

Chap III - Technologie des panneaux solaires

Introduction :

on peut distinguer 2 grandes familles de matériaux PV :

1. - les matériaux solides cristallisés

- " couches minces solides (sur support)

de matériaux PV le plus répandu sous les cellules solaires est le Si sc de type IV. Le Si solaire est soit cristallin soit amorphe. à l'état amorphe, il est employé en couches minces, avec des épaisseurs de l'ordre du μm et en dépôt et déposées sur un support, alors que les cellules cristallines sont massives et épaisses de 0,1 à 0,2 mm.

des autres sc employés sont V-III comme l'AsGa (rare et cher) et des couches minces comme l'STe (Tellure de cadmium) et le GIS (cuivre-Indium-di-séléniure).

I. cellules et modules au Si cristallin :

I.1. Préparation du Si et des cellules :

les cellules au Si cristallin se présentent sous forme de plaquettes carrées ou pseudo-carrées, parfois rondes. Le Si cristallin qui les constitue est un cristal avec un arrangement ordonné des atomes, selon une structure atomique de type tétraédrique.

- si la cellule est constituée d'un seul cristal, on parle de Si monocristallin $\Rightarrow$ aspect uniforme, couleur gris bleuté, ou noir.

- la cellule au poly Si présente l'aspect d'une mosaïque composée de fragments métalliques gris bleuté, de 1 cm à 2 cm , qui sont appelés grains.

1. grille de métallisation sur cellule dopée
2. couche antireflet
3. surface avant dopée net texturée
- 3-4 jonction et champ électrique
4. substrat P
- 4-5 BSF, « champ » arrière
5. dopage P^+
6. métallisation d'Al
7. métallisation soudable

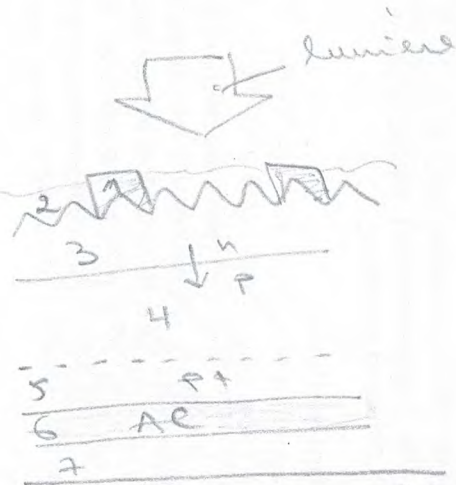


Fig. III - 1 composition d'une cellule au Si monocristallin

I.4 Technologie des cellules :

deux technologies assez récentes à base de Si cristallin donnent encore de meilleurs résultats ;

I - 1. Les cellules interdigitées à la « back-contact » (Fig III)

Dans de telles cellules, il existe plusieurs jonctions n-p interconnectées, sous forme de peignes, localisées en face arrière. Tous les contacts sont reportés en face arrière et donc invisibles. Ce résultat est obtenu par des méthodes de gravure et de diffusion très précises. Le wafer de Si doit être de très bonne qualité. Ces cellules présentent plusieurs avantages :

- courant d'obscurité réduit (faible surface de jonc⁰)
- il n'y a pas de masquage par les contacts avant.
- diminution de la résistance série (pas d'élargissement des contacts)
- Interconnexion entre les cellules facilitée sous un module.
- Rendement atteignant 24% en laboratoire et 21-22% en usine.

I - 2. Les cellules à Hétérojonction à la « HIT », ou « HIP »

