier milieu est le vide :

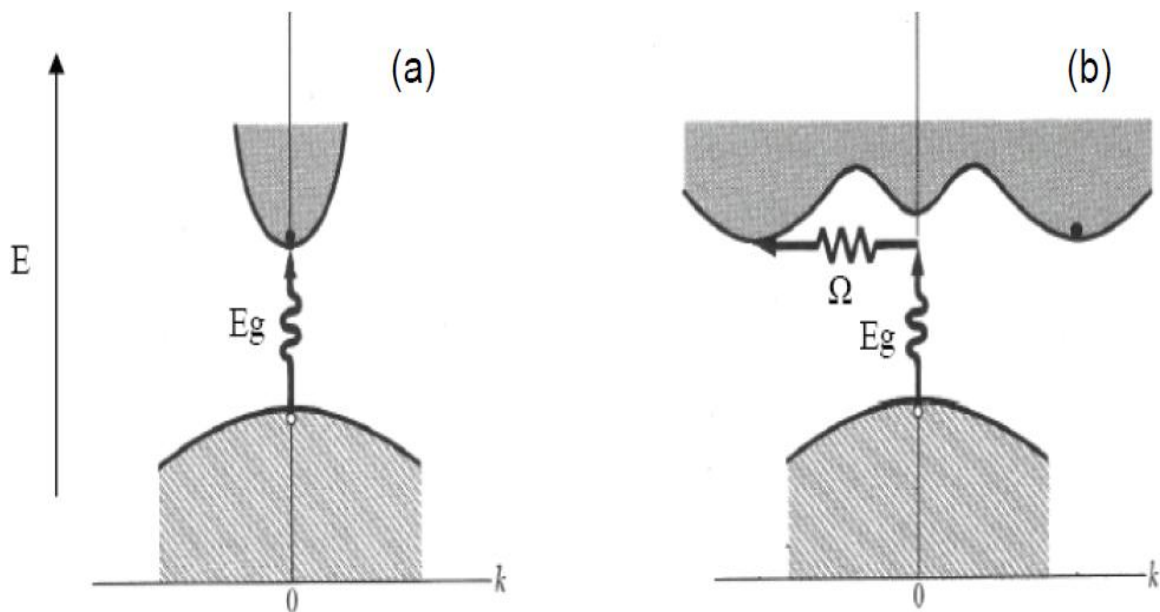
$$R = \left[ \frac{n-1}{n+1} \right]^2 = \left[ \frac{\sqrt{\epsilon_r} - 1}{\sqrt{\epsilon_r} + 1} \right]^2 \dots\dots\dots (III-1)$$

**n**: étant l'indice de réfraction, et  **$\epsilon_r$**  la constante diélectrique relative.

Pour tous les semi-conducteurs inorganiques,  $n$  varie entre 3 et 4, de sorte qu'environ 30 % du rayonnement incident est réfléchi.

L'absorption d'un photon dans un solide présentant un gap direct (**Figure III-4 a**) est très probable du fait que cette transition électronique est seulement associée à deux particules : électron – photon. Le photon assure la conservation de l'énergie lors de la transition entre la bande de valence et la bande de conduction. Cette structure de bande directe correspond à des matériaux tels que de GaAs, CdTe, etc...

Dans le cas d'un diagramme à gap indirect (**Figure III-4 b**), une troisième particule entre en jeu. Elle est associée aux vibrations du réseau cristallin et est désignée sous le terme de « phonon » d'énergie  $\Omega$ . Son intervention dans le processus d'absorption conduit à une probabilité d'absorption réduite près du seuil, et donc à un « front d'absorption » qui est moins raide que celui qui caractérise les transitions directes. Cette structure de bande indirecte s'applique à des matériaux Comme le silicium, le germanium, le GaP, etc...



**Figure III-4 :** Diagramme de bandes d'énergie dans l'espace d'un semi-conducteur à gap direct (a) et à gap indirect (b).



On définit le taux de génération de paires électrons-trous  $G$  créées dans un Cristal à Une distance  $x$  de la surface par la relation:

$$G(x) = \alpha(\lambda)N_0 \exp-(\alpha(\lambda)x) \dots\dots\dots (III-2)$$

Avec  $\alpha$ : Coefficient d'absorption  
 $\lambda$  : La longueur d'onde  
 $N_0$  : Nombre de photons incidents

➤ **Créations des charges. Les excitons:**

Lorsqu'un photon d'énergie supérieure à  $E_g$  (pour les semi-conducteurs ayant un gap direct) ou à  $E_g + \Omega$  (pour les semi-conducteurs ayant un gap indirect), est absorbé par le semi-conducteur, une paire électron-trou est créée. Les charges Électriques (électron et trou) restent liées par une force coulombienne et forment un ensemble appelé « exciton ». Pour générer un courant électrique les excitons doivent se dissocier en électrons et trous libres avant que ces deux éléments ne se recombinent. Il existe principalement deux types de recombinaison. Le premier est dû à un processus physique d'émission spontanée (recombinaison radiative) [30].

Le deuxième mécanisme est celui qui résulte de la recombinaison par pièges qui peuvent être des impuretés et des défauts présents dans le matériau. Ces impuretés introduisent des niveaux d'énergie dans la bande interdite et créent ainsi des centres de recombinaison.

➤ **Mobilité et collecte des porteurs de charges:**

Lorsque les paires électrons-trous se sont dissociées, les charges libres doivent diffuser jusqu'aux électrodes. La mobilité des porteurs de charges définit l'aptitude de ces électrons ou de ces trous à se déplacer à l'intérieur d'un matériau. Elle s'exprime en  $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ . Son expression générale est donnée par la relation :

$$\mu = \left| \frac{qt_c}{2m} \right| \dots\dots\dots (III-3)$$

avec  $t_c$  : Le temps entre deux collisions du porteur avec les atomes du cristal ou des impuretés  
 $m$  : la masse effective du porteur de charge (électron ou trou)

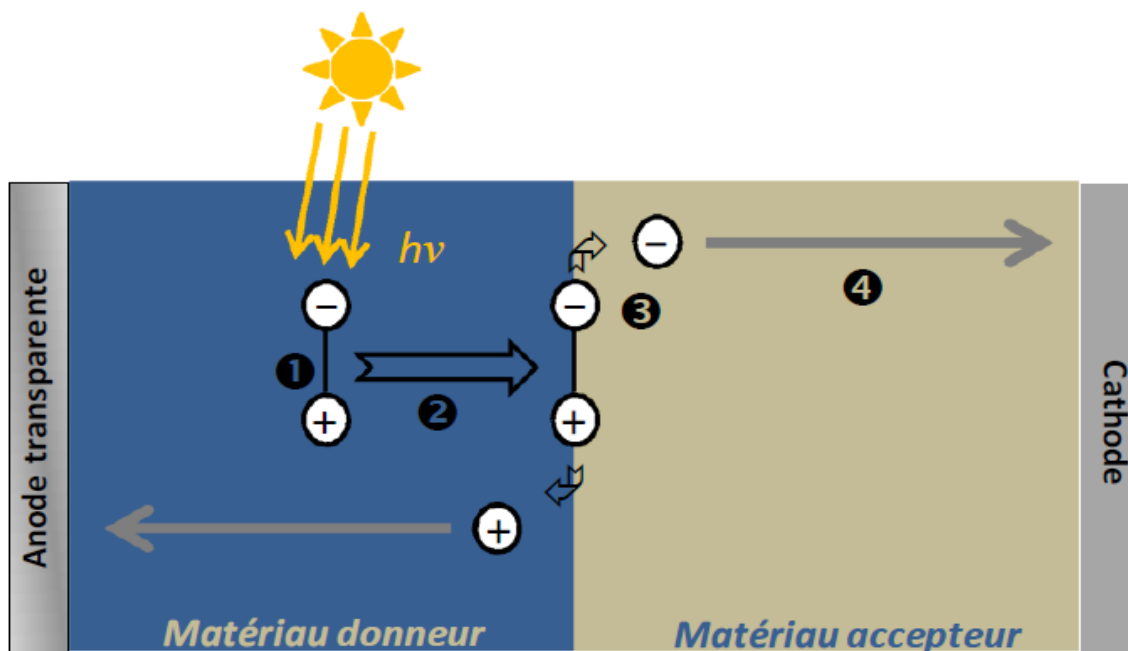
### III.3.2. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque organique :

Entre l'étape initiale où la lumière pénètre dans une cellule photovoltaïque organique et l'étape finale où les charges sont collectées sur les électrodes, plusieurs processus physiques agissent successivement et qui déterminent l'efficacité de la photo-conversion. Ces différentes étapes sont détaillées ci-après.

#### ➤ **Absorption des photons – création des excitons :**

L'absorption de photons dans un solide se traduit par l'apport d'énergie aux électrons du niveau HOMO. La transition vers le niveau LUMO entraîne l'apparition d'un trou qui reste lié à l'électron par interaction électrostatique mutuelle. Le couple électron-trou, électriquement neutre, est alors appelée exciton (**Figure III-5: ①**). Lorsque les deux charges sont localisées sur la même molécule ou sur la même unité monomère, il est appelé exciton de

Frenkel ; au contraire si la distance entre l'électron et le trou correspond à plusieurs unités monomères, c'est un exciton de type Wannier. Dans les matériaux inorganiques, la valeur de l'énergie de liaison  $E_{Lex}$  est très faible (14,7 meV pour le silicium) et l'énergie thermique est suffisante, à température ambiante, pour séparer les deux charges liées. Il n'en est pas de même dans les matériaux organiques puisque les valeurs de  $E_{Lex}$  sont de l'ordre de plusieurs centaines de meV. Il en résulte une difficulté à dissocier les charges qui restent liées à température ambiante. La présence d'un champ électrique local, est requise pour que s'exerce une force capable de surpasser l'attraction coulombienne. Pour y parvenir, la présence de deux matériaux avec des niveaux énergétiques différents est nécessaire. L'un est appelé matériau « donneur » pour la capacité qu'il a à donner un électron, l'autre matériau étant appelé « accepteur » pour la capacité qu'il a à accepter un ou plusieurs électrons. En outre, la durée de vie d'un exciton  $\tau_{ex}$  est de quelques nanosecondes. Faute de dissociation, l'électron rejoint le niveau HOMO en cédant son énergie de manière radiative (photoluminescence) ou non-radiative (chaleur).



**Figure III-5** : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque organique.

➤ **Diffusion des excitons :**

Les excitons ont une durée de vie  $\tau$  très courte, de l'ordre de la nanoseconde. Si rien ne se produit pendant ce temps  $\tau$ , l'électron et le trou se recombinent et l'énergie de l'exciton se transforme en un nouveau photon ou en chaleur. Il faut donc dissocier les charges liées avant leur recombinaison. Les excitons ne sont pas localisés sur une molécule. Pendant leur durée de vie, ils peuvent diffuser à travers le solide en transportant de l'énergie d'excitation sur une distance **LD** plus ou moins grande selon le matériau considéré (**Figure III-5 : ②**). Si la valeur de **LD** peut atteindre 4  $\mu\text{m}$  dans certains matériaux inorganiques présentant des configurations particulières (des fils quantiques d'arséniure de gallium par exemple), elle est beaucoup plus courte dans les organiques avec une valeur de 5,5 nm pour les polythiophènes par exemple. [31][32]

Pour que les excitons puissent atteindre un site de dissociation (la jonction donneur-Accepteur), il faut qu'ils soient générés à une distance inférieure à **LD** de cette interface.

➤ **Dissociation des excitons:**

Les conditions de dissociation peuvent être exprimées à partir du diagramme énergétique des matériaux mis en œuvre dans les cellules photovoltaïques. La Figure III-6 représente la jonction de type donneur-accepteur. La lumière est absorbée par les deux matériaux et des excitons sont créés des deux côtés de la jonction. Ceux qui apparaissent du côté donneur ont une énergie  $E_{ex}$  qui est inférieure à la différence entre l'énergie de la LUMO et celle de la HOMO d'une valeur égale à l'énergie de liaison  $E_{Lex}$ . Après dissociation, l'électron passe dans l'accepteur tandis que le trou reste dans le donneur (Figure III-5 : ☉). On obtient alors une paire de polarons : un polaron de charge positive dans le donneur et un polaron de charge négative dans l'accepteur. Puisqu'il n'y a pas d'apport d'énergie au moment du transfert, celui-ci ne peut s'effectuer que si l'énergie finale de la paire de polarons  $E_{CT}$  est inférieure à l'énergie initiale de l'exciton  $E_{ex}$ . Un raisonnement analogue montre que la même condition prévaut pour les excitons générés du côté accepteur de la jonction.

Pour obtenir une dissociation des excitons efficace, il est donc indispensable de contrôler les niveaux énergétiques des matériaux. L'ingénierie moléculaire, permet, dans certaines limites, de choisir ces valeurs par modification de la structure.

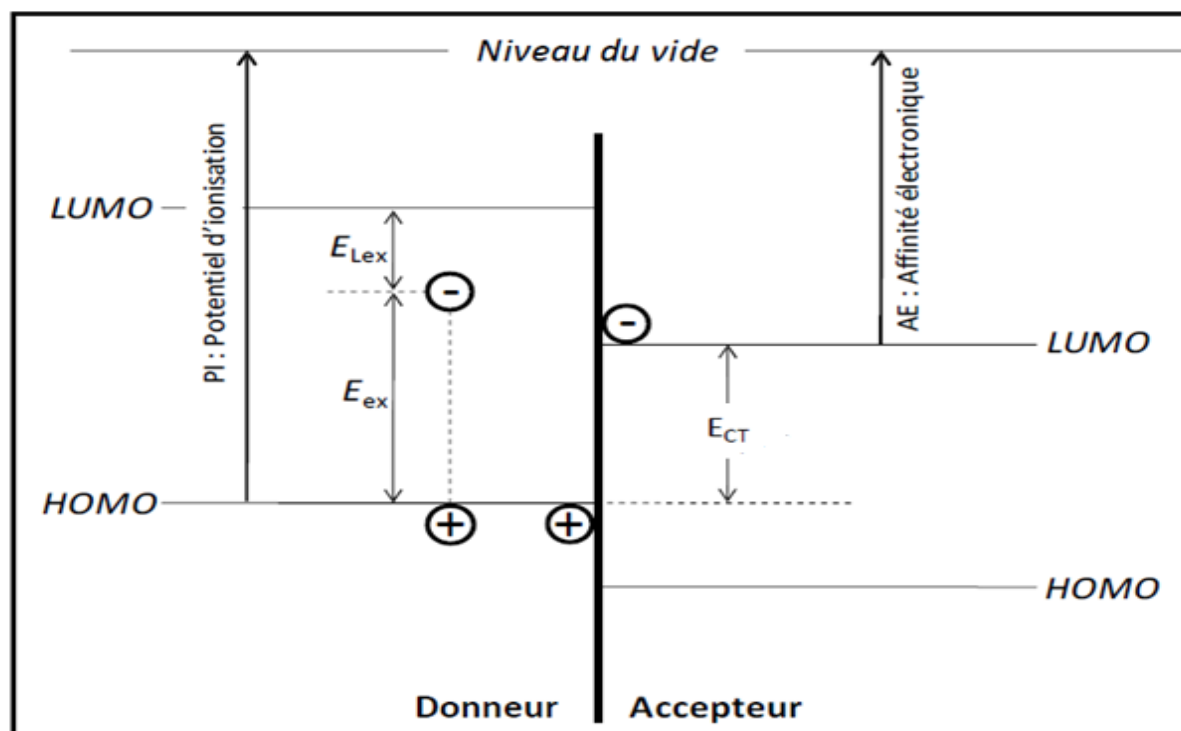


Figure III-6 : Conditions de dissociation de l'exciton ( $E_{ex} > PI - AE$ ).

