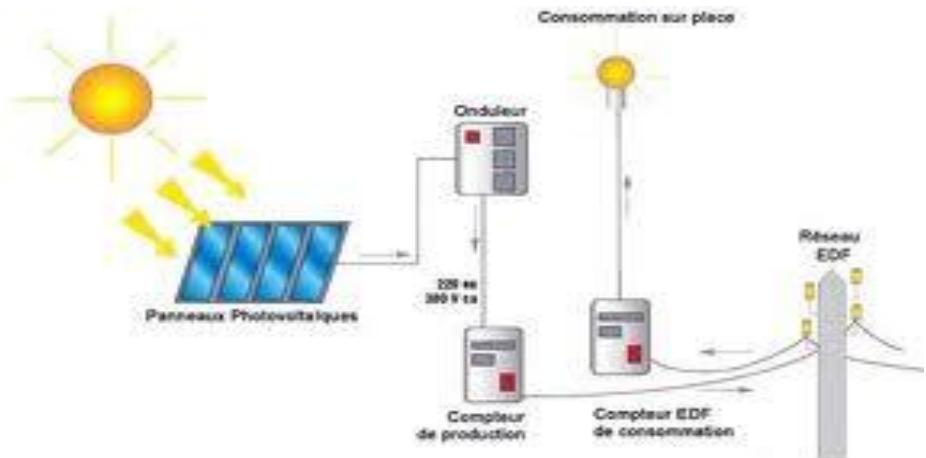
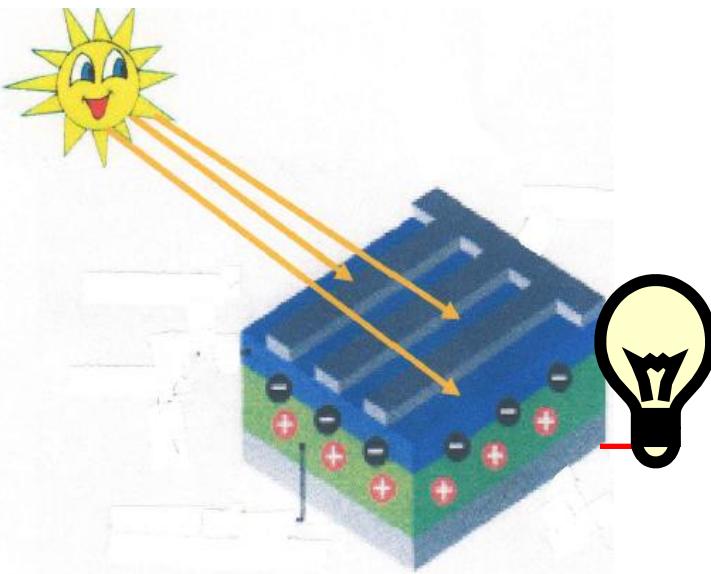


LES CAHIERS DIDACTIQUES D'IMEXCO



LE PHOTOVOLTAÏQUE



Selon les Normes NF C 18-510 et NF C 15-100

Selon les Guides UTE C 15-712-1 et UTE C 15-520.

NOTIONS BASIQUES

INSTALLATIONS PHOTOVOLTAÏQUES

Ce cahier a pour objet de permettre aux stagiaires, par une meilleure compréhension de l'installation photovoltaïque, de mieux assimiler les prescriptions de sécurité électrique telles qu'elles sont exposées dans la Norme NFC 18-510, conformément au décret du 22/09/2010.

A cet effet, ce cahier explique directement l'effet photovoltaïque en partant de l'interaction de la lumière avec les atomes des matériaux semi-conducteurs.

Il présente ensuite la cellule photovoltaïque élémentaire avec sa jonction P.N et son assemblage pour constituer des modules PV regroupés en panneaux, eux-mêmes associés pour constituer des chaînes, puis des groupes.

Le rôle, la localisation et les caractéristiques de l'onduleur sont énoncés, avec les protections associées, pour les modules et les câbles, conformément aux directives du guide UTE 15-712-1.

Enfin, les différents risques et prescriptions de sécurité, sont décrits en complément et selon la Norme NF C 18-510.

Ce cahier n'est pas exhaustif, et ne peut être considéré comme un guide technique d'installation.

Toutefois, dans le cadre de la formation à l'habilitation électrique, réglementaire pour tout travailleur devant intervenir sur une installation électrique. (Code du Travail Art. R-4544-10), il offre un complément recommandé.