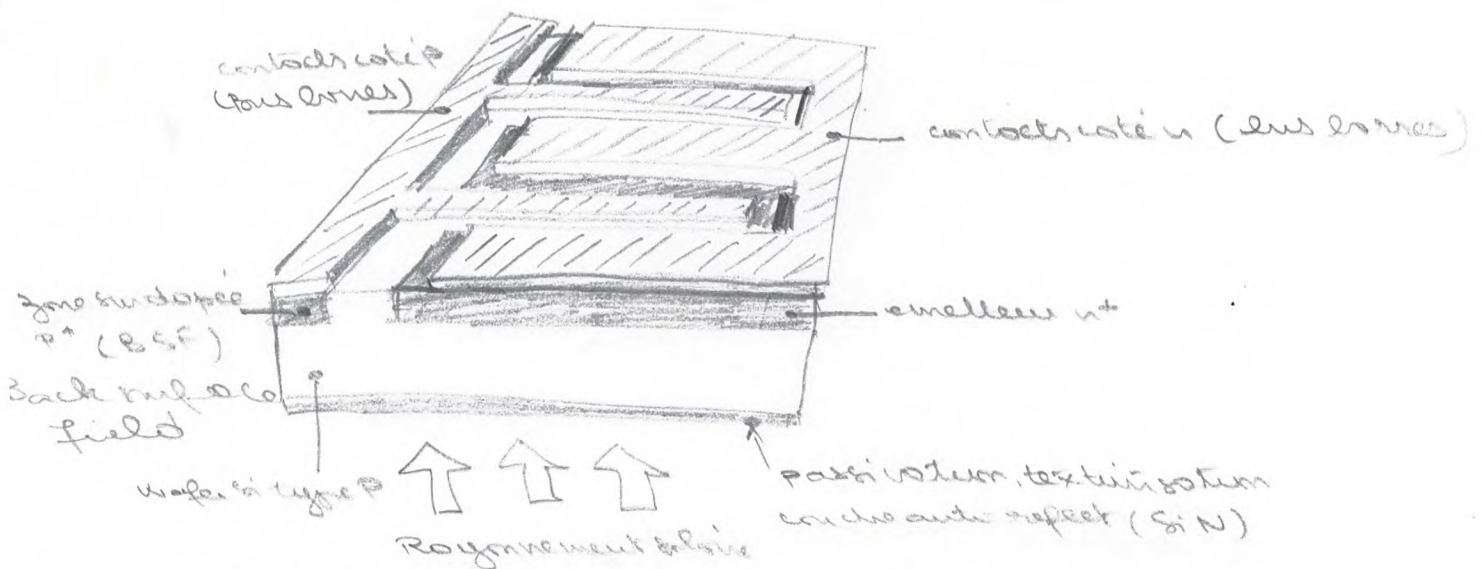


Fig III.2: composition d'une cellule à contacts inter-digités

une Hétérojonction est jonction PV composée de matériaux $\neq$
Les cellules HIT pour Hétérojonction with intrinsic (thin layer
sont composées d'un wafer de Si cristallin et de couches

cellules disposées en rang, connectées en série, et assemblées
 se façon étanche dans un encastrement. (Fig III-4)