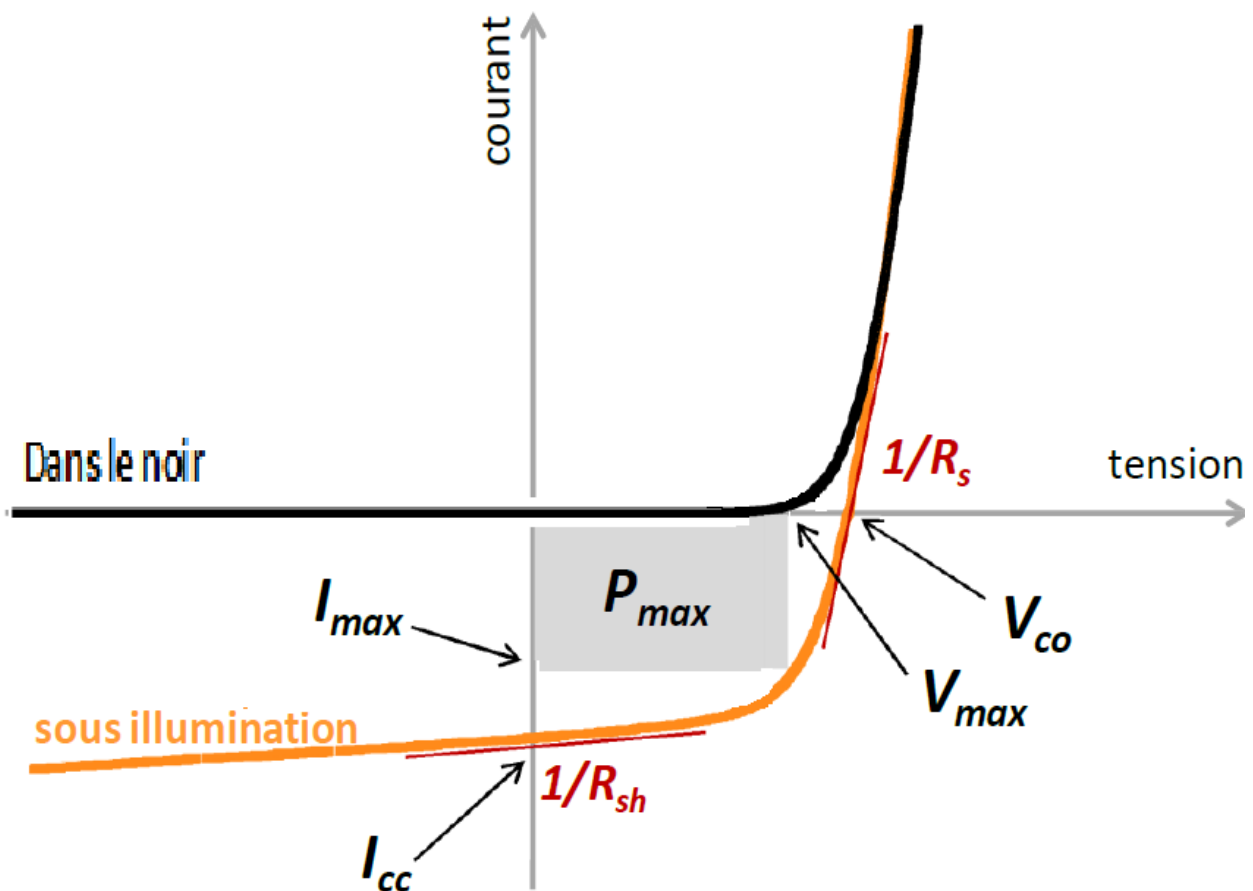
➤ **Transport des charges jusqu'aux électrodes :**

La dernière étape de la conversion photovoltaïque consiste à ramener les charges électriques vers les électrodes (**Figure III-5: ④**). Les propriétés de transport des matériaux organiques ont été discutées par Schott [34]. Pour que cette diffusion soit aisée, les matériaux organiques doivent posséder des mobilités de trous  $\mu_h$  et d'électrons  $\mu_e$  les plus grandes possible. Les valeurs publiées, qui dépendent de la méthode de mesure utilisée, sont plusieurs ordres de grandeur au-dessous de celles caractéristiques des inorganiques (pour le silicium monocristallin  $\mu_e = 1\,500\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$  et  $\mu_h = 450\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Pour les valeurs les plus grandes, on peut citer celles du pentacène ( $\approx 2\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ) et du poly (3-hexylthiophène) ( $\approx 0,7\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Elles doivent être au moins égales à  $10^{-3}\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$  pour des épaisseurs de film de 100 nm. De plus, il est important que les valeurs de mobilités soient voisines pour les deux matériaux donneur et accepteur utilisés, de façon que les charges n'arrivent pas plus vite à une des deux électrodes. De manière générale, le transport des charges électriques est amélioré lorsque l'ordre moléculaire augmente, mais également par la purification de matériaux. Les impuretés agissent comme des pièges qui diminuent fortement les mobilités. [33]

### III.4. Caractéristique courant-tension et paramètres des cellules solaires organiques :

#### III.4.1. Caractéristique courant-tension $I(V)$ :

La **Figure III-7** représente une caractéristique courant-tension  $I(V)$  dans le noir et sous illumination typique d'une cellule photovoltaïque à jonction PN. Le tracé de cette courbe permet d'accéder à bon nombre de paramètres physiques caractéristiques du composant. Les premiers paramètres qui apparaissent sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque sont le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ), la tension à circuit ouvert ( $V_{co}$ ) et le facteur de forme (FF) du composant.



**Figure III-7 :** Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque.

#### III.4.2. Courant de court-circuit $I_{cc}$ :

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule ( $V = 0$  V dans le schéma équivalent). Il s'agit du courant le plus important que l'on puisse obtenir avec une cellule solaire. Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

#### III.4.3. Tension à circuit ouvert $V_{co}$ :

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Dans le cas de cellules solaires organiques, la  $V_{co}$  est linéairement dépendante du niveau de la HOMO du matériau donneur et du niveau de la LUMO du matériau accepteur. De plus, les pertes de charges aux interfaces matériaux-électrodes peuvent également affecter la valeur de la  $V_{co}$ . Enfin, cette valeur décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.

#### III.4.4. Facteur de forme $FF$ :

Le facteur de forme  $FF$  rend compte de la qualité de la forme des courbes  $I(V)$ . Il est déterminé par l'équation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc}V_{co}} = \frac{I_{max}V_{max}}{I_{cc}V_{co}} \dots\dots\dots (III-4)$$

Où  $I_{max}$  et  $V_{max}$  représentent respectivement le courant et la tension du point de fonctionnement qui permet d'extraire le maximum de puissance ( $P_{max}$ ) de la cellule (**Figure III-7**). Plus la valeur de  $FF$  est grande, plus la caractéristique  $I(V)$  ressemble à celle d'une source idéale de courant  $I_{cc}$  tant que  $V < V_{co}$  et à une source idéale de tension pour  $I > I_{cc}$ . Dans le cas limite  $FF \rightarrow 1$ , la puissance extraite de la cellule est maximale.

#### III.4.5. Rendement quantique externe EQE :

Le rendement quantique est le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre de photons incidents. Lorsque les photons perdus par réflexion (à la

fenêtre de la cellule) et les photons transmis (absorption incomplète) ne sont pas pris en compte, cette valeur s'appelle le rendement quantique interne,  $IQE$  (Internal Quantum Efficiency). Dans le cas contraire, ce paramètre s'appelle le rendement quantique externe,  $EQE$  (External Quantum Efficiency) et se définit comme suit :

$$EQE = \frac{J_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \times \frac{E_{ph}(\lambda)}{e} = \frac{J_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \times \frac{hc}{e\lambda} \quad \dots\dots\dots (III-5)$$

Où  $J_{cc}$  est la densité de courant de court-circuit,  $\varphi$  le flux lumineux incident,  $e$  la charge de l'électron et  $E_{ph}$  l'énergie du photon (avec  $E_{ph}=hc/\lambda$ ,  $h$  étant la constante de Planck,  $c$  la célérité de la lumière dans le vide et  $\lambda$  la longueur d'onde) . Le rapport  $J_{cc}(\lambda)/\varphi(\lambda)$  est appelée « réponse spectrale » de la cellule, elle est notée  $SR(\lambda)$ . Elle représente la sensibilité de la cellule pour chaque longueur d'onde. On peut donc redéfinir le rendement quantique externe comme suit :

$$EQE = SR(\lambda) \times \frac{hc}{e\lambda} \quad \dots\dots\dots (III-6)$$

Le rendement quantique dépend du coefficient d'absorption des matériaux utilisés, de l'énergie d'ionisation, et de l'efficacité de la collecte. Il est mesuré en fonction de la longueur d'onde émise par une source monochromatique. Le rendement de 100% dans le cas idéal correspond à la récolte par les électrodes d'une paire électron-trou par photon incident.

#### III.4.6. Rendement de conversion en puissance $\eta$ :

Le rendement de conversion en puissance  $\eta$  des cellules photovoltaïques se définit comme le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $P_{in}$  :

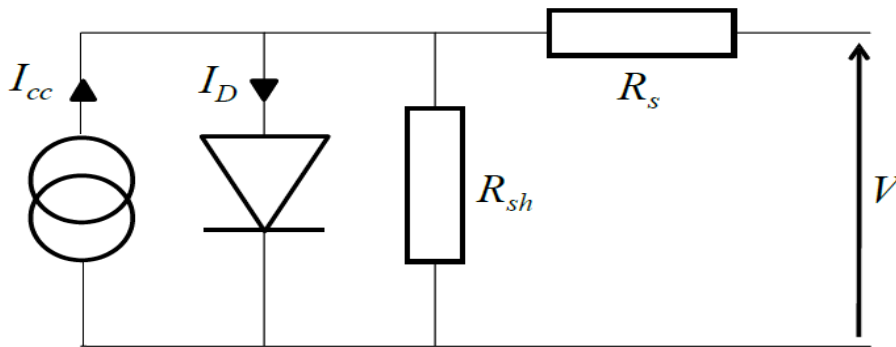
$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \times I_{cc} \times V_{oc}}{P_{in}} \quad \dots\dots\dots (III-7)$$



L'efficacité maximale de conversion d'une cellule n'a de signification que pour une distribution spectrale et une intensité donnée.

#### III.4.7. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque organique :

Si l'on considère le cas simple d'une cellule idéale à jonction donneur-accepteur soumise à un flux lumineux, celle-ci fonctionne comme un générateur de courant. Son schéma équivalent (**Figure III-8**) est représenté par une diode idéale montée en parallèle avec une source de courant.



**Figure III-8** : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque organique.

$R_s$  est une résistance série liée à la résistivité volumique et à l'impédance des électrodes et des matériaux. La pente de la courbe  $I(V)$  au point  $V_{oc}$  représente l'inverse de la résistance série ( $1/R_s$ ).  $R_{sh}$  est une résistance shunt liée aux effets de bord et aux recombinaisons volumiques. La pente de la courbe  $I(V)$  au point  $I_{cc}$  représente l'inverse de la résistance shunt ( $1/R_{sh}$ ). En général, la valeur de  $R_{sh}$  est plus grande que celle de  $R_s$  d'au moins un ordre de grandeur. Pour minimiser les pertes, il faut diminuer  $R_s$  et augmenter  $R_{sh}$ . Le cas idéal est représenté par  $R_{sh}$  égale à l'infini et  $R_s$  égale à zéro. [35]

- Une cellule photovoltaïque dans l'obscurité se comporte comme une diode classique et elle obéit à la loi Shockley qui est la suivante :

$$I_D = I_0 \left[ \exp\left(\frac{qv}{nKT}\right) - 1 \right] \dots\dots\dots (III-8)$$

Avec :  $I_0$  : La courant de saturation  
 $q$  : La Charge de l'électron  
 $K$  : La constante de Boltzmann  
 $T$  : La température  
 $n$  : Le facteur d'idéalité ( $n=2$  pour une diode en silicium)

- Sous éclairage, il faut tenir compte du photocourant généré ( $I_{ph}$ ), on obtient l'équation suivante :

$$I_D = I_0 \left[ \exp\left(\frac{qv}{nKT}\right) - 1 \right] - I_{ph} \dots\dots\dots (III-9)$$

### **Conclusion :**

Les cellules photovoltaïques constituées de semi-conducteurs inorganiques présentent, à l'heure actuelle, de bons rendements de conversion qui font de ce type de cellules la première option pour des applications courantes. Cependant leur coût de production reste encore relativement élevé.

Aujourd'hui, avec des rendements de conversion supérieurs à 6%, les cellules photovoltaïques constituées de matériaux organiques se placent comme de possibles candidates pour remplacer les cellules à base de matériaux inorganiques dans certaines applications (comme par exemple leur intégration dans de petits systèmes portables). Elles présentent également l'avantage de pouvoir être fabriquées sur des grandes surfaces et sur des substrats flexibles ou celui de pouvoir être utilisées comme sources d'énergie embarquée pour des composants actifs.

## **CHAPITRE IV**

### **Caractérisation d'un module PV**

## **IV. Introduction:**

Notre étude consiste à faire une caractérisation d'un module PV à base de cellules solaire organique. Cette opération nécessite deux parties :

*1. La première partie :* C'est la partie théorique où l'on va étudier les différentes caractéristiques mesurées d'un panneau photovoltaïque pour des différentes températures.

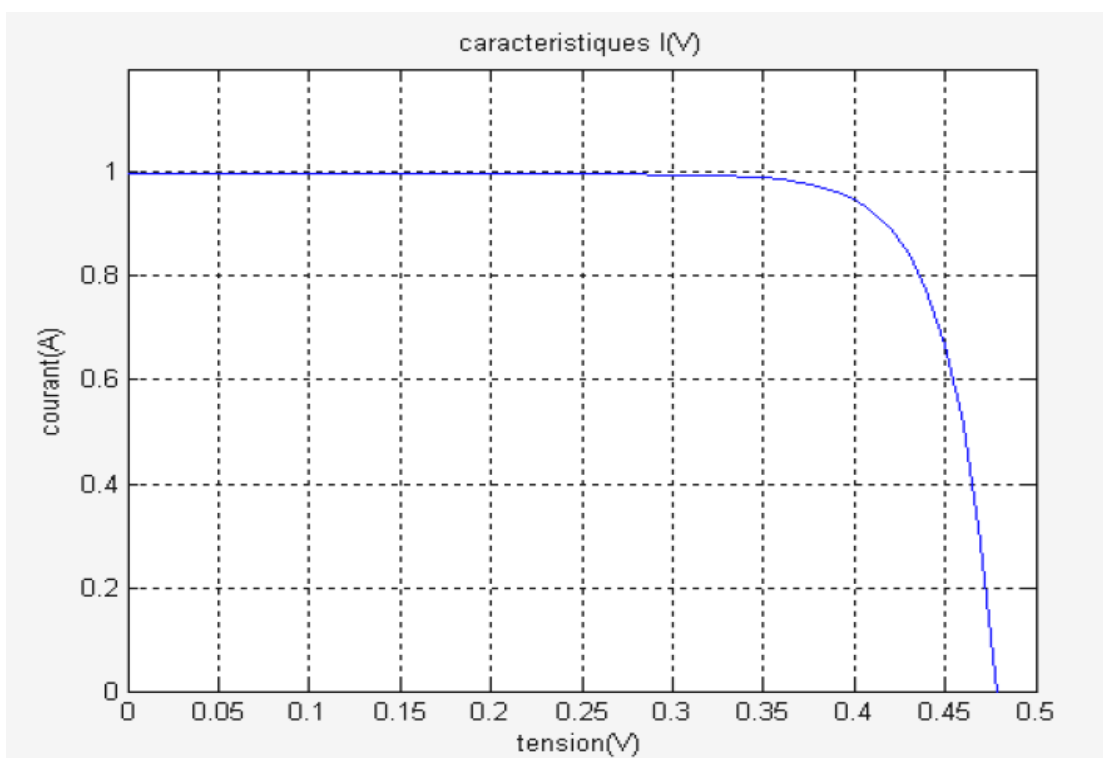
*2. La deuxième partie :* A partir de la simulation réalisée par notre carte d'acquisition d'un PV, nous obtenons les différentes caractéristiques comme indiquée par la suite de ce chapitre.

## **IV.1. Partie théorique :**

### **IV.1.1. Caractéristiques I(V):**

Pour des tensions inférieures de 0.25V à 0.35V, le courant reste indépendant de la tension. Le dispositif se comporte comme un générateur de courant. Ce courant est dû au courant de court circuit généré par le rayonnement solaire.

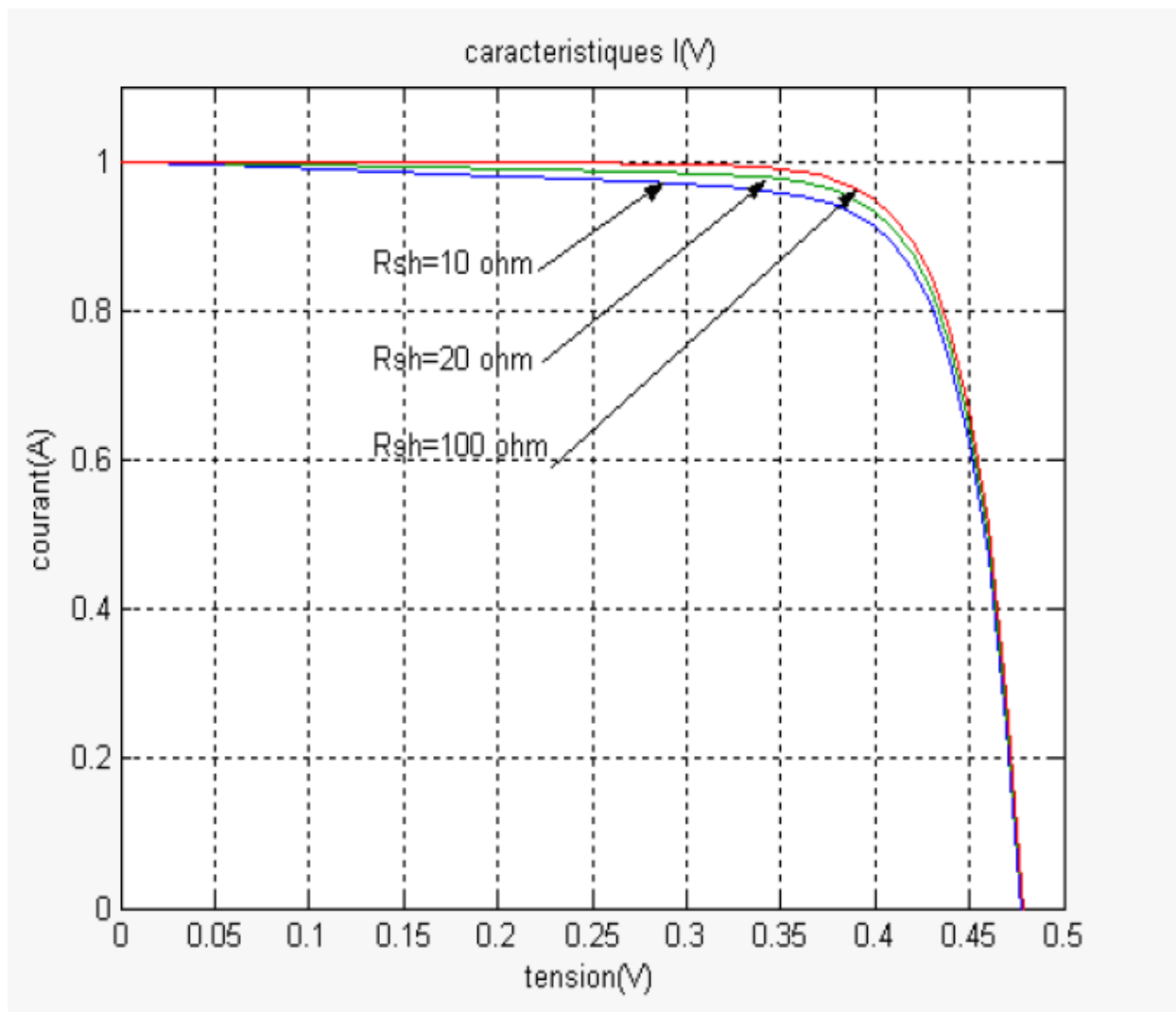
À partir de tensions supérieures à 0.35V, le courant varie et la tension reste pratiquement constante. Le dispositif se comporte comme un générateur de tension, il s'annule pour une tension maximale de circuit ouvert  $V_{oc}$ .