Michel FOUGERE DE HAUTMONT
Ingénieur Ecole Nationale Supérieure d'Electricité
Habilitation CARSAT AQUITAINE, OPPBTP, ARACT (R 4623-28)
Expert en Normalisation et Réglementation à l'AFNOR-UTE



❖ La reproduction de ce fascicule est interdite
Mise à jour : Juin 2023

IMEXCO S.A.S – Organisme de Formation Professionnelle

S.A.S capital de 80 000 € ; RCS PARIS B 453789224 ; SIRET 45378922400012 ; NAF: 8559 A ; R.C.P MATMUT 971000129132F30
Déclaration d'Activité de Formation enregistrée sous le n° 11 75 43 187 75 auprès du Préfet de Région Île de France.
Déclaration CNIL n°194 9808vO - Membre des acteurs de la compétence – Certifié ISQ – OPQF
Siège Social : 68 Boulevard de Port Royal PARIS 75005
Siège Administratif : 50 Bd Gambetta 16300 BARBEZIEUX – Tél : 09 79 32 35 99 – 05 45 78 50 83
email : paris@imexco.org ; charentes@imexco.org

CHAPITRE	DEFINITIONS ELEMENTAIRES	6
	I - 1 La Lumière	7
	I - 2 L'Atome	8
	I - 3 Les Electrons	9
	I - 4 Le Courant Electrique	10
	I - 5 Les liaisons Atomiques	11
	I - 6 Les Semi-conducteurs	13
	I - 6 - 1 Fonctionnement	
	I - 6 - 2 Semi-conducteur Intinsèque	
	I - 6 - 3 Semi-conducteur Extinsèque	
CHAPITRE II	EFFET VOLTAÏQUE	15
	II - 1 Principe de la cellule photovoltaïque (PV)	16
	II - 2 Visualisation du Processus Electronique	17
	II - 3 Constitution d'une cellule photovoltaïque (PV)	18
	II - 4 Caractéristiques d'une cellule PV	19
	II - 4 - 1 Circuit équivalent à une cellule PV	
	II - 4 - 2 Courbe Intensité-Tension	
	II - 4 - 3 Courbe Puissance-Tension	
	II - 5 Types et rendement des cellules	20
	II - 6 Constitution des modules	21
	II - 7 Constitution des panneaux PV	21
	II - 8 Groupement des panneaux	22
	II - 8 - 1 Montage en série	
	II - 8 - 2 Montage en parallèle	
	II - 8 - 3 Choix en fonction de l'éclairement	
	II - 9 Caractéristiques Electriques des Panneaux	24
	II - 9 - 1 Courbes Intensité et Puissance-Tension	
	II - 9 - 2 Courbes Intensité – Niveau d'éclairement	
	II - 9 - 3 Courbes Tension –Température	
	II - 10 Causes dégradation Panneaux	25
	II - 11 Différents exemples de Panneaux	26

CHAPITRE III	L'ONDULEUR	27
	III – 1 Définition de l'Onduleur	28
	III – 2 Fonction de l'Onduleur	28
	III – 3 Connexions des Onduleurs au champ voltaïque	29
	III – 4 Détermination des caractéristiques des onduleurs	30
	III – 4 – 1 Compatibilité en Tension	
	III – 4 – 2 Compatibilité en Intensité	
	III – 4 – 3 Compatibilité en Puissance	
	III – 5 Normes de Sécurité de l'onduleur	31
	III – 6 Emplacement de l'Onduleur	31
CHAPITRE IV	INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE	32
	IV Schéma type d'une Installation PV	33
CHAPITRE V	NORMES CONSTRUCTIVES DE PROTECTION	34
	V – 1 Protection contre les contacts directs	35
	V – 1 – 1 Cas Général	
	V – 1 – 2 Cas de la TBT	
	V – 1 – 2 – 1 TBTS	
	V – 1 – 2 – 2 TBTP	
	V – 2 Protection contre les contacts indirects	35
	V – 2 – 1 Partie en courant continu	
	V – 2 – 2 Partie en courant alternatif	
	V – 3 Mise à la terre des masses et éléments conducteurs	36
	V – 4 Protection contre les surintensités	36
	V – 4 – 1 Partie en courant continu	
	V – 4 – 1 – 1 Protection modules	
	V – 4 – 1 – 2 Protection des câbles	
	V – 4 – 2 Partie en courant alternatif	
	V – 5 Protection de découplage	38



V – 6 Protection contre les surtensions atmosphériques	38
V – 6 – 1 Protection par équipotentialité	
V – 6 – 2 Protection par parafoudre	
V – 7 Normes de Sécurité des Matériels	39
V – 7 – 1 Câbles	
V – 7 – 2 Modules	
V – 7 – 3 Appareillages	
 CHAPITRE VI RISQUES SPECIFIQUES A UNE INSTALLATION PV	 41
VI – 1 Risques Spécifiques	42
VI – 2 Risques d'Electrocution	42
VI – 2 - 1 Risques sur Interventions d'entretien	
VI – 2 - 2 Risques sur Interventions sur Incendie	
VI – 2 – 2 - 1 Risque d'incendie	
VI – 2 – 2 - 2 Risque de brûlures	
VI – 2 – 2 - 3 Risque de chutes	
VI – 2 – 2 - 4 Risque toxique	
 CHAPITRE VII PRESCRIPTIONS DE SECURITE	 44
VII – 1 Intervention d'entretien	45
VII – 2 Intervention d'urgence incendie	45
 CHAPITRE VIII SIGNALTIQUE DE DANGER PHOTOVOLTAÏQUE	 47
 CHAPITRE IX LEXIQUE DES PRINCIPAUX TERMES USUELS	 49
 CHAPITRE X BIBLIOGRAPHIE	 53



CHAPITRE I

DEFINITIONS

ELEMENTAIRES



I – 1

1° CONSTITUTION DE LA LUMIERE

D'après les théories de Maxwell, Max Planck et Albert Einstein, la lumière serait une onde électromagnétique localisée dans des quanta d'énergie qui sont en fait des particules appelées photons, découverts par Arthur Compton en 1923 et appelées ainsi par Gilbert Lewis en 1926).