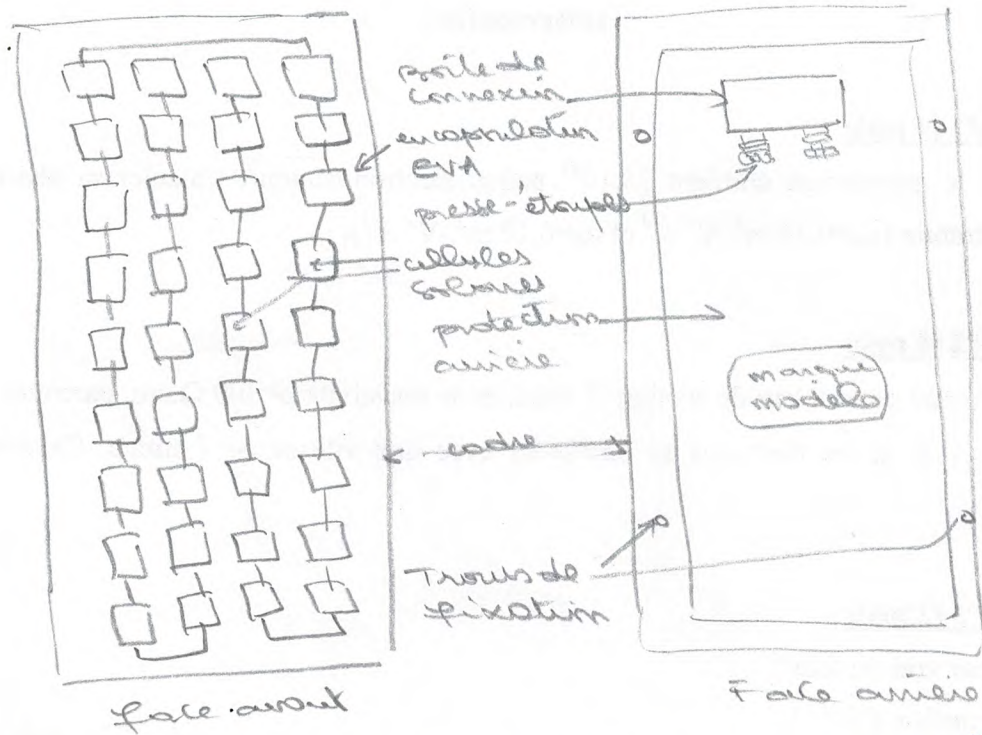


Fig III-4: schéma d'un module PV au Si cristallin

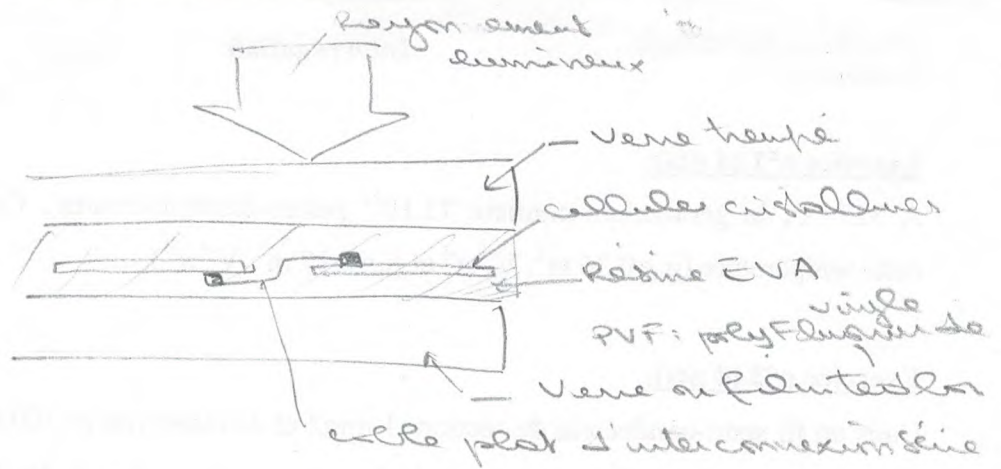


Fig. III - 5 : Vue en coupe d'un module au Si cristallin

- en collage série il faut appareiller les cellules
- " " " " " " " " les tensions

II - 3. Encapsulation et encastrement

Les cellules sont emboîtées sous une résine et prises en sandwich entre 2 supports adhésifs des cellules d'environ 1 cm pour éviter la corrosion. On ajoute souvent un couche de (EVA, éthyle vinyle Acétate)

fixation et une interface électrique adéquate.

en face avant : il s'agit de verre de moindre concentration

en oxyde de Fer que le verre de vitre et donc plus transparent. L'épaisseur est de 3 à 4 mm selon les dimensions du module.

en face arrière : on met parfois du verre selon la technique du li-verre feuilleté ou un film plastique de type PVF comme sont la marque Tedlar chez Dupont de Nemours ou d'autres films fait pour résister à l'humidité comme les multicouches plastique / métal ou des matériaux alternatifs comme le PE, le Polyester...

II - IV - Cellules et module au Si en couche mince

Les technologies couches minces concernent plusieurs matériaux PV : le Si amorphe et microcristallin, le CIS et le CIGS. Ces matériaux utilisent moins de matière que le Si massif, sont produits en couches de l'ordre de quelques micromètres d'épaisseur.