**Figure IV-1 :** Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire

#### IV.1.2. L'influence de la résistance Rsh:

La figure (IV-2) montre l'influence de la résistance shunt Rsh sur la caractéristique courant- tension, l'influence se traduit par une augmentation de la pente de la courbe de puissance de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme générateur à courant constant, lorsque Rsh augmente. On trouve donc que pour augmenter la puissance de la cellule photovoltaïque, il faut que Rsh ne soit pas trop grande, d'où la nécessité d'optimiser Rsh.

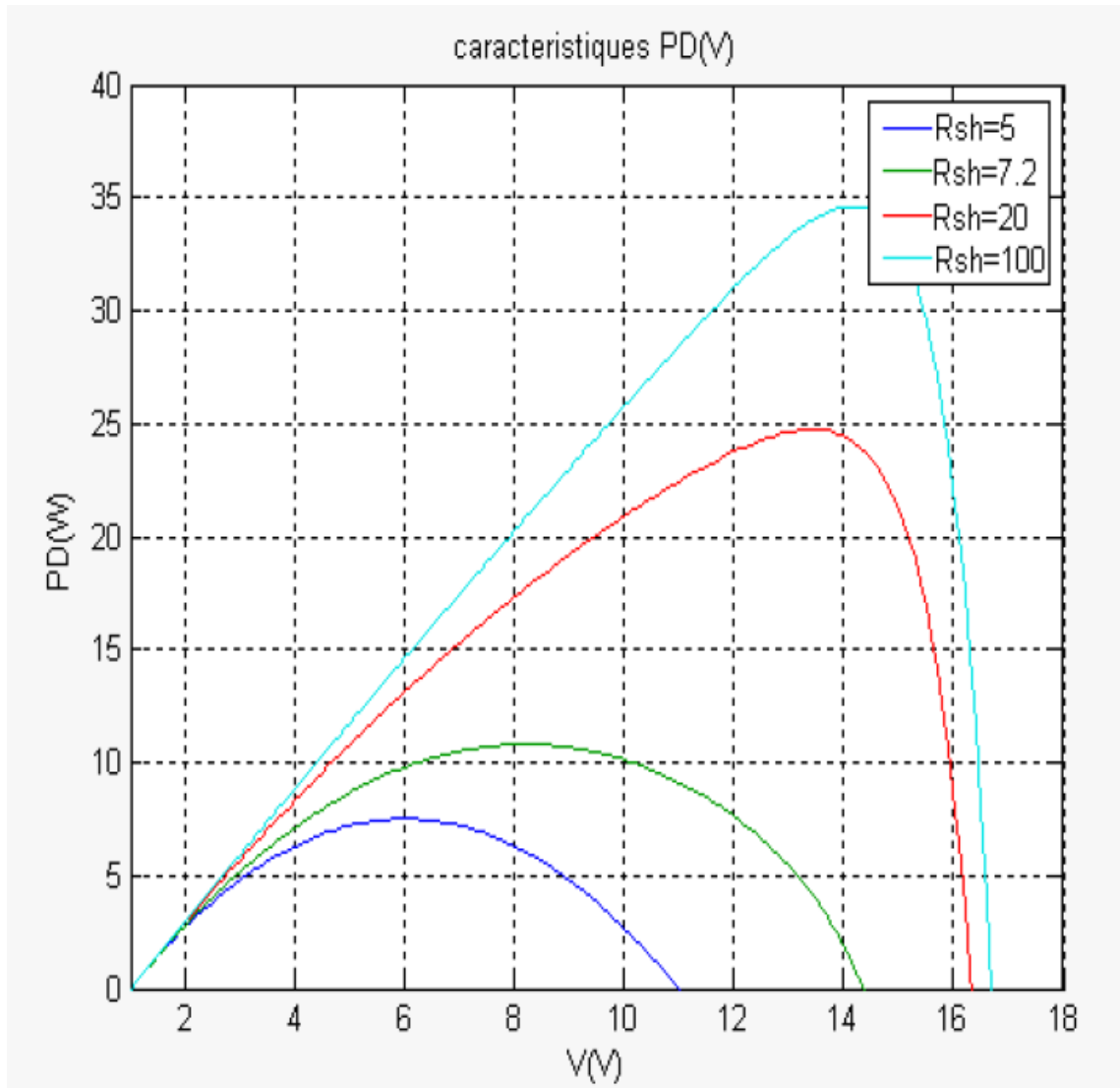


**Figure IV-2 :** L'influence de la résistance shunt sur les caractéristiques courant-tension d'une cellule solaire

### IV.1.3. L'influence de la résistance shunt sur la puissance dissipée:

La figure (IV-3) met en évidence l'influence de la résistance shunt sur la puissance dissipée dont la cellule déficiente est occultée totalement. On remarque :

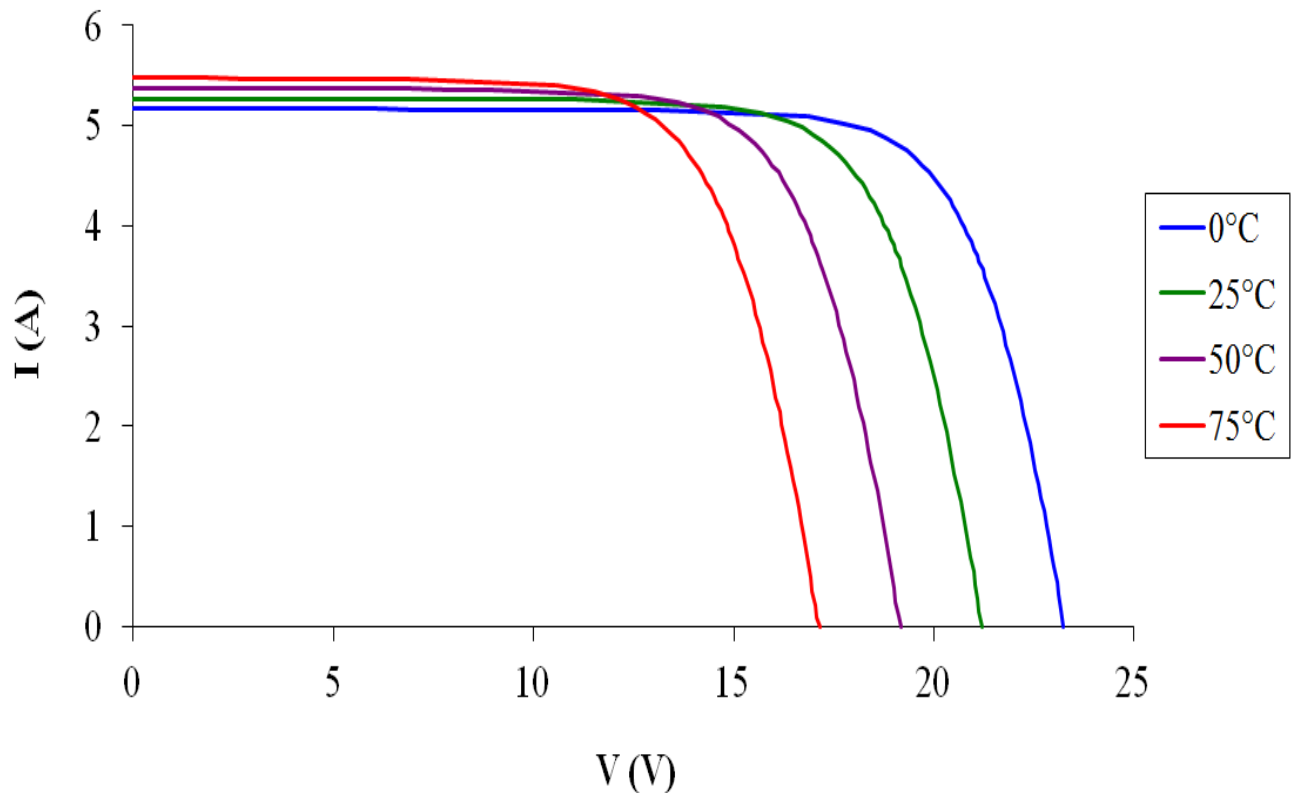
- La résistance shunt a un effet très important sur la puissance dissipée ; la puissance dissipée augmente avec l'augmentation de la résistance shunt et atteint leur maximum pour une valeur de  $R_{sh}$  supérieur à 100 ohm.



**Figure IV-3 :** L'influence de la résistance shunt sur la puissance dissipée

#### IV.1.4. L'influence de la température T:

Cette figure montre l'influence de la température T sur la caractéristique courant- tension du module à chaque point. On remarque que lorsqu'on augmente la température (de 0°C à 75°C) la tension commence à augmenter à partir de 17 jusqu'aux environs de 24 V. [41] [42]

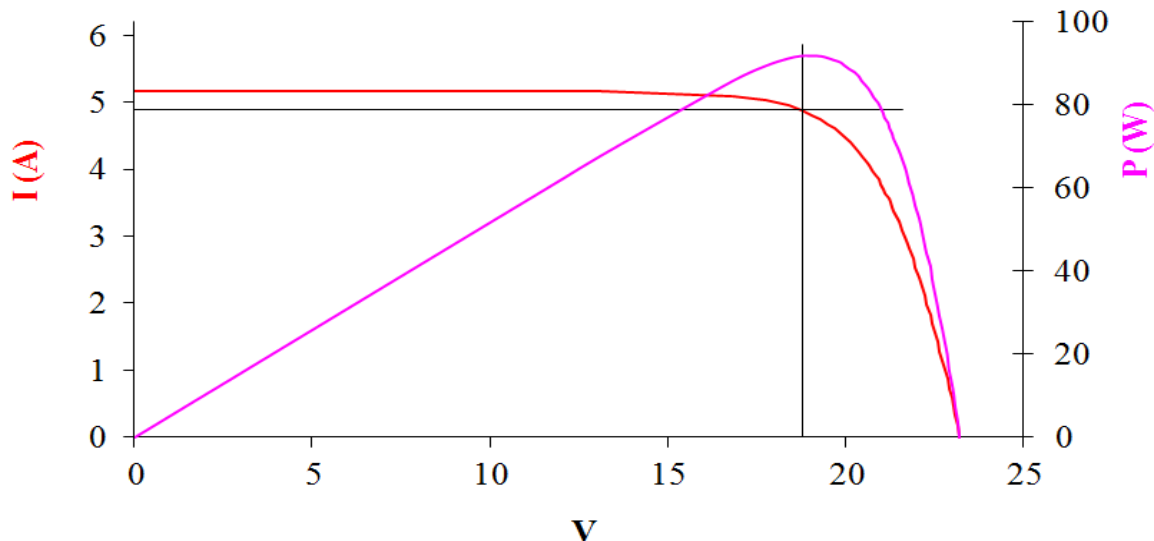


**Figure IV-4 :** L'influence de la température T sur les caractéristiques I(V) d'un panneau PV

IV.1.5. Caractéristiques I(V) et P(V) d'un panneau photovoltaïque:

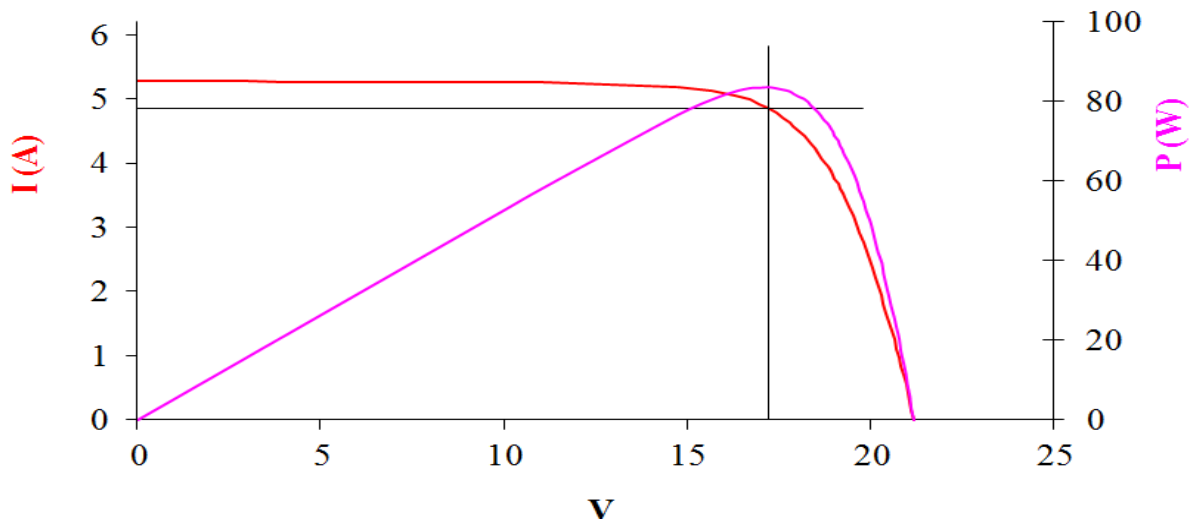
A partir des graphes suivants, on peut déduire la puissance maximale (point optimal) en fonction de la température :

A) Pour  $T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$  :



	Puissance (W)	Tension optimale (V)	Courant optimal (A)
0 °C	91,8	18,8	4,88

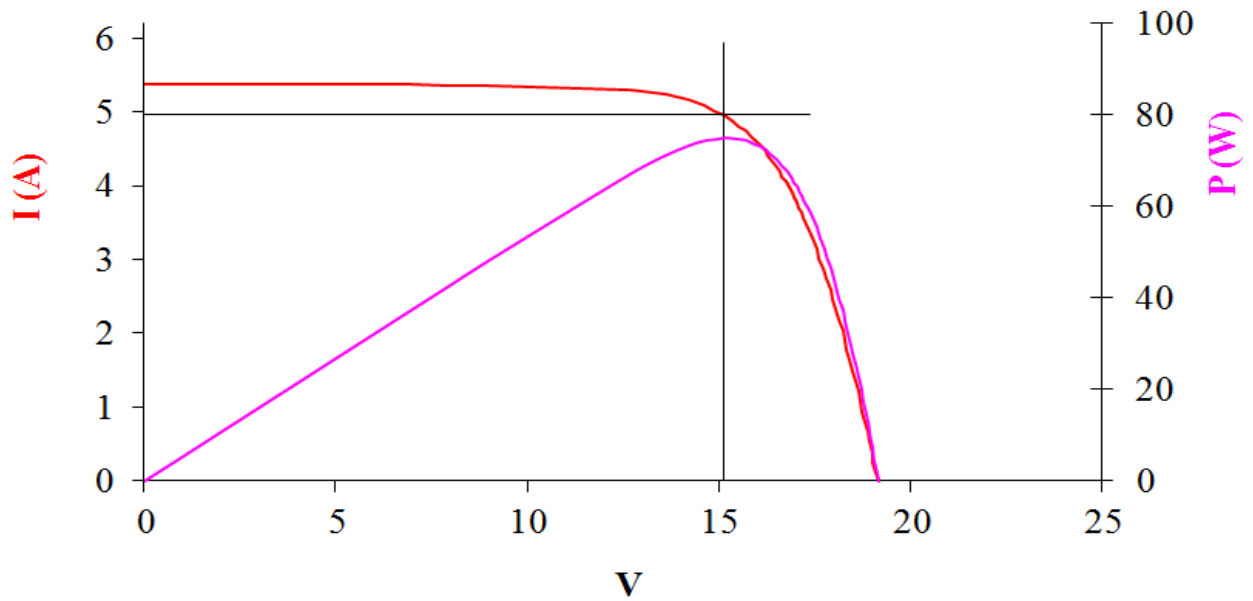
B) Pour  $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$  :



	Puissance (W)	Tension optimale (V)	Courant optimal (A)
25 °C	83,6	17,2	4,85



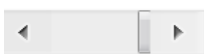
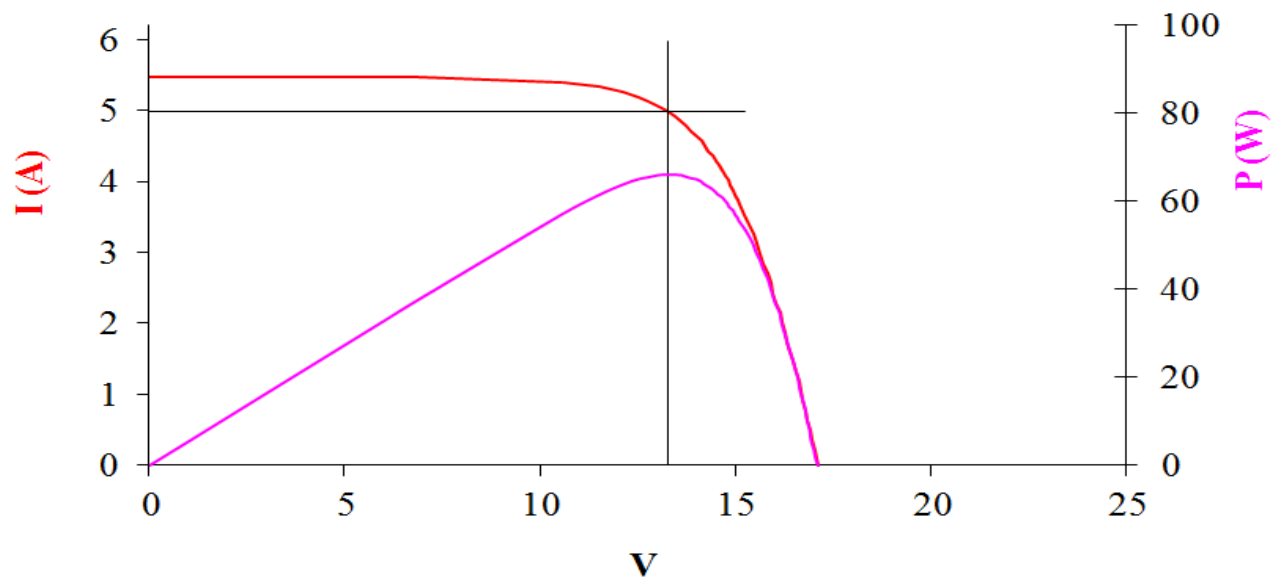
C) Pour  $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$  :