Description du Photon (Paquet d'onde)

Particule quantique

Classification : BOSON

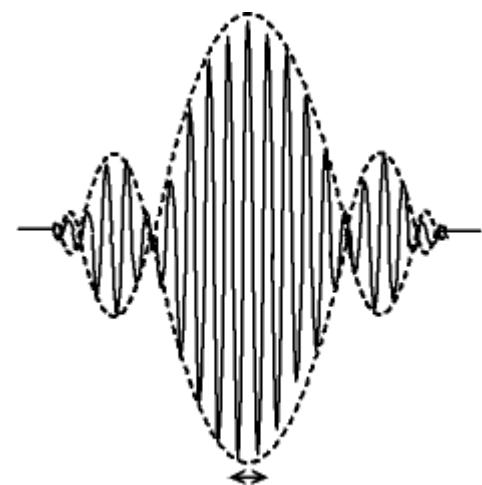
Masse = ≈ 0 ($< 6 \cdot 10^{-17}$ eV. c^{-2})

C = vitesse de la lumière : 299792 km.s $^{-1}$

Charge électrique ≈ 0 ($< 1 \cdot 10^{-35}$ e)

Spin : 1

Energie d'un Photon = 2 eV

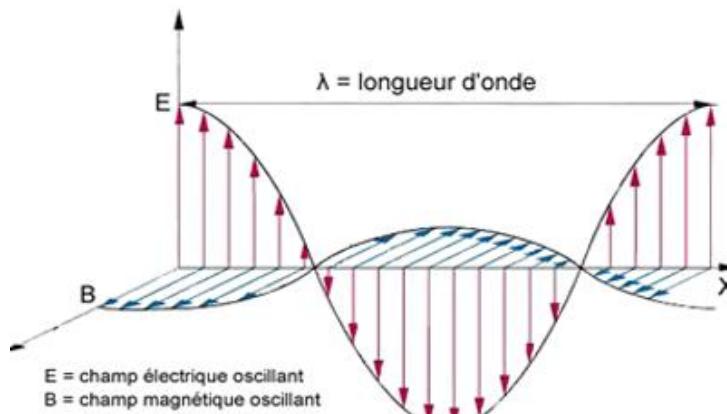


Photon

Fig. 1

On peut représenter au premier abord les photons par des paquets d'onde : l'onde électromagnétique n'est pas une sinusoïde d'extension infinie, il y a une enveloppe d'amplitude importante encadrée par d'autres enveloppes nettement moins significatives.

Le paquet d'onde, un modèle du photon : on a une onde monochromatique de longueur d'onde gamma à l'intérieur d'une enveloppe de largeur déterminée.



Onde électromagnétique

Fig. 2

Onde électromagnétique : oscillation couplée du champ électrique et du champ magnétique, modèle du dipôle vibrant.

Le vecteur indique la direction de propagation de l'onde.

En résumé

Le Photon n'a pas de masse

Le Photon n'a pas de charge électrique.

On peut représenter le photon comme une bille de lumière se déplaçant à la vitesse de $299\ 792\ 458$ m.s $^{-1}$



La matière qu'elle soit minérale, végétale, vivante et quelque soit son état : solide, liquide, gazeuse, est constituée d'atomes.

L'atome a été imaginé dès le V^e siècle avant Jésus Christ, mais c'est le Physicien Rutherford qui en a décrit le modèle.

Conventionnellement, on représente l'atome comme constitué d'électrons (grains d'électricité) gravitant autour d'un noyau, comme le feraien des satellites autour d'une planète.

Par rapport au diamètre de l'atome, le noyau semble très petit.

Si le noyau d'un atome était de la grosseur d'une balle de tennis, les électrons tourneraient 4 000 m distance la matière est essentiellement constituée de vide.

NOYAU

Le noyau est constitué de nucléons : Neutrons + Protons.

La charge électrique du neutron est nulle.

Le proton a une charge positive égale en valeur absolue à celle de l'électron qui lui, est négatif.

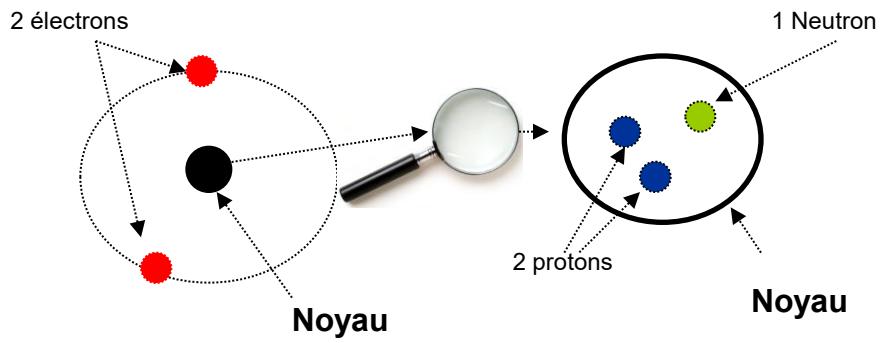


Fig 3

A son état normal un atome est neutre, le nombre d'électrons $(-)$ étant égal au nombre de protons $(+)$

L'Atome est neutre $(-)$ = $(+)$

- Masse du Proton = $1,672 \times 10^{-27}$ kg
- Masse de l'électron = 9×10^{-31} kg
- Le Proton est environ 10 000 fois plus lourd que l'Électron
- Charge électrique de l'électron $1,61 \times 10^{-19}$ coulombs
- Diamètre de l'atome = 1 Amstrong = 10^{-10} m



Les électrons, de charges négatives, sont répartis par couches.