ou des supports rigides ou flexibles

IV - 1. Simple jonctions au Si amorphe

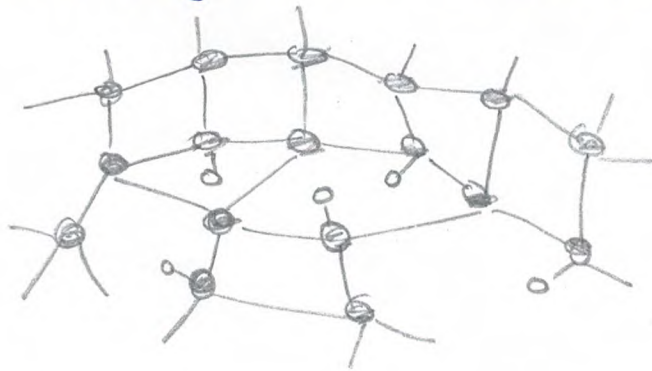
ce sont des cellules à 3 couches minces empilées de type :
 p, i et n . cette structure est destinée à produire un champ
électrique afin de collecter les charges produites sous l'effet
de la lumière.

p : dope au bore, n : dope phosphore, i : intrinsèque

3. (IV - 1. a. Fabrication des cellules au $a-Si:H$

le Si produit en couche mince est à la base de nature
amorphe (structure désordonnée, vitreuse) et l'ordre cristallin
n'est maintenu qu'à ^{qu'} courte distance. le $a-Si$ pur n'est pas S/C
contient trop de défauts et on ne peut pas le doper.

sés qu'il est produit au gaz silane (SiH_4), il contient 5 à
10% d' H_2 qui va saturer les liaisons pendantes, réduisant
considérablement la densité des défauts et permettant
la collecte des charges et le dopage. cet alliage ($a-Si:H$)
présente un gap plus élevé que le Si : 1,77 eV et absorbe
la lumière de p plus fortement : 1 μm suffit à absorber tout
le rayonnement reçu sur terre. En pratique, l'épaisseur des



● : Si

○ : H

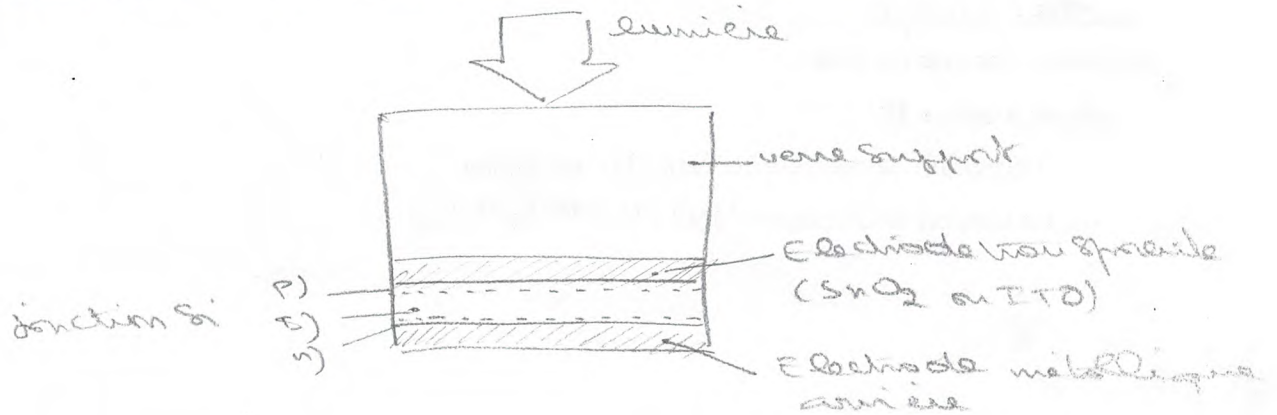
Représentation schématisée d'un réseau de $a-Si:H$

jonctions, peut descendre jusqu'à 0,2-0,3 μm .

- la technique la plus courante pour fabriquer des cellules
de $a-Si:H$ est le dépôt par plasma.
- Si une cellule est inégalement absorbée en n de seconde.
- Les supports de verre sont introduits sous la machine pour
chauffés à 150-200°C.
- le silane introduit sous l'encreinte est décomposé par une

décharge RF (CH_4 - SiH_4)