50 °C

Puissance (W)	Tension optimale (V)	Courant optimal (A)
75,0	15,1	4,96

D) Pour  $T=75\text{ }^{\circ}\text{C}$  :



75 °C

Puissance (W)	Tension optimale (V)	Courant optimal (A)
66,1	13,3	4,98

### IV.2. Partie simulation et validation du programme développé:

La carte d'acquisition est dédiée à la mesure automatique de différents paramètres importants à surveiller dans une centrale solaire : comme par exemple le courant de charge de l'accumulateur d'énergie (une batterie de 12V), son courant de décharge, sa tension, la température externe (celle des panneaux photovoltaïques 12V) et la température interne (celle du dispositif). Ces mesures sont acquises périodiquement (une mesure par seconde) et immédiatement visualisées sur un afficheur 7segments. Un sélecteur de paramètre qui est un bouton poussoir est utilisé pour procéder au réglage et pour visualiser le paramètre souhaité de ce dispositif. L'alimentation de l'ensemble est assurée par un circuit régulateur classique: un 78L05 pour délivrer une tension fixe de 5V (utile pour alimenter les capteurs de température LM35DZ et l'afficheur ainsi que les autres éléments de la carte). Cette valeur particulière est dictée par les impératifs du convertisseur analogique numérique 10 bits à 5 canaux internes au PIC16F876A. L'essentiel des fonctions électroniques (mesures, contrôles et régulations) est assuré par un microcontrôleur de la famille Mid-Range, qui utilise des mots de 14 bits (et dont font partie le PIC16F84 et le PIC16F876). Il a été choisi pour sa disponibilité. [38]

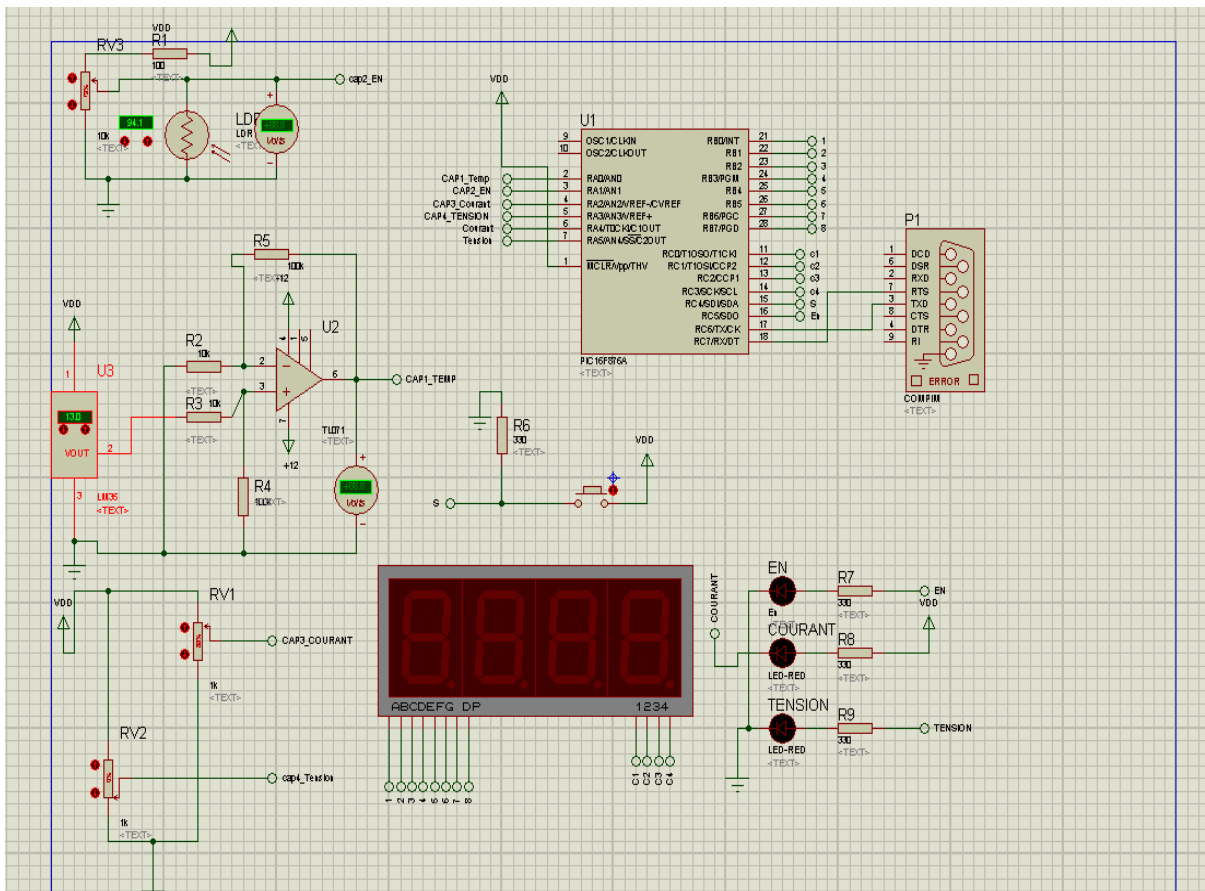


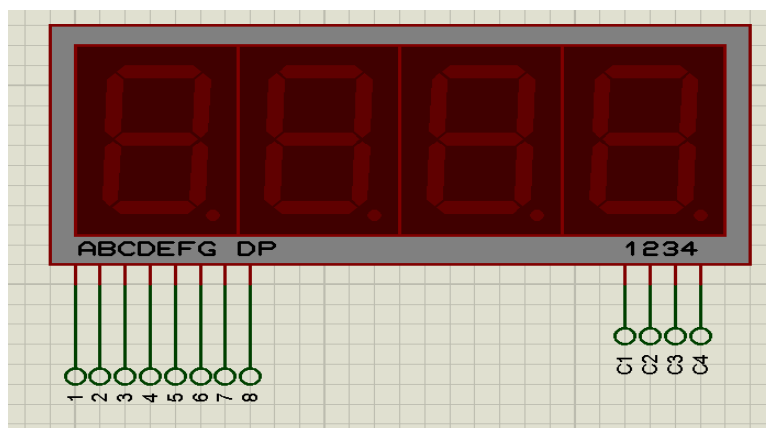
Figure IV-5 : Aperçu de la carte

### IV.2.1. DESCRIPTION HARDWARE:

Le microcontrôleur est un composant bien différent des autres. Il se présente en boîtier doté de plusieurs pattes ; il est basé sur une architecture interne complexe ; on doit le programmer pour qu'il exécute automatiquement les instructions. Dans ce chapitre, on s'intéresse à la description des différents composants étudiés.

#### IV.2.1.A/ Afficheur 04 digits :

Pour l'afficheur 04 digits sept segments on a utilisé un multiplexage de tel sorte à diminuer la consommation du courant qui peut aller jusqu'à 30mA (variable selon le chiffre affiché), mais on a pu l'éviter grâce à une programmation astucieuse en PROTEUS qui nous a permis d'avoir une consommation fixe quelque soit le chiffre affiché.



**Figure IV-6 :** Schéma partiel de l'afficheur 04 digits

#### IV.2.1.B/ Les Capteurs :

Le capteur constitue le premier élément de la chaîne d'acquisition et de traitement de l'information. Un capteur utilisé pour une application quelconque doit être relatif à la grandeur physique caractérisant cette application.

Parmi les différents capteurs utilisés dans le cadre de cette étude, on cite :

- Capteur de courant : La méthode la plus simple pour mesurer le courant traversant un module PV est de mettre une résistance d'une valeur relativement faible, généralement de  $1\Omega$  ; ainsi, la loi Ohm se simplifie et donne  $V=I$  ; donc, notre carte d'acquisition mesure en fait une tension, que l'on peut lire en Ampère. [37]

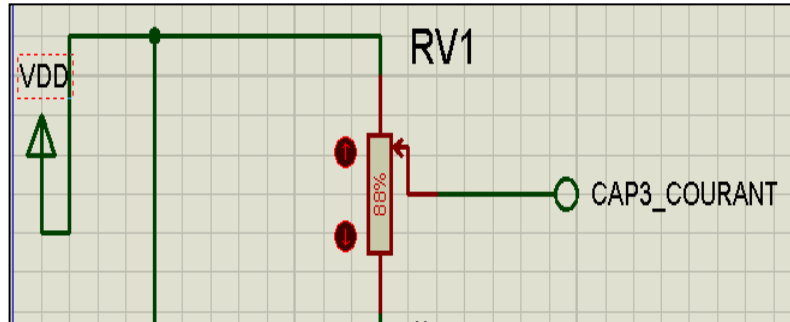


Figure IV-7 : Schéma partiel du capteur de courant

- Capteur de température: La température est une grandeur physique extrêmement importante dans la caractérisation d'un panneau PV, la notion de température est souvent confondue avec la chaleur.

Dans cette étude, on a opté pour le capteur de température analogique LM35 ; cette sonde convertie la température en faible tension, elle est calibrée en usine de tel façon à avoir 0V à 0°C.

[36]

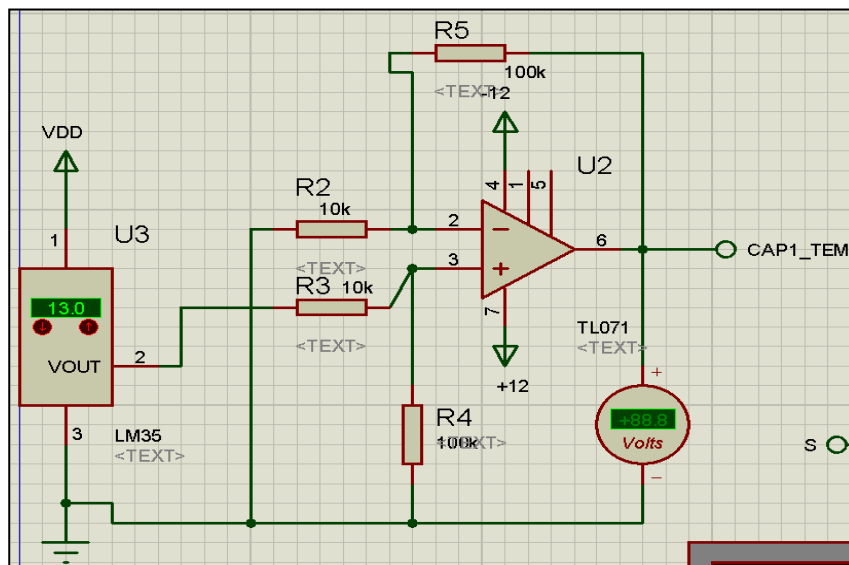
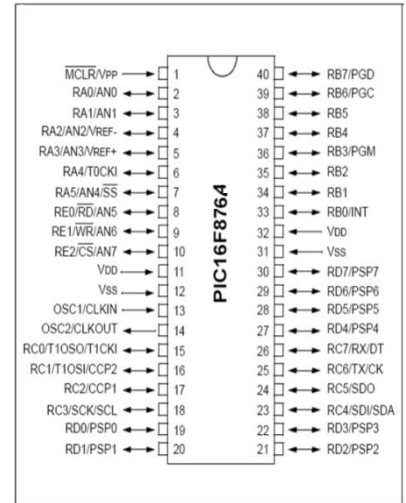


Figure IV-8 : Schéma partiel du capteur de température

**IV.2.1.C/ Le microcontrôleur PIC16F876A :**

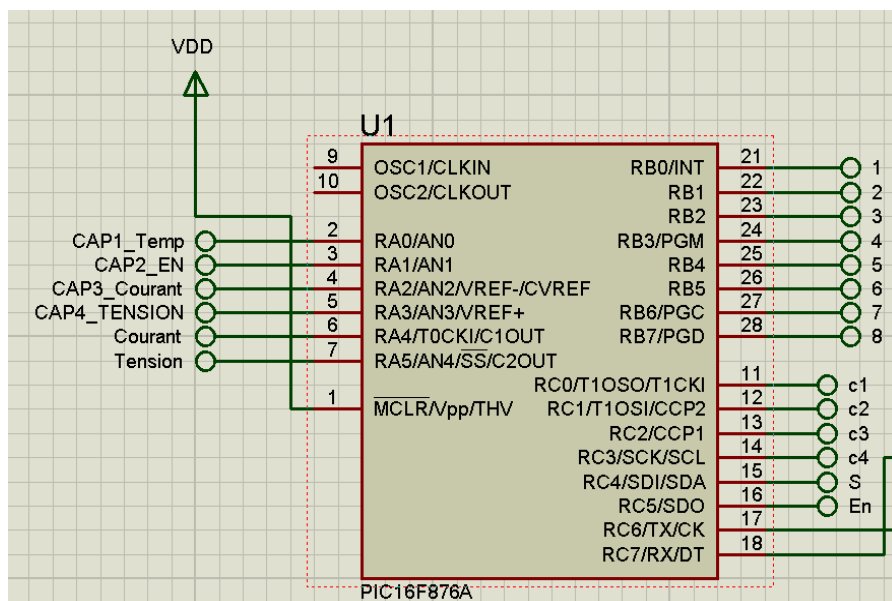
La dénomination PIC (programmable interface controller) est sous copyright de microchip. Les PICs sont des composants à technologie RISC (reduced instructions set computers), c'est-à-dire que ce sont des composants à jeu d'instructions réduit et qu'ils ont une vitesse d'exécution rapide. Les deux chiffres indiquent la catégorie du PIC ici 16 indique un PIC de la famille Mid-Range (milieu de gamme). Ensuite, on peut trouver les lettres suivantes :

- « C » la mémoire programme est une EPROM.
- « CR » la mémoire programme est du type ROM.
- « F » la mémoire programme est de type FLASH. [38]



Le Pic 16F876A est constitué des mémoires suivantes :

- a) **Mémoire programme :** Zone de mémoire permanente dans laquelle est stockée le programme. Cette mémoire contient des instructions que doit exécuter le microcontrôleur, la capacité de stockage est de 8kMots de 14bits.
- b) **Une mémoire RAM :** La zone de mémoire temporaire pour le programme et les données, sa capacité est de 368 octets.
- c) **Une EEPROM :** C'est une mémoire morte à lecture et effacement électrique, elle est d'une capacité de 256 octets.



**Figure IV-9 : Le microcontrôleur PIC16F876A**

✓ **Les entrées / sorties** : Le PIC16F876A dispose de 5 ports d'entrées sorties (port A, port B, port C), chaque port à plusieurs utilisations ; parmi ses utilisations de base, on cite la communication avec l'extérieur.

✓ **Timers** : Un Timer est un registre interne au microcontrôleur, celui-ci s'incrémente au gré d'une horloge. Ce registre peut servir par exemple à réaliser des temporisations, ou bien pour faire du comptage, le PIC16F876A possède trois Timers (Timer 0, Timer 1, Timer 2). [38]

✓ **Les instructions du Pic** : Le PIC16F876A appartient à la famille MIDE-RANGE. Cette famille utilise 35 instructions. Il existe 4 types d'instructions :

- Les instructions « orientées octets ».
- Les instructions « orientées bits ».
- Les instructions générales.
- Les sauts et appels de sous programmes.

Chaque instruction est stockée dans un seul mot de programme, elle est aussi exécutée en un seul cycle machine sauf s'il s'agit de sauts. [38] [39]

✓ **La programmation** : Pour programmer un microcontrôleur, il est nécessaire de connaître sa structure interne, Il faut aussi disposer d'un éditeur de texte pour rédiger les programmes, d'un logiciel d'assemblage pour le traduire en langage machine et si possible d'un simulateur pour mettre son programme au point.

➤ Nous avons utilisé le langage C avec **MikroC v8** sous Windows XP, car ce langage est:

- universel : C n'est pas orienté vers un domaine d'applications spéciales.
- compact : C est basé sur un noyau de fonctions et d'opérateurs limités qui permet la formulation d'expressions simples mais efficaces.
- moderne : C est un langage structuré, déclaratif et récursif. Il offre des structures de contrôle et de déclaration comme le langage Pascal.
- près de la machine : C offre des opérateurs qui sont très proches de ceux du langage machine (manipulations de bits, pointeurs...). C'est un atout essentiel pour la programmation des systèmes embarqués.
- rapide : C permet de développer des programmes concis et rapides.

- indépendant de la machine : C est un langage près de la machine (microprocesseur) mais il peut être utilisé sur n'importe quel système ayant un compilateur C.
- portable : En respectant le standard ANSI-C, il est possible d'utiliser (théoriquement) le même programme sur tout autre système (autre microcontrôleur), simplement en le recompilant.
- extensible : C peut être étendu et enrichi par l'utilisation de bibliothèque de fonctions achetées ou récupérées (logiciels libres...).