Chaque couche ne peut comporter qu'un nombre limité d'électrons.

Par exemple la couche K qui est la plus proche du noyau est saturée avec 2 électrons.

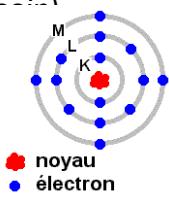
La couche la plus à l'extérieur (appelée couche de Valence), de la plupart des atomes, n'est pas complète, elle peut ainsi accepter (provisoirement) des électrons, ou éventuellement en perdre.

Le nombre d'électrons maximum par couche est le suivant :

couche K : 2 e ; couche L : 8 e ; couche M : 18 e ; couche N : 32 e, O = 50 e, P = 72 e, Q = 98 e.

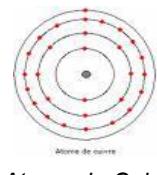
La figure 5 représente dans un plan un atome d'hélium avec ses 2 électrons, son noyau 2 protons et 2 neutrons, la fig. 3 représente les 14 électrons d'un atome de silicium gravitant autour du noyau composé de 14 protons, la fig. 4 représente un atome de cuivre avec ses 29 électrons et son noyau composé de 29 protons.

(les neutrons de l'atome de cuivre et de silicium ne sont pas représentés pour simplifier le dessin)



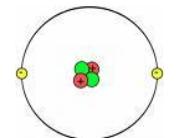
Atome silicium

Fig 4



Atome de Cuivre

Fig 5



Atome d'Hélium

Fig 6

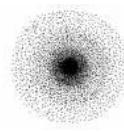


Fig 7

Les électrons sont en ronde perpétuelle autour du noyau, la vitesse de rotation autour du noyau est de : 10^{16} tours/sec.

Les électrons tournant autour du noyau peuvent être assimilés à une hélice qui en tournant fait un disque. En fait, les électrons constituent un nuage autour du noyau (fig.6).

Flux d'Electrons

Les électrons restent liés au noyau, mais certains électrons des couches périphériques les plus éloignées : appelée couches de Valence peuvent se **détacher facilement du Noyau et sortent des Atomes en se déplaçant avec une totale liberté.**

Ils forment un flux d'électrons, c'est à dire un courant électronique : on les appelle des **électrons libres**

Les Ions

Les Atomes qui ont perdu ou gagné des électrons s'appellent des Ions.

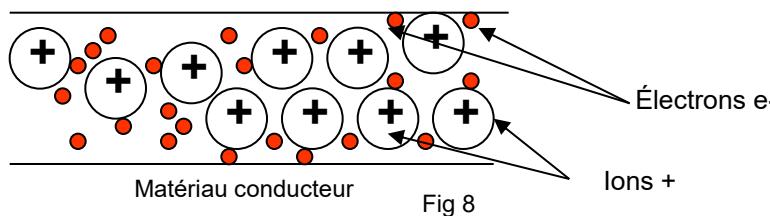
Ion + : atome qui a perdu un électron
Ion - : atome qui a gagné un électron

Dans un « matériau conducteur », il y a des électrons libres (e⁻), et des atomes qui ont perdu des électrons et deviennent ainsi des ions positifs (+)



Matériaux Conducteurs

Un matériau conducteur est formé d'electrons libres e^- et des ions positifs $+$ (fig.7).

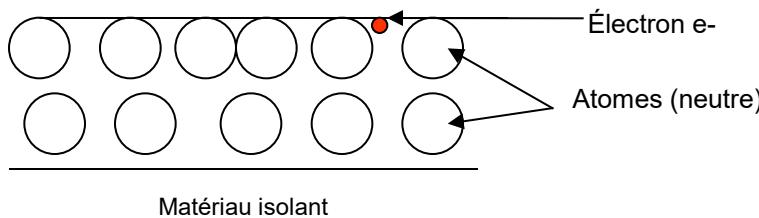


→ Tous les matériaux métalliques sont des conducteurs.

Matériaux Isolants

La force d'attraction des charges positives du noyau est telle que tous les électrons y compris les périphériques ne peuvent se détacher : ils sont prisonniers.

Pas de transfert de charges électriques entre atomes voisins



Un matériau isolant ne contient pas (ou peu) d'électrons libres (fig.8).

I – 4

ELECTRICITE DYNAMIQUE = Courant Electrique

Dans un conducteur, les électrons libres se déplacent naturellement dans TOUTES les directions.

Le résultat de ces déplacements désordonnés est une énergie NULLE.

Si on peut faire déplacer tous ces électrons dans le même sens par un moyen quelconque, ces électrons circulant tous dans le même sens produiront alors de l'ENERGIE.