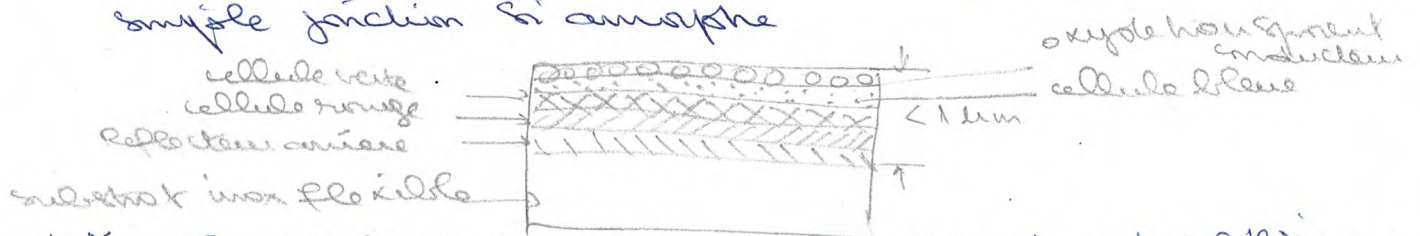
- de Si et H_2 libérés dans le plasma se forment un matériau solide de manière sur les plaques support.
- En modifiant le composition gazeuse au cours du dépôt, on peut empiler toutes sortes de couches
ex: silane SiH_4 pour le dopage type p et le phosphine PH_3 pour le dopage type n
- l'électrode (+) est une couche transparente et conductrice déposée sur verre avant le Si.
ex: oxyde d'étain SnO_2 dopé au fluor
oxyde de zinc ZnO dopé à l'Al.
- l'électrode (-) est une couche mince d'Al ou d'Ag



Structure d'une cellule au Si amorphe hydrogéné

II-2. Cellules multifonctions au Si couche mince

- l'intérêt de la technologie Si en couche mince est qu'elle permet la réalisation de structures à plusieurs jonctions de gaps différents. Chaque jonction est spécialisée sous la conversion d'une bande du spectre de lumière. En effet il est facile d'empiler des couches en modifiant le mélange gazeux au cours du dépôt par plasma.
- des cellules à double jonction (cellules Tandem) ou triple jonction ont un rendement plus élevé qu'une simple jonction Si amorphe



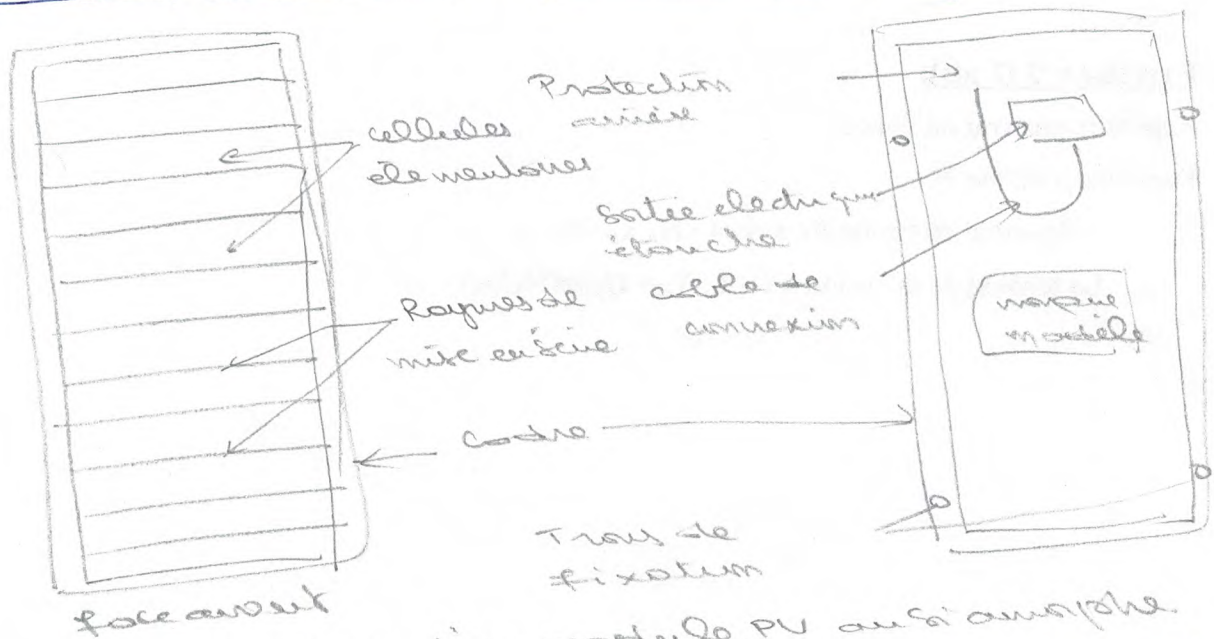
Exemple de cellule triple jonction: 13% de rendement stabilisé sur support souple en petit format (ECD-ovonic)