✓ **La simulation** : on a utilisé **PROTEUS** qui est une suite logicielle composé de logiciel

Principal : **ISIS**, permettant entre autres la création de schémas et la simulation électrique. Grâce à des modules additionnels, ISIS est également capable de simuler le comportement d'un microcontrôleur (PIC) et son interaction avec les composants qui l'entourent.

- **Saisie de schémas sous Isis:** L'écran se compose de plusieurs parties:

- la zone de travail, dans laquelle sera disposé le schéma,
- la zone de contrôle qui permet de se déplacer d'un endroit à un autre de la zone de travail.
- le clavier.
- la liste des objets sélectionnés pour réaliser le schéma. [40]

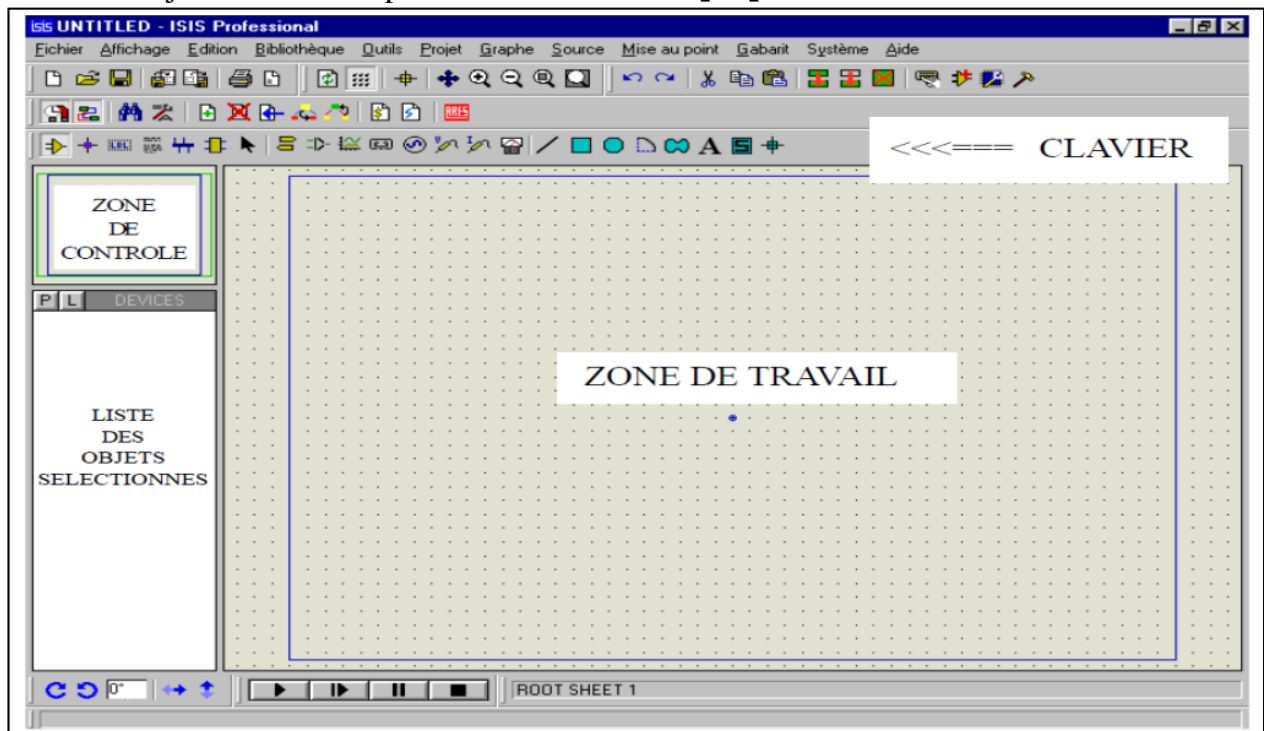


Figure IV-10 : Définition des dimensions de la feuille de travail

### ✓ l'interface graphique :

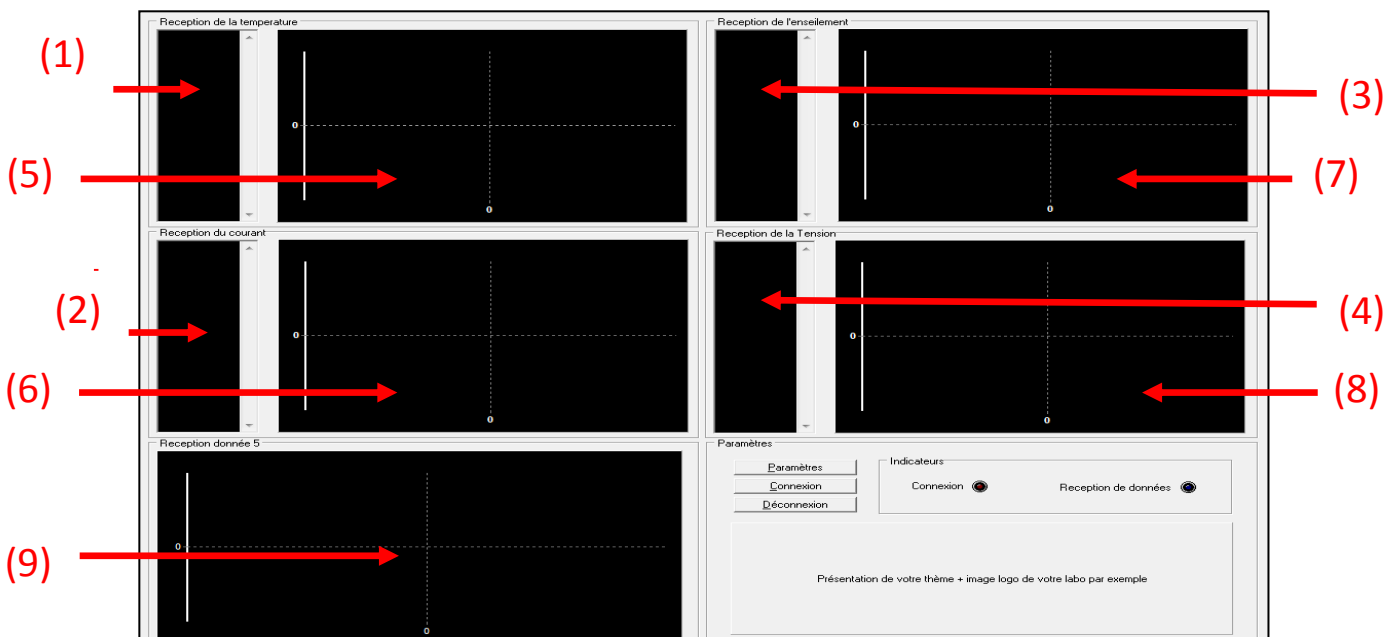
**C++ Builder** est un outil de développement rapide (RAD) d'interface graphique pour différentes applications. Il permet aux développeurs d'applications de créer facilement des interfaces graphiques pour leurs programmes.

Pour faciliter la communication entre l'utilisateur et la carte, nous avons réalisé une interface graphique et un composant spécialisé (TComPort) pour la lecture à travers le port série d'un PC et l'affichage des mesures acquises par notre carte.

#### IV.2.2. Définition des différentes parties de la vue réalisée :

L'interface réalisée contient les parties suivantes :

1. Partie pour la réception des mesures de la température.
2. Partie pour la réception des mesures du courant.
3. Partie pour la réception des mesures de l'ensoleillement.
4. Partie pour la réception des mesures de la tension.
5. Graphe schématisant les mesures de la température acquise.
6. Graphe schématisant les mesures du courant acquis.
7. Graphe schématisant les mesures de l'ensoleillement acquis.
8. Graphe schématisant les mesures de la tension acquise.
9. Graphe schématisant les mesures I(V) acquise.



**Figure IV-11 :** Définition des différentes parties de l'interface réalisée.



➤ Pour avoir les différentes mesures sur l'interface précédente, il faut :

- 1- Exécuter PROTEUS 7 Professional ISIS.
- 2- Lancer le fichier qui contient la programmation de la carte (\*.DSN)
- 3-l'apparition de la vue suivante :

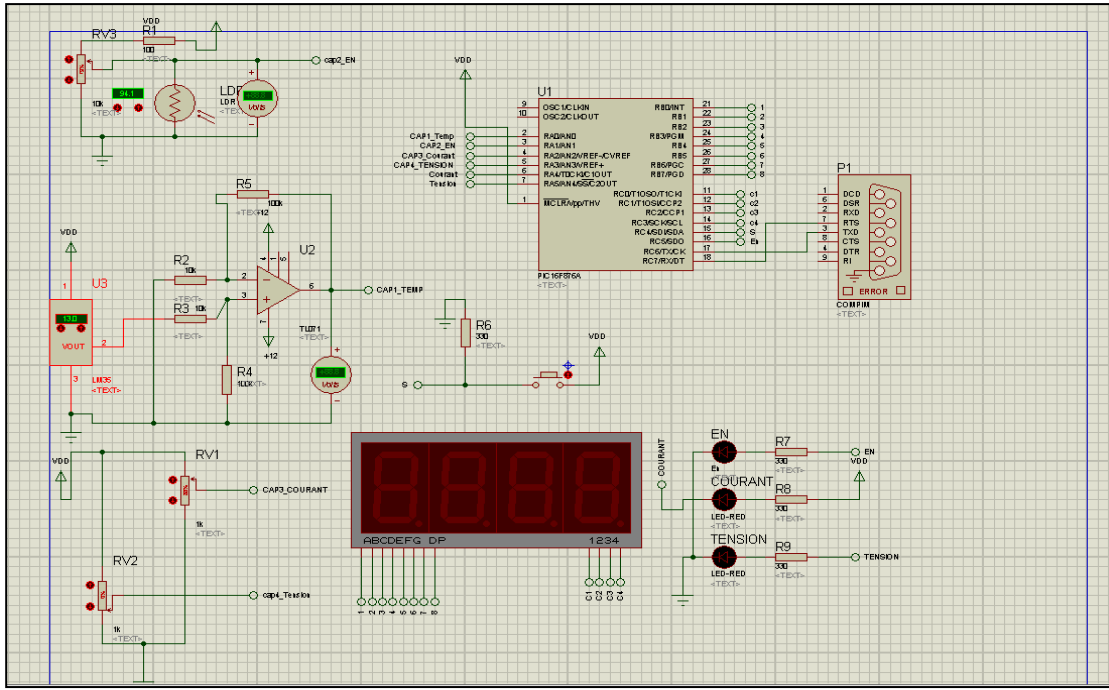


Figure IV-12 : l'interface de la carte sous PROTEUS

4- En cliquant sur le bouton **PLAY**, la fenêtre suivante apparaît :

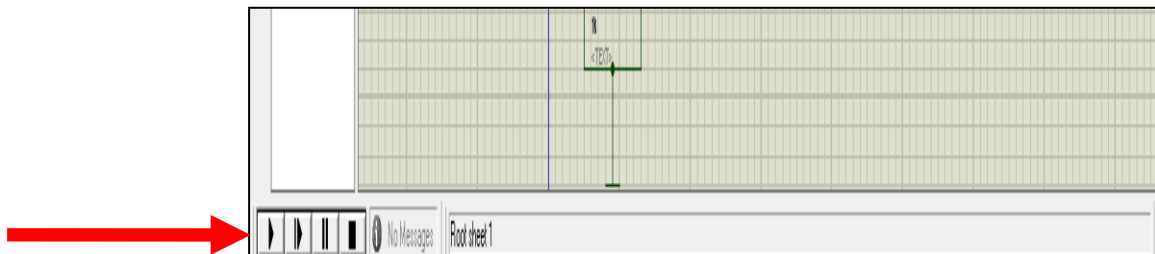


Figure IV-13 : lancement de la simulation

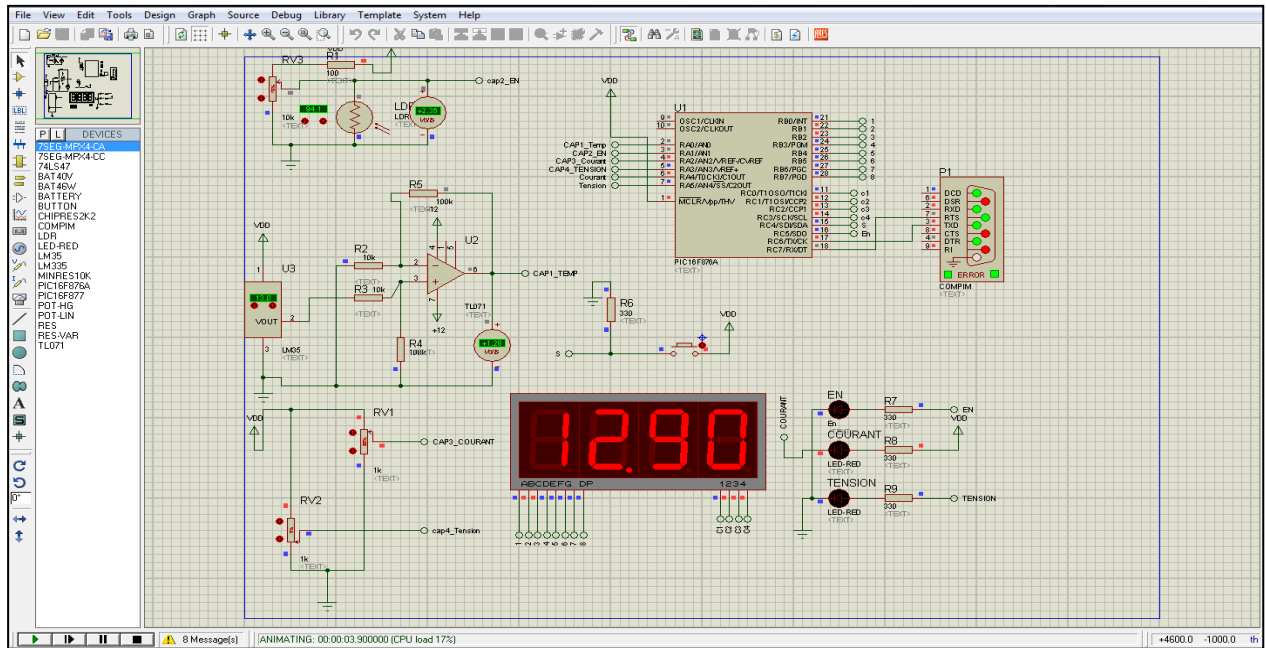


Figure IV-14 : Aperçu de la simulation de la carte.

5- Exécuter C++Builder 6.

6- Lancer le fichier (\*.exe).

7- En cliquant sur le bouton **Connexion**, l'interface en **Builder** est prête à réceptionner les mesures de la carte de simulation :

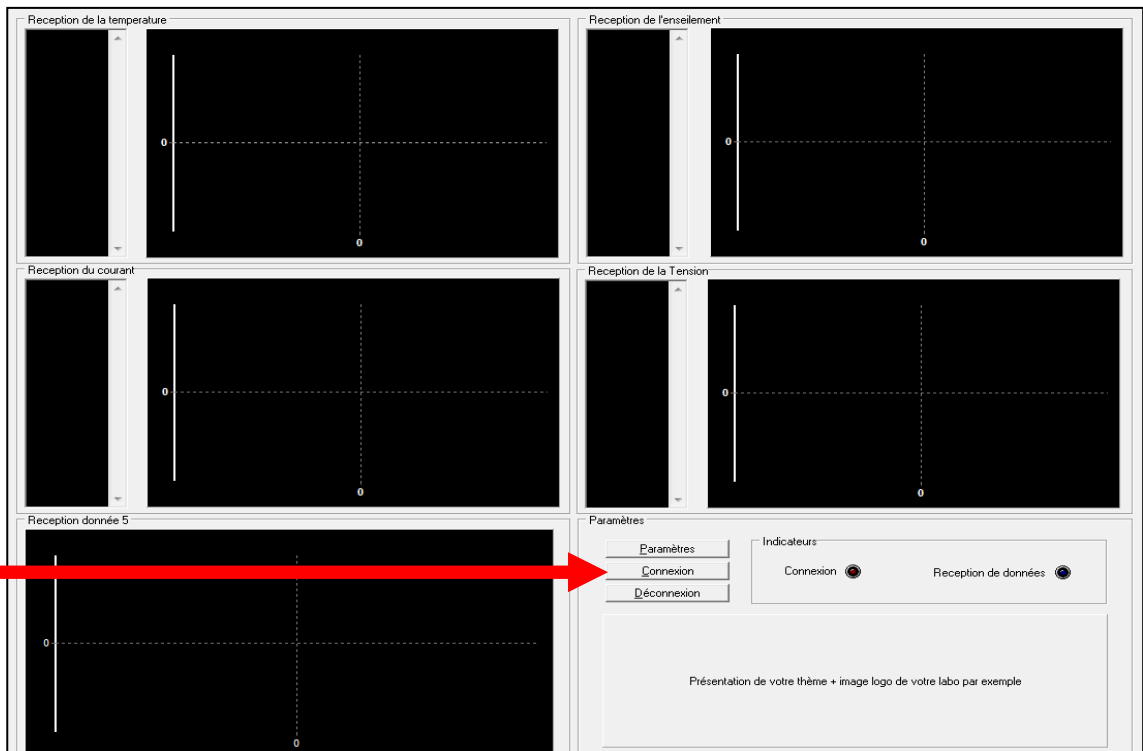
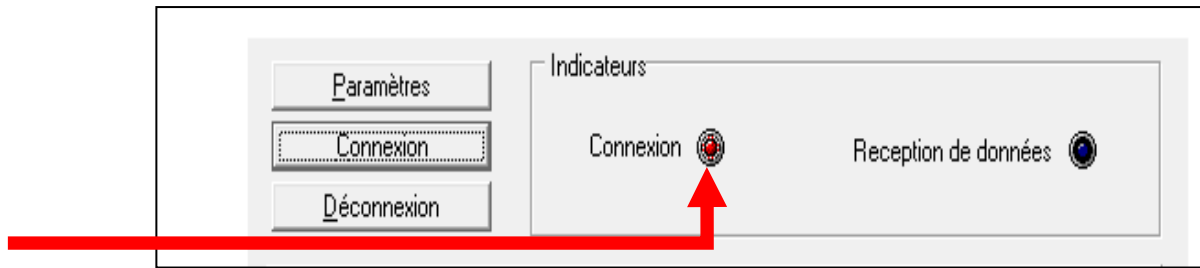