Ce déplacement des électrons, tous dans le même direction, crée un courant appelé :

COURANT ELECTRIQUE CONTINU.

Comment faire pour amener les électrons qui ont des déplacements erratiques, à s'organiser pour créer des déplacements uniformes ?

Il faut un **GENERATEUR** : C'est-à-dire un dispositif qui crée un CHAMP ELECTRIQUE qui va mettre en mouvement les électrons

Dans le présent cahier technique, on va analyser uniquement un seul type de générateur :

le GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

I – 5 - 1

LIAISONS ATOMIQUES

Dans un matériau solide, les atomes prennent des positions bien fixées, car ils sont liés les uns avec les autres grâce à leurs électrons positionnés sur leur dernière couche, appelée couche de Valence.

Ceux sont ces électrons qu'ils vont mettre en commun.

Le nombre de liaisons que les atomes vont réaliser entre eux est uniquement fonction du nombre d'électrons qu'ils possèdent sur cette couche de Valence.

En fait, on pourrait dire que les atomes s'accouplent entre eux, grâce aux d'électrons de leur couche de Valence.

Par exemple,

Atome Cuivre Cu : univalent, 1 électron sur sa couche de valence,

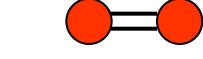
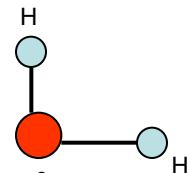
Atome Oxygène O : bivalent, 2 électrons sur sa couche de valence.

Atome Bore Br : trivalent, 3 électrons sur sa couche de valence,

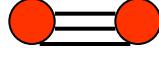
Atome Azote N : trivalent, 3 électrons sur sa couche de valence,

Atome Silicium Si : tétravalent, 4 électrons sur sa couche de valence,

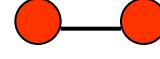
Atome Arsenic As : pentavalent, 5 électrons sur sa couche de valence,



Atome Dioxygène



Di azote



Di hydrogène

(Voir tableau Périodique de MENDELEÏV).

Fig. 10

Ainsi un élément bivalent, oxygène, par exemple, s'associe à 2 atomes d'un élément univalent (H) pour donner H_2O ,

Un élément tétravalent, Carbone, s'associe à 4 atomes d'hydrogène, univalent, pour donner CH_4 .

C'est accouplement constitue un réseau de maille élémentaire.

I – 5 - 2

Réseau Cristallin

Dans un solide cristallin les atomes se positionnent selon un réseau bien défini par 3 vecteurs de translation a_1, a_2, a_3 , tels que tous les nœuds du réseau soient atteint par des translations tels que $T = n_1a_1 + n_2a_2 + n_3a_3$.

On peut construire ainsi 14 réseaux différents appelés « Réseaux de BRAVAIS ».

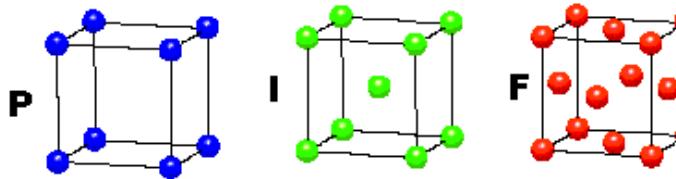
L'espace d'un motif atomique ionique ou moléculaire s'appelle MAILLE ELEMENTAIRE. La répétition de cette maille dans les 3 dimensions suffit à reproduire tout le réseau.

Structure Cristalline du Silicium

Elle est dérivée de la structure cubique à faces centrées, chaque atome est lié à 4 atomes comme voisins les plus proches et 12 atomes comme seconds voisins.



Types des mailles élémentaires



P : Primitif
1 atome
par maille

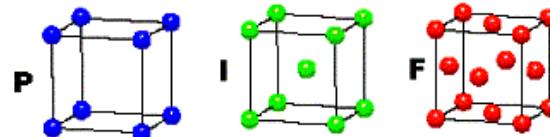
I : Centré
2 atomes
par maille

F : Face centrée
4 atomes
par maille

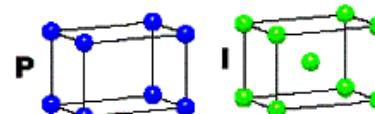
Fig. 11

Les 14 Réseaux de Bravais

CUBIQUE
 $a=b=c$
 $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$



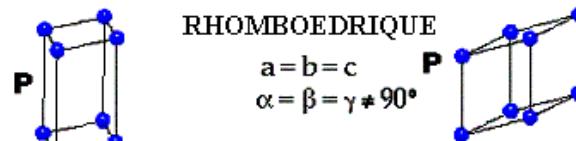
QUADRATIQUE
 $a=b=c$
 $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$



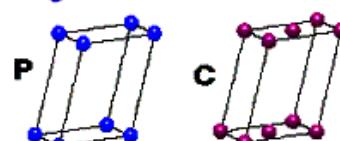
ORTORHOMBIQUE
 $a \neq b \neq c$
 $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$



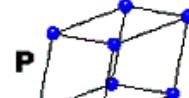
HEXAGONAL
 $a=b=c$
 $\alpha=\beta=90^\circ$
 $\gamma=120^\circ$