silicium microcristallin et polymorphe, cellules
monophases

- A forte proportion d' H_2 gazeux sous le plasma de silicium on peut créer une certaine proportion de μ grains cristallins - le matériau obtenu est dit μ cristallin et noté $\mu c - \mu s = H$ plus photoconducteur que l'amorphe avec un gap optique inférieur utilisé dans les cellules monophases ($\eta = 8-11\%$)

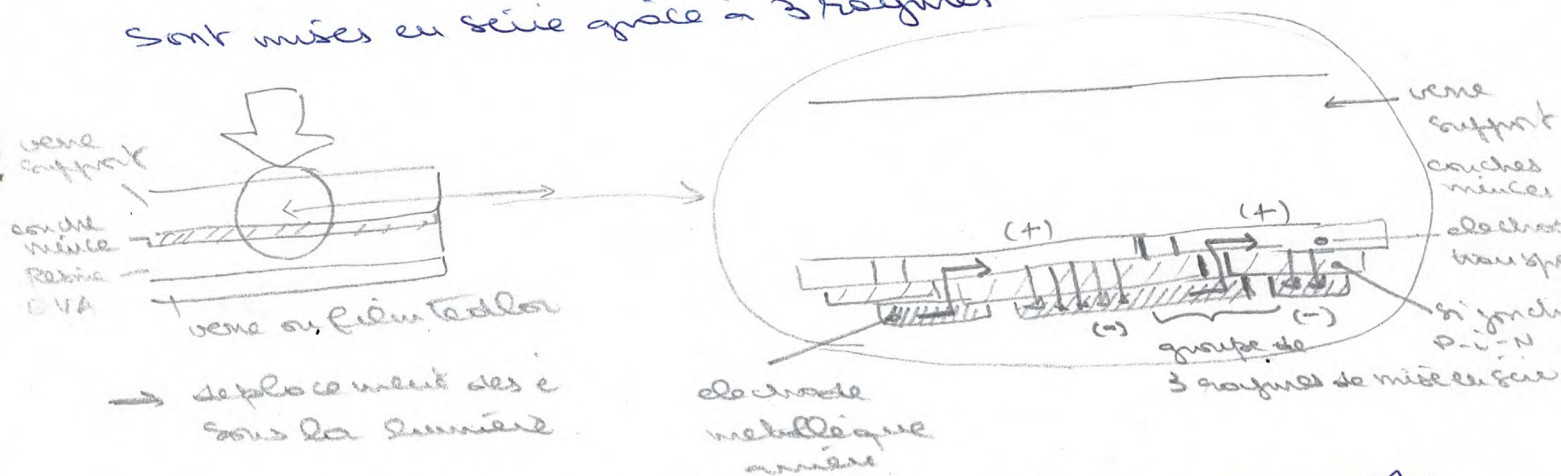
- le μ polymorphe est un matériau noncristallin

II-4 Fabrication des modules en couche mince



structure d'un module PV au μ amorphe.

Chaque bande rectangulaire est une cellule, ces bandes sont mises en série grâce à 3 rayures.