Figure IV-15 : Aperçu de connexion avec la carte d'acquisition

8- Une LED est allumée qui confirme la connexion :



9- L'apparition des différentes mesures ainsi que leurs graphes sur l'interface ci-dessous :

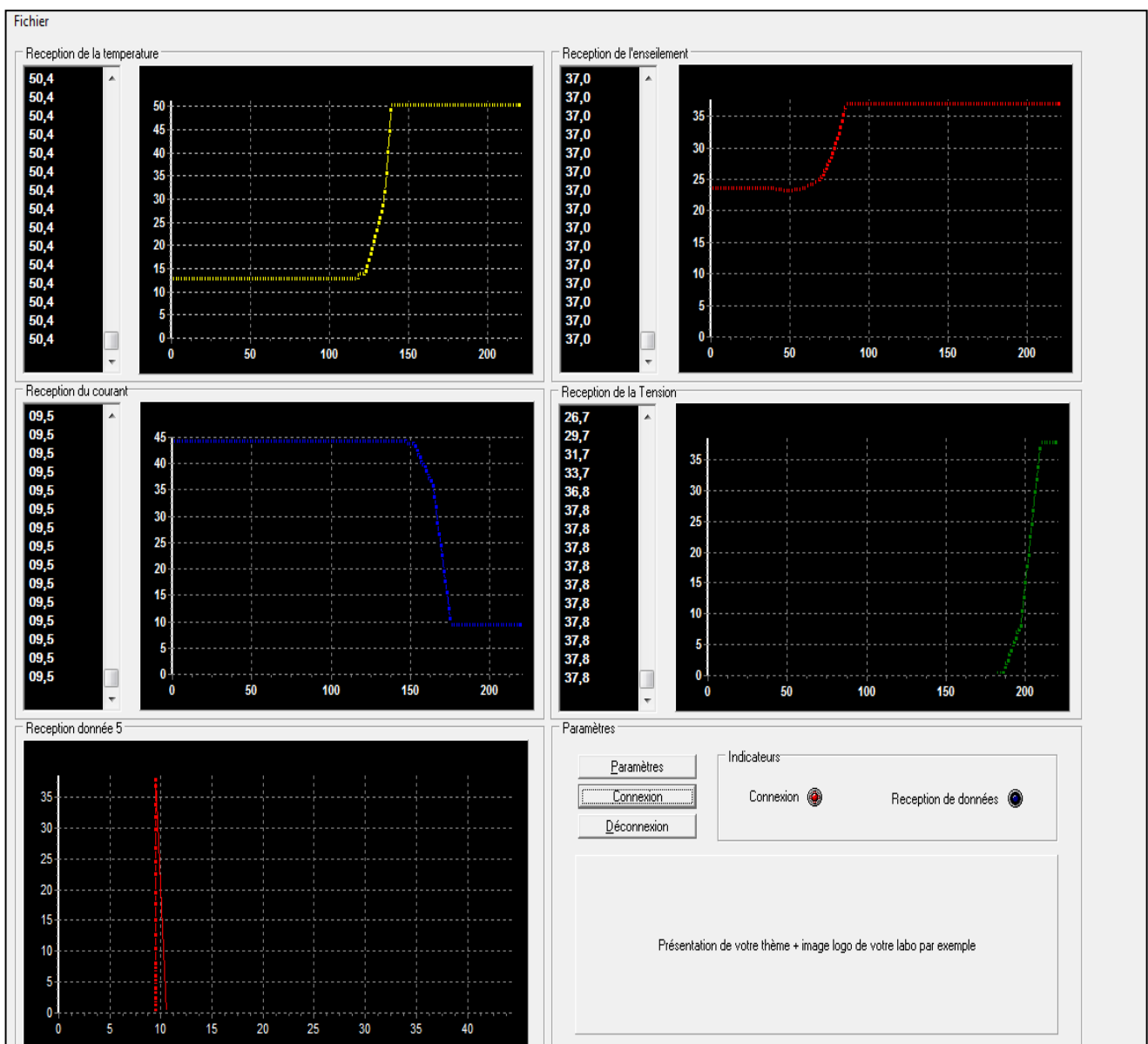


Figure IV-16 : Les différentes caractéristiques d'un module PV

## Conclusion Générale

Les cellules photovoltaïques sont parfois utilisées seules (éclairage de jardin, calculatrice, ...) ou bien regroupées sur des panneaux solaires photovoltaïques.

Elles sont très utilisées en remplacement des piles (dont l'énergie est de loin la plus chère pour l'utilisateur ; même pour le fabricant, un compartiment pile et la pile éventuellement fournie peuvent coûter plus cher qu'une cellule), pourvu que le dispositif ne réclame pas trop d'énergie par rapport à la surface qu'on peut accorder au générateur photovoltaïque, et qu'il y ait assez de lumière pendant l'usage : les cellules ont envahi calculette, montres, gadgets, etc.

Il est possible d'augmenter leur gamme d'utilisation avec un stockage (condensateur ou batterie). Lorsqu'elles sont utilisées avec un dispositif de stockage de l'énergie, il est indispensable de placer une diode en série pour éviter la décharge du système pendant la nuit.

Elles sont utilisées pour produire de l'électricité pour de nombreuses applications (satellites, parcmètres, ...), ainsi que pour alimenter des habitations ou un réseau public de distribution dans le cas d'une centrale solaire photovoltaïque.

La technique n'a pas atteint la maturité et de nombreuses pistes de recherches sont explorées ; il s'agit d'abord de faire baisser le prix de revient de l'électricité produite, mais aussi d'obtenir des progrès en matière de rusticité, de souplesse d'usage, de facilité d'intégration dans des objets, de durée de vie, etc. Des accroissements du rendement de leurs cellules sont périodiquement annoncés par toutes les sociétés de fabrication.

Voici quelques objectifs que l'industrie japonaise s'est donnés :

<b>Thème</b>	<b>Cible 2010</b>	<b>Cible 2020</b>	<b>Cible 2030</b>
Coût de production	100 yen/watt	75 yen/watt	<50 yen/watt
Durée de vie	-	+30 ans	-
Consommation de matière première	-	-	1 g/watt
Coût du convertisseur	-	-	15 000 yen/kW
Coût de la batterie	-	10 yen/Wh	-
Efficacité cellule cristalline	20 %	25 %	25 %
Efficacité cellule couche mince	15 %	18 %	20 %
Efficacité cellule CIS	19 %	25 %	25 %
Efficacité cellule III-V	40 %	45 %	50 %
Efficacité cellule "Dye Sensitized"	10 %	15 %	18 %

**ANNEXE**



# PIC16F87X

## 28/40-Pin 8-Bit CMOS FLASH Microcontrollers

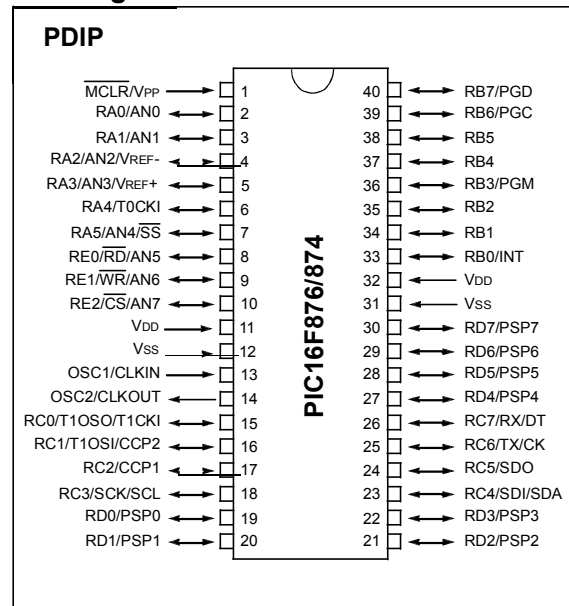
### Devices Included in this Data Sheet:

- PIC16F873
- PIC16F876
- PIC16F874
- PIC16F877

### Microcontroller Core Features:

- High performance RISC CPU
- Only 35 single word instructions to learn
- All single cycle instructions except for program branches which are two cycle
- Operating speed: DC - 20 MHz clock input  
DC - 200 ns instruction cycle
- Up to 8K x 14 words of FLASH Program Memory,  
Up to 368 x 8 bytes of Data Memory (RAM)  
Up to 256 x 8 bytes of EEPROM Data Memory
- Pinout compatible to the PIC16C73B/74B/76/77
- Interrupt capability (up to 14 sources)
- Eight level deep hardware stack
- Direct, indirect and relative addressing modes
- Power-on Reset (POR)
- Power-up Timer (PWRT) and  
Oscillator Start-up Timer (OST)
- Watchdog Timer (WDT) with its own on-chip RC  
oscillator for reliable operation
- Programmable code protection
- Power saving SLEEP mode
- Selectable oscillator options
- Low power, high speed CMOS FLASH/EEPROM  
technology
- Fully static design
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP) via two  
pins
- Single 5V In-Circuit Serial Programming capability
- In-Circuit Debugging via two pins
- Processor read/write access to program memory
- Wide operating voltage range: 2.0V to 5.5V
- High Sink/Source Current: 25 mA
- Commercial, Industrial and Extended temperature  
ranges
- Low-power consumption:
  - < 0.6 mA typical @ 3V, 4 MHz
  - 20 µA typical @ 3V, 32 kHz
  - < 1 µA typical standby current

### Pin Diagram



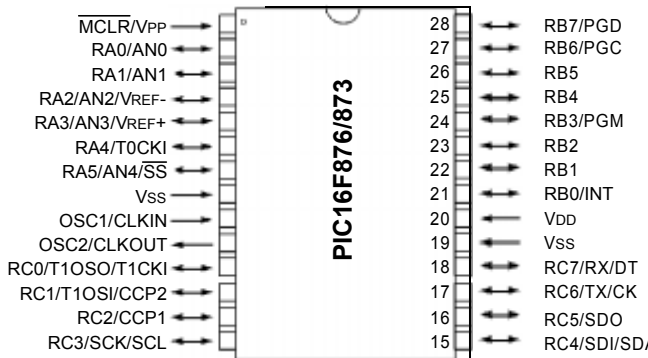
### Peripheral Features:

- Timer0: 8-bit timer/counter with 8-bit prescaler
- Timer1: 16-bit timer/counter with prescaler,  
can be incremented during SLEEP via external  
crystal/clock
- Timer2: 8-bit timer/counter with 8-bit period  
register, prescaler and postscaler
- Two Capture, Compare, PWM modules
  - Capture is 16-bit, max. resolution is 12.5 ns
  - Compare is 16-bit, max. resolution is 200 ns
  - PWM max. resolution is 10-bit
- 10-bit multi-channel Analog-to-Digital converter
- Synchronous Serial Port (SSP) with SPI™ (Master  
mode) and I<sup>2</sup>C™ (Master/Slave)
- Universal Synchronous Asynchronous Receiver  
Transmitter (USART/SCI) with 9-bit address  
detection
- Parallel Slave Port (PSP) 8-bits wide, with  
external RD, WR and CS controls (40/44-pin only)
- Brown-out detection circuitry for  
Brown-out Reset (BOR)

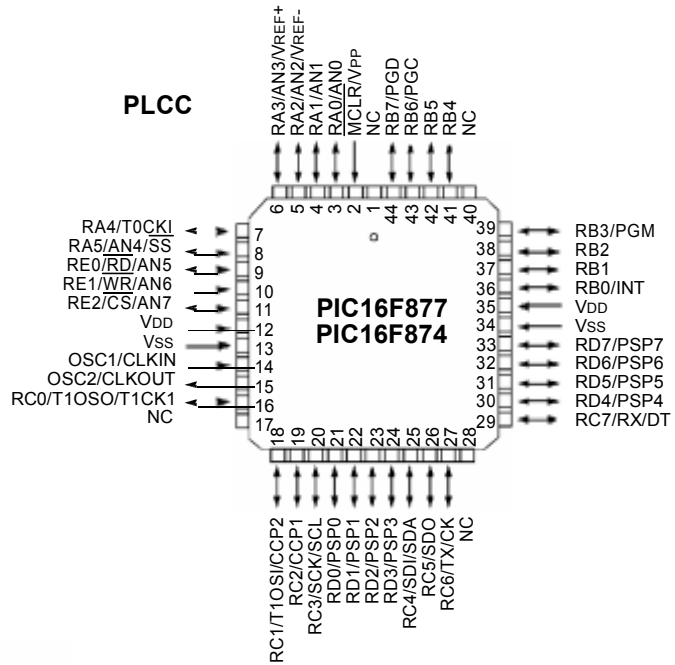
# PIC16F87X

## Pin Diagrams

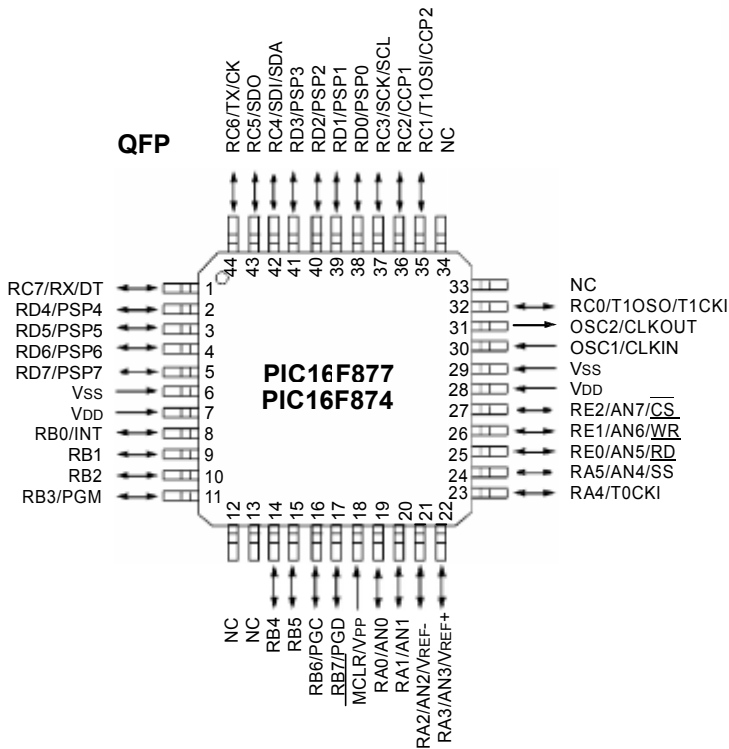
### PDIP, SOIC



### PLCC



### QFP





# PIC16F87X

---

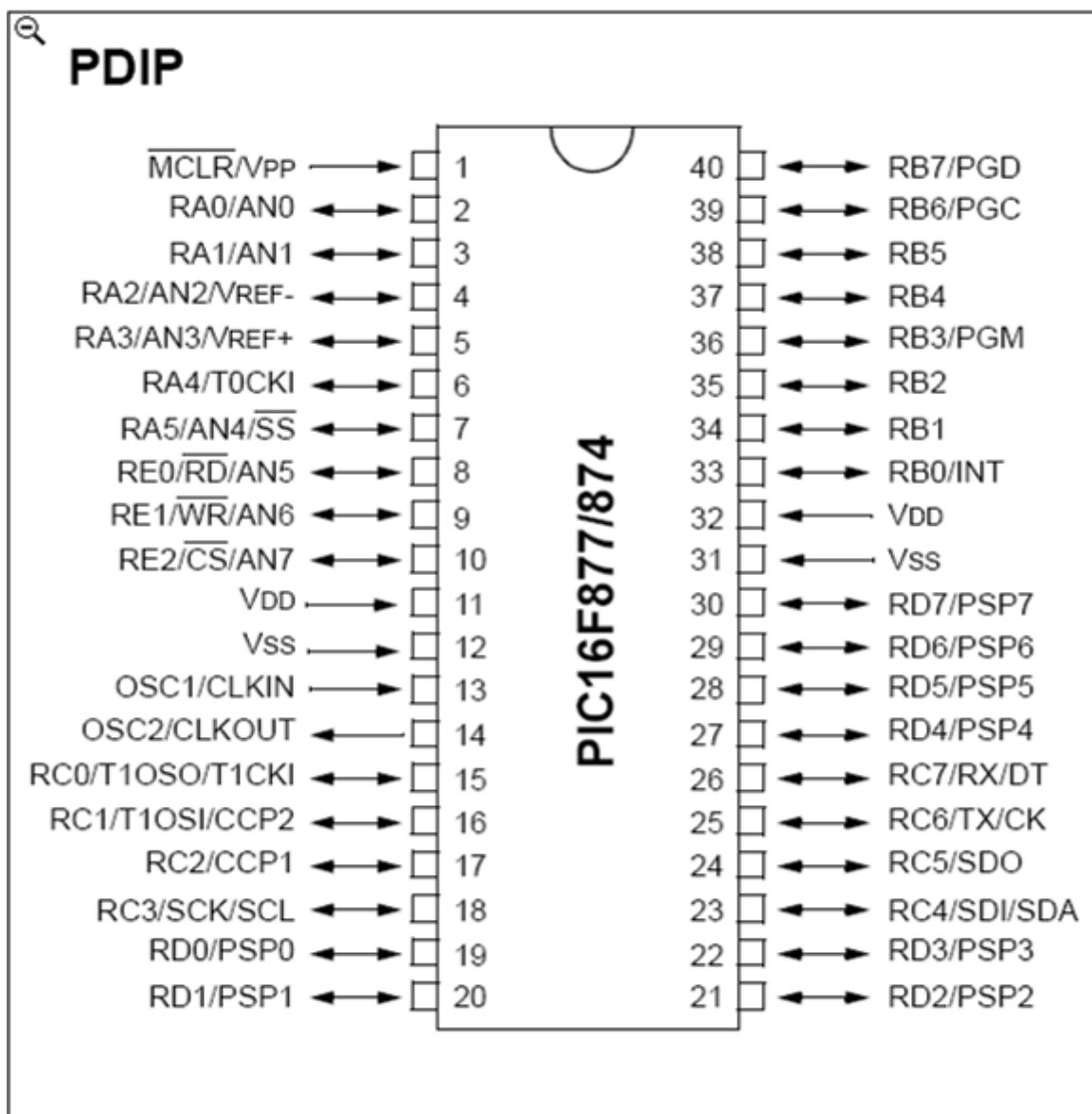
<b>Key Features PICmicro™ Mid-Range Reference Manual (DS33023)</b>	<b>PIC16F873</b>	<b>PIC16F874</b>	<b>PIC16F876</b>	<b>PIC16F877</b>
Operating Frequency	DC - 20 MHz	DC - 20 MHz	DC - 20 MHz	DC - 20 MHz
RESETS (and Delays)	POR, BOR (PWRT, OST)	POR, BOR (PWRT, OST)	POR, BOR (PWRT, OST)	POR, BOR (PWRT, OST)
FLASH Program Memory (14-bit words)	4K	4K	8K	8K
Data Memory (bytes)	192	192	368	368
EEPROM Data Memory	128	128	256	256
Interrupts	13	14	13	14
I/O Ports	Ports A,B,C	Ports A,B,C,D,E	Ports A,B,C	Ports A,B,C,D,E
Timers	3	3	3	3
Capture/Compare/PWM Modules	2	2	2	2
Serial Communications	MSSP, USART	MSSP, USART	MSSP, USART	MSSP, USART
Parallel Communications	—	PSP	—	PSP
10-bit Analog-to-Digital Module	5 input channels	8 input channels	5 input channels	8 input channels
Instruction Set	35 instructions	35 instructions	35 instructions	35 instructions