MONOCLINIQUE
 $a \neq b \neq c$
 $\alpha=\gamma=90^\circ$
 $\beta \neq 120^\circ$



TRICLINIQUE
 $a \neq b \neq c$
 $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$



4 Types de mailles
P : simple (primitive)
I : centrée
C : bases centrées
F : faces centrées

Fig. 12

Structure Cristalline du Silicium

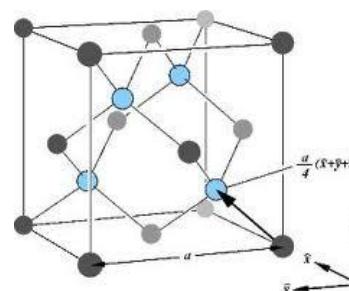


Fig. 13

I – 6

DEFINITION DES SEMI CONDUCTEURS

I – 6 - 1

Fonctionnement

Le semi conducteur est un corps cristallin dont la résistivité (10^6 à $10^9 \Omega \text{ cm}$) est intermédiaire entre celle des corps isolants (résistivité $10^{22} \Omega \text{ cm}$ et celle des conducteurs (métaux) résistivité $10^6 \Omega \text{ cm}$).

Le comportement des semi conducteurs est représenté par la théorie des Bandes d'énergie, c'est-à-dire des intervalles d'énergie.

- La dernière couche ou bande d'énergie s'appelle « la Bande de valence ».
- La bande d'énergie supérieure s'appelle « la Bande de conduction ».

Il ya un intervalle entre ces deux bandes qui s'appelle GAP : la bande interdite.

Le GAP est égal à 0 dans les matériaux conducteurs
1 eV dans les semi-conducteurs (environ)
6 eV dans les isolants (environ)

Ainsi, on voit que dans un semi conducteur il suffit d'un apport de très petite énergie $\leq 1 \text{ eV}$ pour faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction.

I – 6 - 2

Semi conducteur Intrinsèque

Prenons un cristal de silicium de très grande pureté, les 4 électrons de valence constituent les liaisons covalentes.

Si on augmente la température certaines liaisons sont bridées, libérant ainsi des électrons dans le cristal.

A chaque fois qu'un électron est libéré, il crée un trou dont la charge électrique est de signe contraire à celle de l'électron, c'est-à-dire +

La conductivité intrinsèque d'un cristal semi conducteur est liée à son nombre de porteurs de charge intrinsèque (électrons et trous).

La libération d'un électron de conduction, c'est-à-dire son passage de la bande de valence à la bande de conduction laisse un trou dans la bande de valence qui participe à la conduction électrique comme un électron de charge électrique positive.

La formation d'une paire électron-trou est d'autant plus facile que le gap, différence d'énergie entre la bande de conduction et la bande de valence est faible.

La densité des atomes du cristal est évaluée à 10^{23} cm^{-3}



I - 6 - 3

Semi conducteur Extrinsèque

❖ DOPAGE

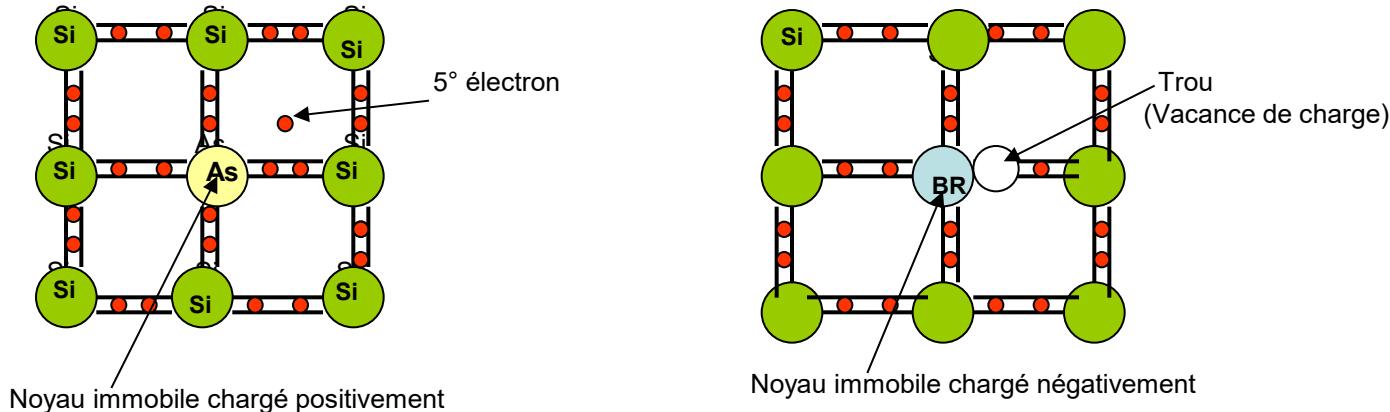


Fig. 14

On rajoute dans le cristal de silicium par exemple, des atomes ayant plus d'électrons de valence que le silicium (ex.: l'Arsonic, Phosphore, etc..), atome pentavalent, dopage N, et d'autre part des atomes ayant moins d'électrons de valence, (ex.: le Bore), atome trivalent, dopage P

On augmente ainsi beaucoup la conductivité par rapport aux semi conducteurs intrinsèques.