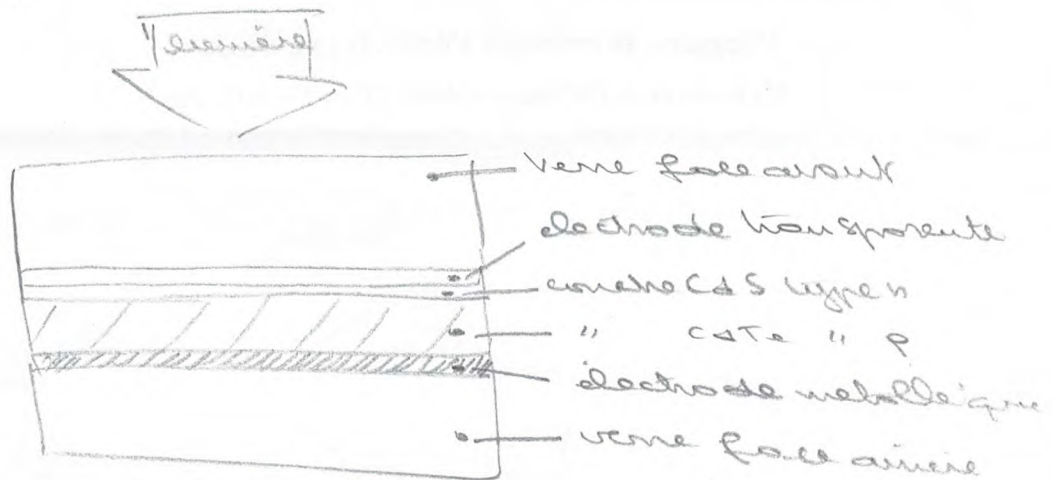
mise en série des cellules d'un module au μ amorphe

cette technique nécessite de découper les cellules plus ou moins pour les assembler ensuite

III Modules au CdTe

Le CdTe (Tellure de cadmium) est un SC polycristallin absorbant au fait de son gap optique 1,45 eV et de sa forte absorption (2 μ m suffisent pour absorber le spectre visible). Ses panneaux arborent d'ailleurs une belle couleur noire.

Le CdTe est généralement de type p, couplé à du CdS (sulfure de cadmium) de type n qui sert de couche avant pour former une hétérojonction. De telles cellules présentent un assez bon rendement au soleil, et sans embellissement notable ou difficile, ce qui leur a valu un prix lors des modules. Malgré la toxicité du CdTe, cette technologie risque d'être freinée dans son développement.



empilement des couches d'un module CdTe

IV Modules au CIS et CIGS

Le CIS (CuInSe_2) est matériau PV composé d'un alliage de Cu, d'In et de Se, il est couplé avec une couche fenêtre en CdS de type n.

Cette hétérojonction peut atteindre environ 25% en rendement, elle a d'excellentes propriétés d'absorption :

- faible gap (1,04 eV), on ajoute du Ga pour l'augmenter
 $\rightarrow E_g = 1,45 \text{ eV}$ E_g du $\text{CuGaSe}_2 = 1,65 \text{ eV}$.

- l'alliage CIGS ($\text{Cu}(\text{Zn}, \text{Ga})\text{Se}_2$) est obtenu en ajustant la concentration de Ga pour obtenir un gap optique $\sim 1,45 \text{ eV}$

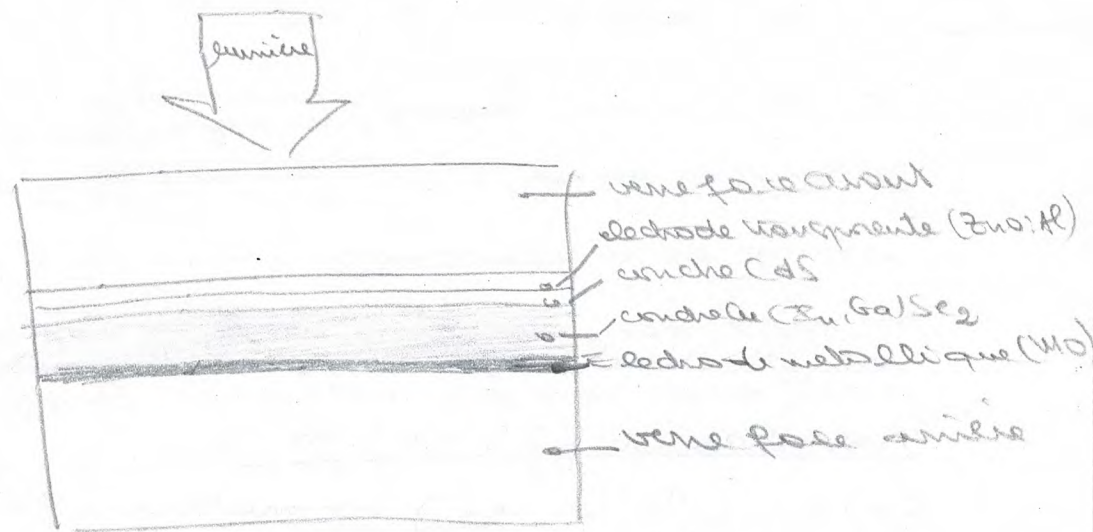


Fig. : structure d'un module au CT GS.