---

# Famille Mid-Range de Microchip

## LE PIC 16F876/877

A. Oumnad



# ***I Introduction***

Un microcontrôleur est un composant électronique *Autonome* doté :

- d'un microprocesseur,
- de la mémoire RAM,
- de la mémoire permanente,
- des interfaces d'E/S //, série (RS232,I2C, SPI ...)
- des interfaces d'E/S analogique
- Des Timer pour gérer le temps
- D'autres module plus au moins sophistiqués selon la taille des  $\mu\text{C}$

Il est généralement moins puissant qu'un microprocesseur en terme de rapidité ou de taille mémoire, il se contente le plus souvent d'un bus 8 ou 16 bits. Ceci en fait un composant très bon marché parfaitement Adapté pour piloter les applications embarquées dans de nombreux domaines d'application. Je pense qu'on ne se tromperait pas beaucoup si on affirme qu'aujourd'hui il y'a un microcontrôleur ( $\pm$  grand) dans chaque équipement électronique :

- Informatique (souris, modem ...)
- Vidéo (Appareil photos numérique, caméra numérique ...)
- Contrôle des processus industriels (régulation, pilotage)
- Appareil de mesure (affichage, calcul statistique, mémorisation)
- Automobile (ABS, injection, GPS, airbag)
- Multimédia (téléviseur, carte audio, carte vidéo, MP3, magnétoscope)
- Téléphones (fax, portable, modem)
- Electroménager (lave-vaisselle, lave-linge, four micro-onde)

Un microcontrôleur peut être programmé une fois pour toutes afin qu'il effectue une ou des tâches précises au sein d'un appareil électronique. Mais les  $\mu\text{C}$  récents peuvent être reprogrammés et ceci grâce à leur mémoire permanente de type FLASH (d'où le terme flasher quelque chose)

Plusieurs Constructeurs se partagent le marché des microcontrôleurs, citons INTEL, MOTOROLA, AMTEL, ZILOG, PHILIPS et enfin MICROCHIP avec ses PICs très populaires qui nous intéresse ici dans ce cours.

Les microcontrôleurs, quelque soit leurs constructeurs, ont des architecture très similaires et sont constitués de modules fondamentaux assurant les mêmes fonctions : UAL, Ports d'E/S, interfaces de communications série, Interfaces d'E/S analogiques, Timers et horloge temps réels ...On peut dire que seul le langage de programmation (Assembleurs) constitue la différence majeure en deux microcontrôleur (similaires) venant de deux constructeurs différents.

Nous avons choisit dans ce cours d'apprendre les microcontrôleurs à travers une étude détaillée des microcontrôleur 16F87x (x=3, 4, 6, 7) qui constitue les éléments fondamentaux de la famille mid-range qui est la famille « moyenne puissance » de Microchip

## I.1 Les PICs de Microchip

Les PICs sont des microcontrôleurs à architecture RISC (Reduce Instructions Construction Set), ou encore composant à jeu d'instructions réduit. L'avantage est que plus on réduit le nombre d'instructions, plus leur décodage sera rapide ce qui augmente la vitesse de fonctionnement du microcontrôleur.

La famille des PICs est subdivisée en 3 grandes familles : La famille **Base-Line**, qui utilise des mots d'instructions de 12 bits, la famille **Mid-Range**, qui utilise des mots de 14 bits (et dont font partie la 16F84 et 16F876), et la famille **High-End**, qui utilise des mots de 16 bits.

Les PICs sont des composants STATIQUES, Ils peuvent fonctionner avec des fréquences d'horloge allant du continu jusqu'à une fréquence max spécifique à chaque circuit. Un PIC16F876-04 peut fonctionner avec une horloge allant du continu jusqu'à 4 MHz.

Nous nous limiterons dans ce document à la famille Mid-Range et particulièrement au PIC 16F876/877, sachant que si on a tout assimilé, on pourra facilement passer à une autre famille, et même à un autre microcontrôleur.

PIC	FLASH	RAM	EEPROM	I/O	A/D	Port //	Port Série
16F870	2K	128	64	22	5	NON	USART
16F871	2K	128	64	33	8	PSP	USART
16F872	2K	128	64	22	5	NON	MSSP
16F873	4K	192	128	22	5	NON	USART/MSSP
16F874	4K	192	128	33	8	PSP	USART/MSSP
16F876	8K	368	256	22	5	NON	USART/MSSP
16F877	8K	368	256	33	8	PSP	USART/MSSP

Tableau I.1 : différents circuit de la famille 16F87X

Les éléments essentiels du PIC 16F876 sont :

- Une mémoire programme de type EEPROM flash de 8K mots de 14 bits,
- Une RAM donnée de 368 octets,
- Une mémoire EEPROM de 256 octets,
- Trois ports d'entrée sortie, A (6 bits), B (8 bits), C (8 bits),
- Convertisseur Analogiques numériques 10 bits à 5 canaux,
- USART, Port série universel, mode asynchrone (RS232) et mode synchrone
- SSP, Port série synchrone supportant I2C
- Trois TIMERS avec leurs Prescalers, TMR0, TMR1, TMR2
- Deux modules de comparaison et Capture CCP1 et CCP2
- Un chien de garde,
- 13 sources d'interruption,
- Générateur d'horloge, à quartz (jusqu' à 20 MHz) ou à Oscillateur RC
- Protection de code,
- Fonctionnement en mode sleep pour réduction de la consommation,
- Programmation par mode ICSP (*In Circuit Serial Programming*) 12V ou 5V,
- Possibilité aux applications utilisateur d'accéder à la mémoire programme,
- Tension de fonctionnement de 2 à 5V,
- Jeux de 35 instructions

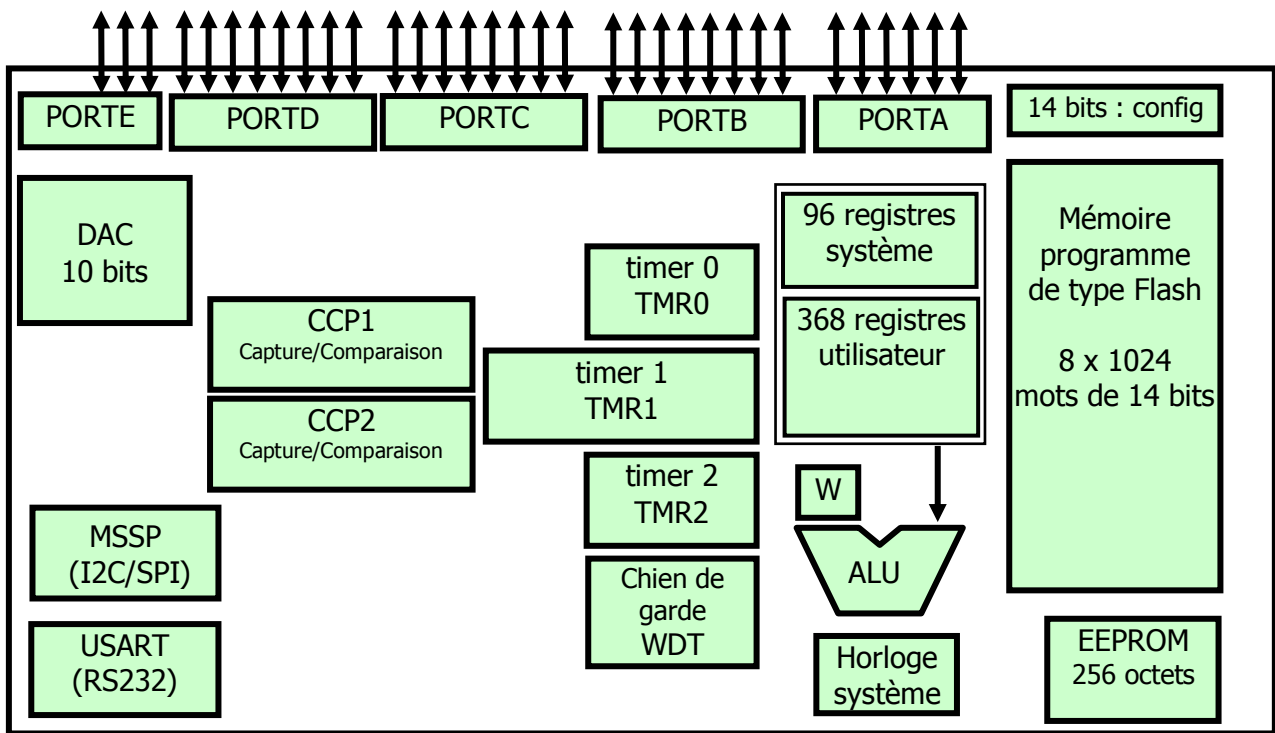
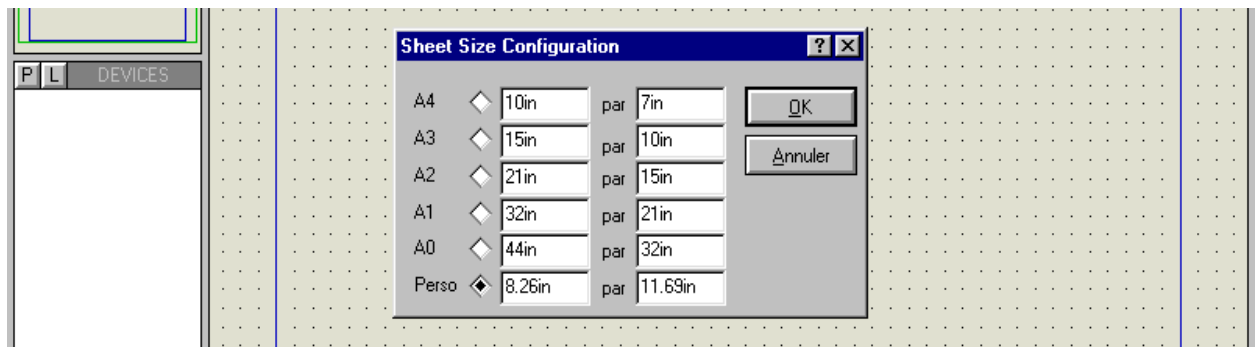
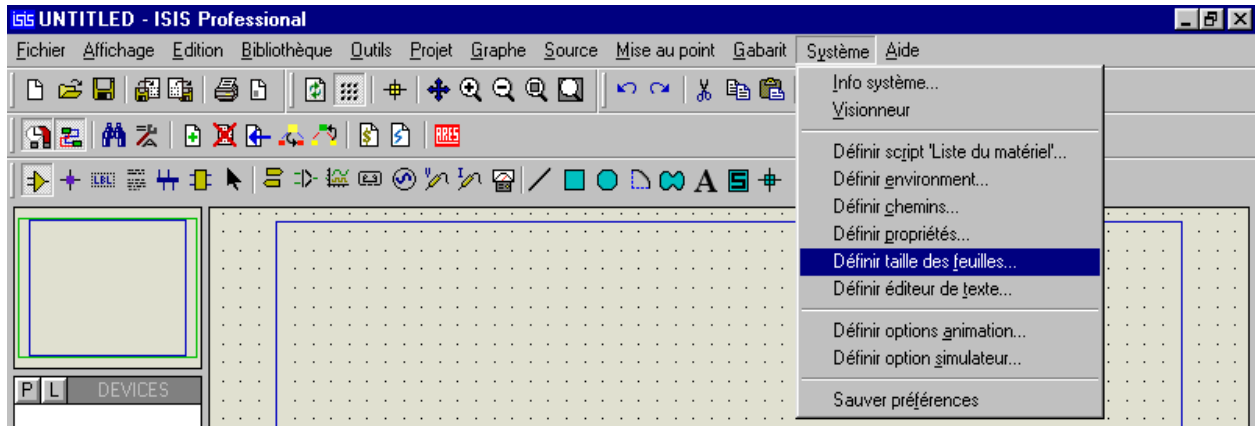


Fig. I.1 : Les éléments constitutifs du PIC 16F877

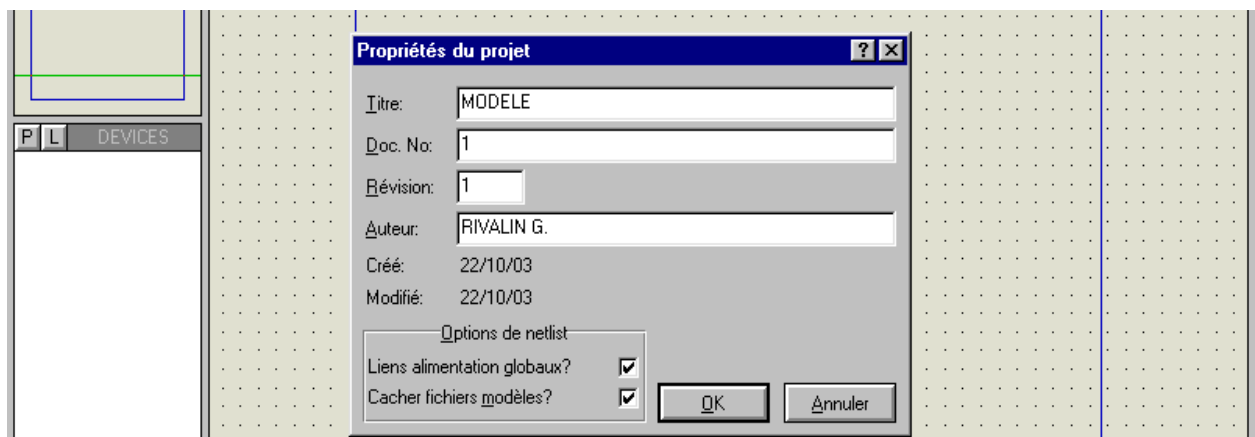
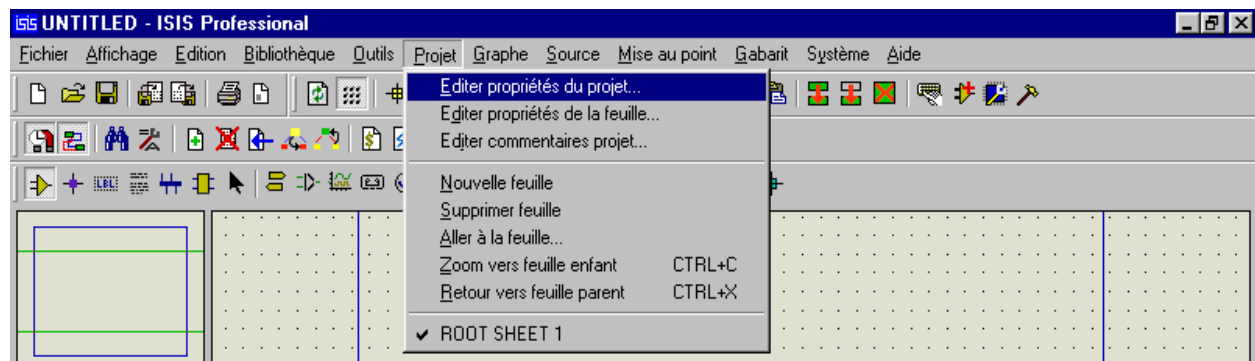
Le port D (8 bits) et le port E (3 bits) ne sont pas disponibles sur tous les processeurs. (Voir Tableau I.1)