Jonction P-N

Ainsi, lorsqu'on met en contact 2 tranches de Silicium dopées P et N, les électrons en excès dans la tranche dopée N, diffusent dans la tranche dopée P .

La zone initialement dopée N devient positive.

La zone initialement dopée P devient négative.

Il se crée ainsi entre ces 2 zones **un champ électrique** qui tend à repousser :

- les électrons dans la zone N
- les trous dans la zone P.

Cette configuration constitue ce qu'on appelle **la jonction P-N**.

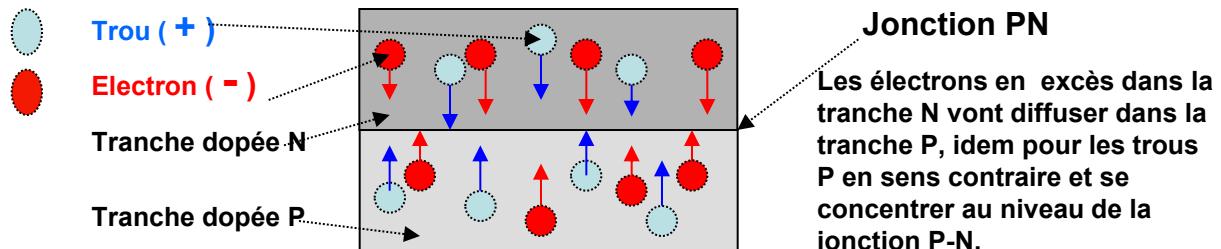


Fig. 15

CHAPITRE II

EFFET VOLTAÏQUE





Fig. 16

Cellule photovoltaïque en silicium

Sous l'effet de la lumière (photons), un composant électronique appelé « semi conducteur » génère une tension électrique d'environ 0.5 volts. L'effet voltaïque transforme un rayonnement électro-magnétique en énergie électrique.

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir d'une jonction PN au silicium (diode).

Pour obtenir du silicium dopé N, on ajoute de l'Arsenic ou du phosphore.

Ce type de dopage permet au matériau de libérer facilement des électrons (charge -), car l'Arsenic possède 5 électrons de Valence (voir p.13).

Pour obtenir du silicium dopé P, on ajoute du bore.

Dans ce cas, le matériau crée facilement des lacunes électroniques appelées trous (charge +), car le Bore ne contient que 3 électrons de Valence (voir p.13).

Jonction PN

On pose la tranche dopé N sur la tranche dopée P. L'interface entre les deux tranches s'appelle la jonction PN.

Sous l'effet du dopage, un champ électrique permanent est crée (voir p.13).

C'est la tranche N que l'on va exposer à la lumière.

Lorsqu'un photon de lumière vient frapper l'atome de silicium, son énergie est suffisante pour extraire un électron de la bande de valence de l'atome et le faire passer dans la bande de conducteur.

Il subit alors le champ électrique intrinsèque qui le fait migrer vers la face supérieure.

L'espace laisse vacant (trou) ou (trou d 'électron) va migrer en direction inverse et attirer un nouvel électron qui va passer par le circuit extérieur et ainsi produire un courant électrique.

Il existe une tension entre les deux couches de la cellule, la couche supérieure est dopée N et la couche inférieure dopée P, car il y a une accumulation de charges négatives et positives sur les 2 faces.