IV-Cellules multijonctions (matériaux III-V)

Les cellules multijonctions sont composées d'un grand nombre de semi-conducteurs (GaAs, Ge, GaInP2...), absorbant chacun dans un spectre limité. Cette technologie permet de dépasser le plafond théorique du rendement d'une cellule photovoltaïque au dessus de 33,5%, appelé « limite de Shockley-Queisser ».

Avantages:

- très bon rendement (31,8% dans le commerce, 44,7% en laboratoire)^[8]

Inconvénients:

- Coût élevé
- peu de ressources d'indium sur terre^[9]

V- Cellules organiques

Les cellules organiques sont composées de molécules organiques pour transformer la lumière en électricité.

Il en existe principalement de trois types :

- Les cellules photovoltaïques organiques moléculaires
- Les cellules photovoltaïques organiques à base de polymères
- Les cellules photovoltaïques hybrides

Avantages:

- facilité de la fabrication
- coût faible

Inconvénients:

- rendement bas (11,1% en laboratoire)^[10]
- durée de vie faible

Nomenclature

Cellule photovoltaïque tandem

Une cellule photovoltaïque tandem est un empilement de deux cellules simples. En combinant deux cellules (couche mince de silicium amorphe sur silicium cristallin par exemple) absorbant dans des domaines spectraux différents, on améliore le rendement théorique par rapport à des cellules simples distinctes, qu'elles soient amorphes, cristallines ou microcristallines. Elle a une sensibilité élevée sur une large plage de longueur d'onde, et un rendement élevé. Son coût est cependant plus élevé et sa réalisation plus complexe en raison de la difficulté de réalisation. Des cellules tandem organiques ont atteint un rendement de 12% et 18 % pour un tandem de perovskite et de silicium.

Cellule photovoltaïque multi-jonction

Les cellules multi-jonctions ont été développées pour des applications spatiales, qui requièrent une grande efficacité de conversion. Elles sont constituées de plusieurs couches minces réalisées par épitaxie par jet moléculaire. Une cellule, par exemple, triple jonction est constituée de l'empilement de plusieurs semi-conducteurs tel que : GaInP/GaAs/Ge. Chaque type de semi-conducteur est caractérisé par une énergie minimum (gap du semi-conducteur) en dessous de laquelle le photon ne peut être absorbé et donc converti en énergie électrique²⁰. Pour les énergies supérieures au gap, le rendement de conversion décroît aussi rapidement, l'excès d'énergie étant converti en chaleur. Ainsi il est intéressant de juxtaposer judicieusement des semi-conducteurs avec des gaps différents, permettant d'améliorer le rendement de conversion photovoltaïque sur une plus grande partie du spectre solaire.

Composant photovoltaïque multispectral

Ce composant, qui comprend un empilement d'au moins deux cellules élémentaires associées présentant des caractéristiques de réponse spectrale différentes, est caractérisé en ce que l'une au moins des cellules élémentaires est mécaniquement déformable, sa souplesse étant choisie suffisamment élevée pour lui permettre d'adhérer directement à l'autre cellule par simple interaction de van der Waals entre les deux surfaces en regard des cellules élémentaires. L'épaisseur de l'interface séparant les deux surfaces en regard peut être soit suffisamment mince pour former une jonction tunnel couplant électriquement entre elles les deux cellules élémentaires, les couches en regard des cellules élémentaires étant alors des couches de matériau semiconducteur dégénéré p+ et n+, soit suffisamment élevée pour empêcher tout couplage entre les deux cellules élémentaires, ces cellules étant alors pourvues chacune de paires d'électrodes propres aboutissant à des bornes respectives, distinctes du composant.

Appareils de mesure