# MANUEL CONDENSÉ D'UTILISATION DU LOGICIEL PROTEUS 6.2

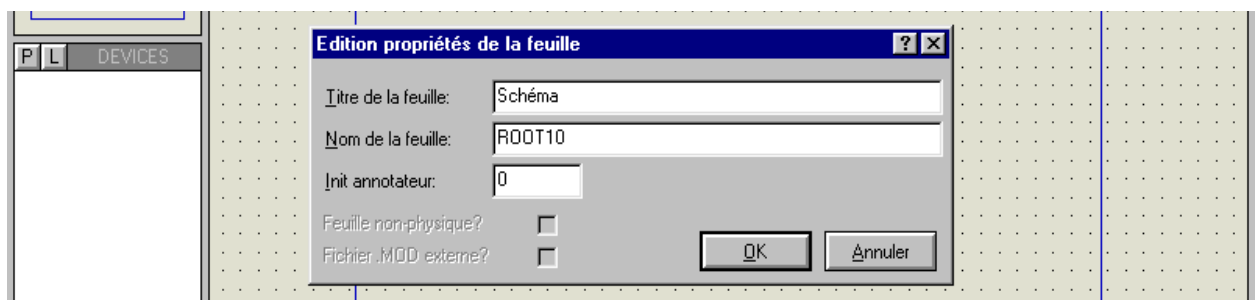
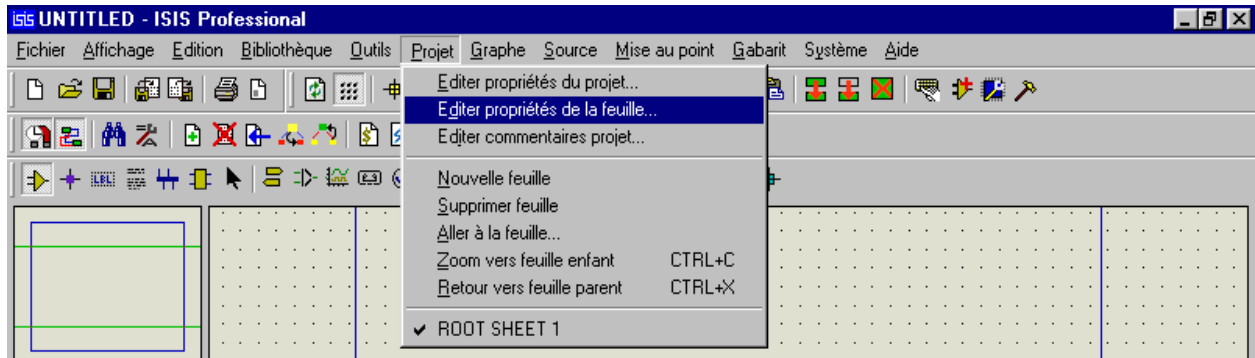


## DEFINITION DES PROPRIETES DU DESSIN:

Sélectionnez dans le menu déroulant "**Projet**" l'instruction "**Editer propriétés du projet**", puis éditez les propriétés, ...

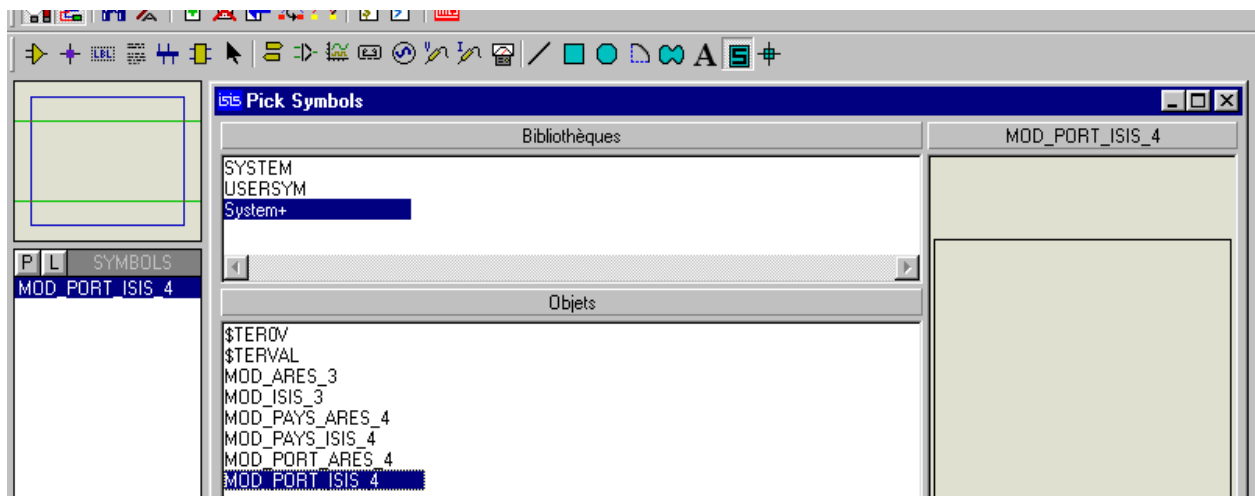


celles-ci apparaîtront ensuite dans le cartouche, avec les propriétés de la feuille, qu'il faut définir de la façon suivante: sélectionnez dans le menu déroulant "**Projet**" l'instruction "**Editer propriétés de la feuille**", puis éditer les propriétés demandées.

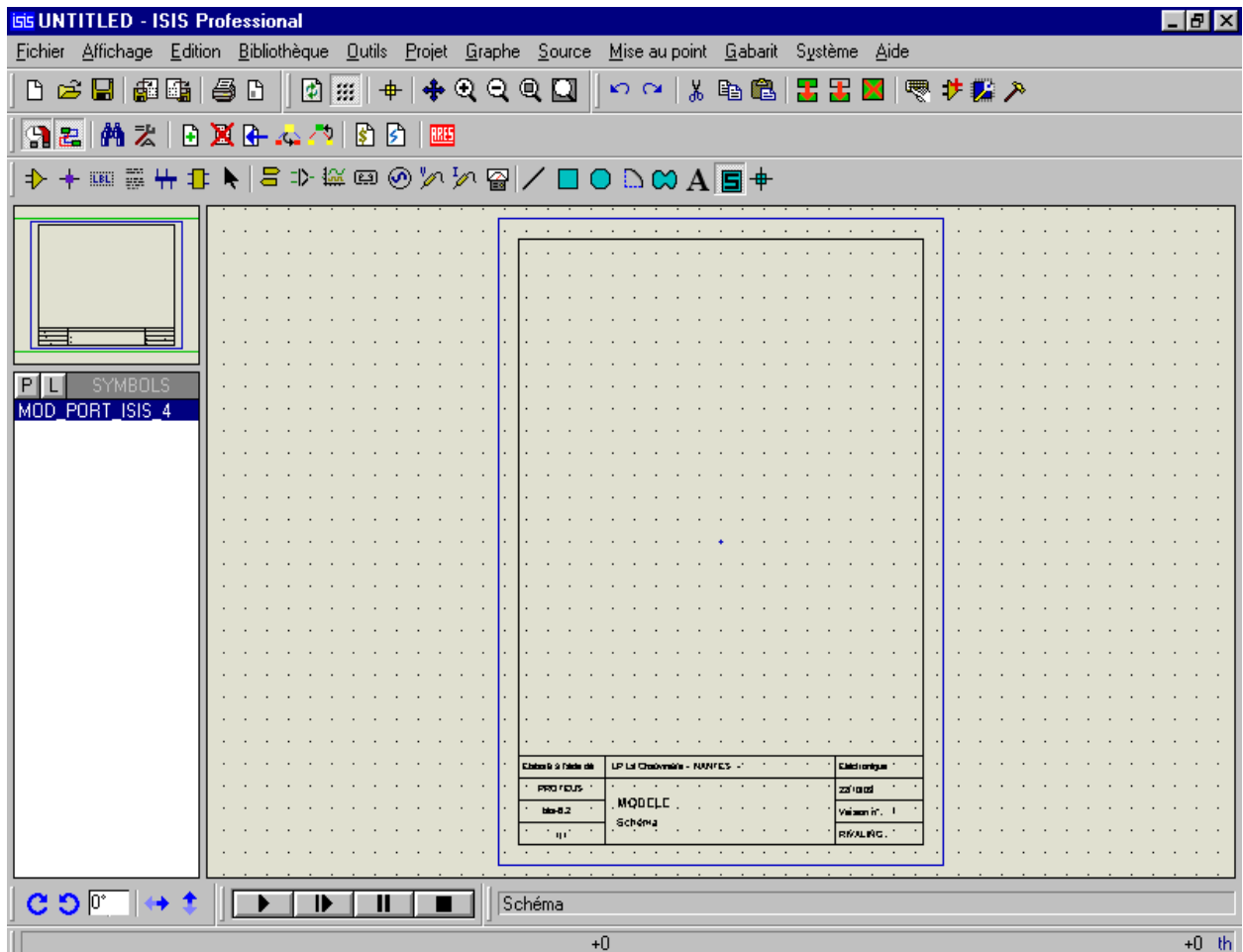


## PLACEMENT DU CARTOUCHE:

Sélectionnez la touche "**Symbole graphique 2D**" du clavier, puis cliquez sur la lettre P (**Prendre symboles**); les cartouches figurent dans la librairie **System+**, choisissez alors celui qui vous convient, double clic gauche sur le modèle souhaité qui apparait alors dans la liste des objets sélectionnés.

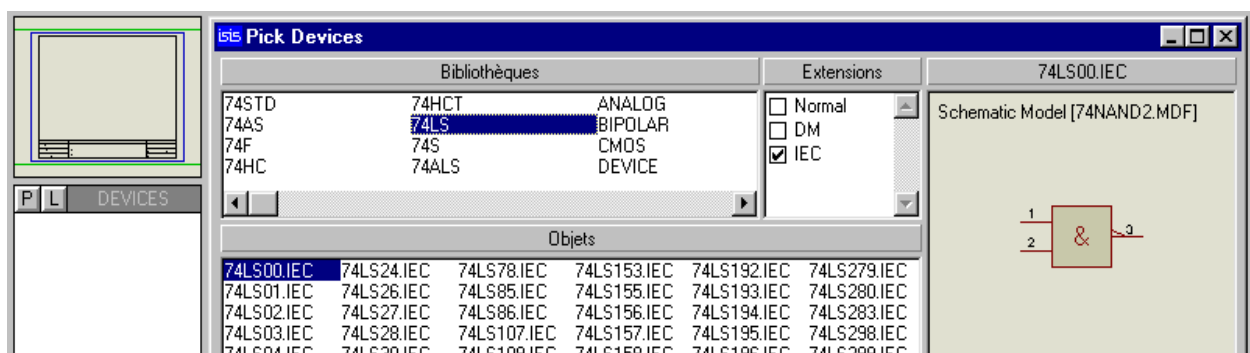


Pour placer ce cartouche, cliquez précisément sur la croix bleue marquant le centre de la feuille.



## RECHERCHE DES COMPOSANTS:

Sélectionnez la touche "**Composant**" du clavier, puis cliquez sur la lettre P (**Prendre composants**) ; les bibliothèques contenant les composants apparaissent alors dans un ordre théoriquement alphanumérique.





**REFERENCES BIBLIOGRAPHIE**

**Références Bibliographie:**

- [1] : B Bourges ; M Albuissou ; D Mayer ; L Wald « Le gisement solaire dans le cas des Applications photovoltaïques ».Le développement du solaire photovoltaïque. Journée, Paris, France. 10/12/1998.
- [2] :[http:// www. thermesciel.fr](http://www.thermesciel.fr).
- [3] :A. Lauger.J.A.Roger « Les photopiles solaire» technique et documentation ,1981.
- [4] : C.Delerome « Revue internationale d'héliotechnique »année 1997.
- [5] : A.Ricaud « Photopiles solaire de la physique de conversion photovoltaïque aux filières, Matériaux et procédés ».presses polytechniques et universitaires romandes 1997.
- [6] :G.Bonnet « Rapport interne ENS de Lyon » 2002.
- [7] : [http://www. Les panneaux solaire PV regroupement des cellules PV reliées entre elles en Série en parallèle.](http://www.lespanneauxsolairepv.com)
- [8] :M.Orgeret « Les piles solaires », Paris.1985.
- [9] :**Climate Change 2007**: The Physical Science Basis, publication du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat.
- [10] : rapport publié en 2008 par l'Organisation Internationale des Migrations.
- [11]: rapport publié par UK Energy Research Center.
- [12]: A.E. Becquerel, Compt. Rend. Acad. Sci. **1839**, 9, 145.
- [13]: rapport publié par HESPUL en 2007.
- [14] : 05 Technologies ER - Solaire photovoltaïque – ENER002 - Michel HUART –2005
- [15] : J.-C. Muller, Techniques de l'Ingénieur, dossier BE8579
- [16] : M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa et W. Warta, Progress in Photovoltaics: Research and Applications **2008**, 16, 61
- [17]: M. Taguchi, K. Kawamoto, S. Tsuge, T. Baba, H. Sakata, M. Morizane, K. Uchihashi, Nakamura, S. Kiyama et O. Oota, Progress in Photovoltaics: Research and Applications **2000**, 8, 503
- [18] : R.R. King, D.C. Law, K.M. Edmondson, C.M. Fetzer, G.S. Kinsey, H. Yoon, R.A. Sherif et N.H. Karam, Applied Physics Letters **2007**, 90, 183516
- [19] : B. O'Regan et M. Grätzel, Nature **1991**, 353, 737
- [20]: V.Y. Meritt, IBM Journal of Research and Development **1978**, 22, 353
- [21]: C.W. Tang, Applied Physics Letters **1986**, 48, 183
- [22]: S.E. Shaheen, C.J. Brabec, N.S. Sariciftci, F. Padinger, T. Fromherz et J.C. Hummelen, Applied Physics Letters **2001**, 78, 841
- [23]: P. Peumans et S.R. Forrest, Applied Physics Letters **2001**, 79, 126
- [24] : A.J. Attias, Techniques de L'ingénieur, dossier E1862
- [25] : S. Hotta, S.D.D.V. Rughooputh, A.J. Heeger et F. Wudl, Macromolecules **1987**, 20, 212
- [26] : M. Fukuda, K.Sawada et K. Yoshino, Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry

1993, 31, 2465

- [27]: A.O. Patil, Y. Ikenoue, F. Wudl et A.J. Heeger, *J. Am. Chem. Soc.* **1987**, 109, 1858
- [28]: O. Stéphan, P. Schottland, P.-Y.L. Gall et C. Chevrot, *J. Chim. Phys* **1998**, 95 1168
- [29]: D. Marsitzky, T. Brand, Y. Geerts, M. Klapper et K. Müllen, *Macromolecular Rapid Communications* **1998**, 19, 385
- [30]: J. Nelson, *The physics of solar cells*, Imperial College Press (2005).
- [31]: M. Theander, A. Yartsev, D. Zigmantas, V. Sundström, W. Mammo, M.R. Andersson et O. Inganäs, *Physical Review B* **2000**, 61, 12957
- [32]: J.E. Kroeze, T.J. Savenije, M.J.W. Vermeulen et J.M. Warman, *J. Phys. Chem. B* **2003**, 107, 7696
- [33]: M. Urien, G. Wantz, E. Cloutet, L. Hirsch, P. Tardy, L. Vignau, H. Cramail et J.P. Parneix, *Organic Electronics* **2007**, 8, 727
- [34]: M. Schott, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IV - Physics* **2000**, 1, 381
- [35]: M. Oukachmih, Thèse **2003**, Université Toulouse-Paul Sabatier
- [36]: S005516, LM35 datasheet : Precision centigrade temperature sensors, National Semiconductor, November 2000
- [37]: <http://www.alldatasheet.fr/datasheet-pdf/.html>
- [38]: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/30292c.pdf>
- [39]: <http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en010239>
- [40]: <http://electronique.rivalin.voila.net/manuels/isis6.2.pdf>
- [41]: <http://www.stielec.ac-aix-marseille.fr/>
- [42]: Caractéristiques d'un panneau photovoltaïque, Christian GLAIZE (Montpellier) : univ-montp2.fr

**Résumé :**

La transformation directe du rayonnement solaire en électricité, le photovoltaïque, constitue depuis plus d'une double décennie, une voie potentiellement riche en perspective d'énergie alternative aux énergies fossiles, très polluantes et limités dans le temps. L'Algérie, par sa grande superficie et sa position géographique (le Sahara algérien est relativement centrée sur le tropique du Cancer) est particulièrement avantaé à ce sujet. Dés lors, l'utilisation de modules solaires permet la production d'électricité « sur place », à proximité immédiate des besoins (forage et pompage de l'eau, autre consommations électriques, ct...).cette étude doit se focalisée sur la description et la caractérisation des nouvelles générations de cellules photovoltaïques à haut rendement énergétique.

**الملخص:**

التحويل المباشر لضوء الشمس إلى كهرباء ، والضوئية ، والعقد هو لتعقب أكثر من عقدين من المحتمل منظور غنية من الطاقة البديلة للوقود الأحفوري ، والتلوث ، ومحدودة جدا في الوقت المناسب. الجزائر ، لكبر حجمها وموقعها (وتتركز نسبيا الصحراء الجزائرية على مدار السرطان) هو مفيد خاصة في هذا الصدد. لذا ، فإن استخدام الطاقة الشمسية لتوليد الطاقة يمكن أن "مكان" في المنطقة المجاورة مباشرة للاحتياجات (الحفر وضخ المياه ومستهلكي الطاقة الأخرى ، ينبغي أن تركز البحوث السابقة...). هذه الدراسة على وصف وتوصيف أجيال جديدة من الطاقة الخلايا الشمسية كفاءة.