II – 2

VISUALISATION DU PROCESSUS ELECTRONIQUE

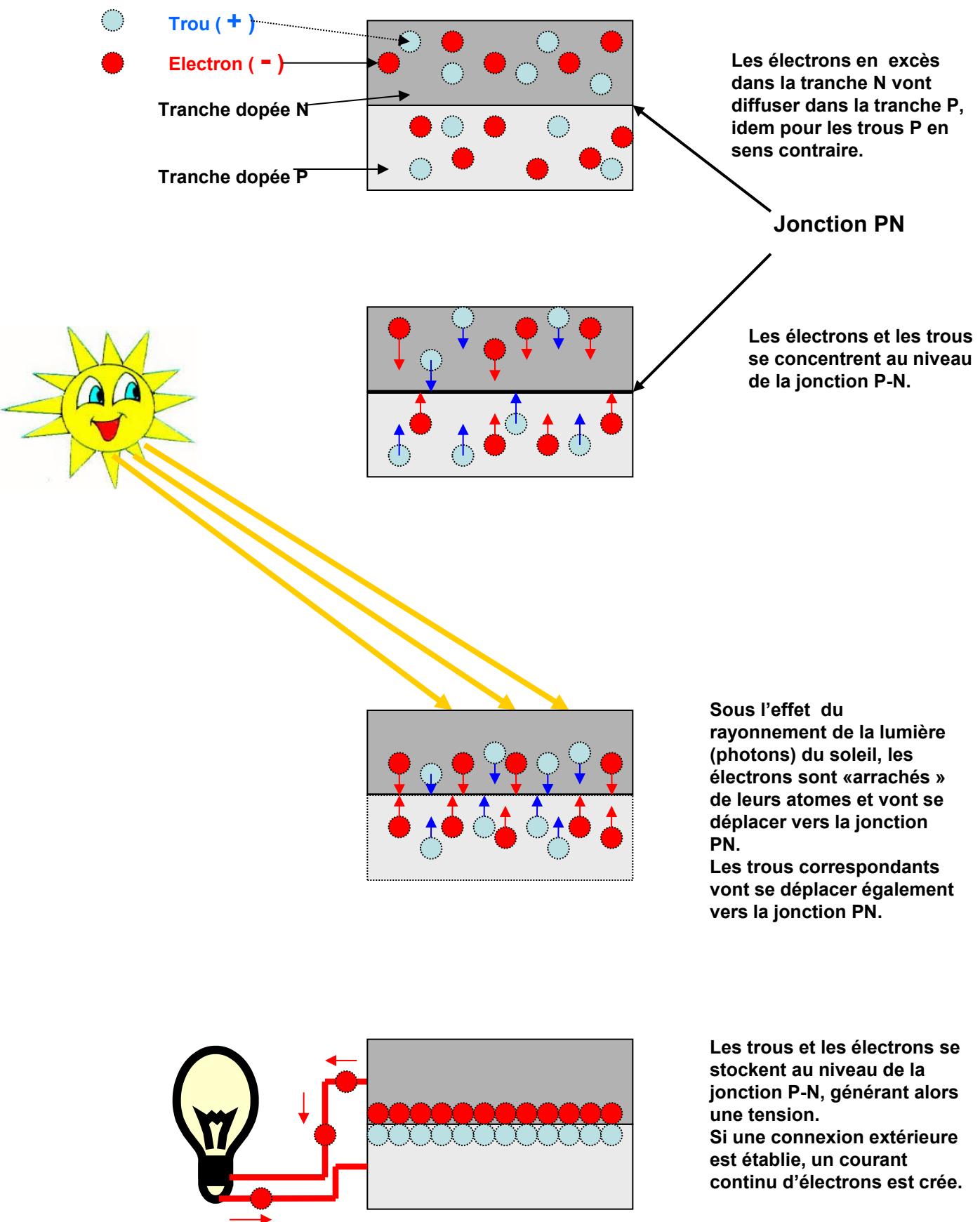


Fig. 17

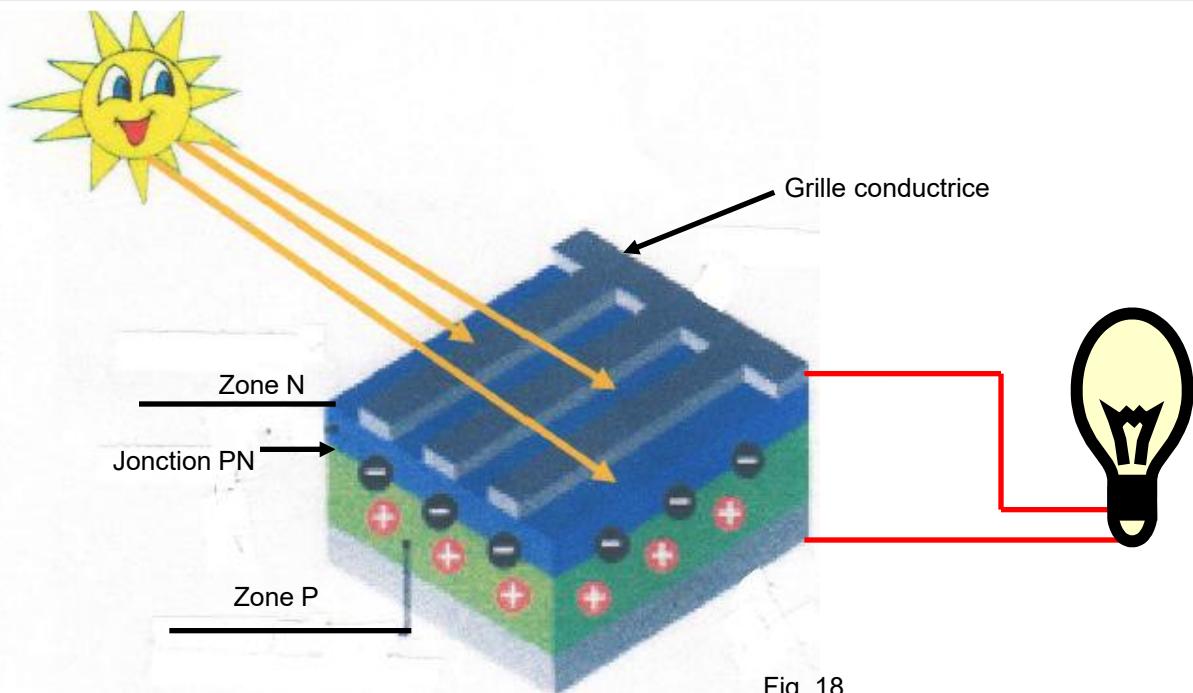


Fig. 18

La plupart des cellules sont constituées de silicium.

Pour obtenir ce Silicium, on part de la silice contenue exclusivement dans du quartz que l'on réduit.

On obtient du silicium à 98%.

Puis on purifie ce Silicium jusqu'à 99.9999%.

Le silicium est produit sous forme de barres appelées lingots, de section carrée ou ronde.

Ces lingots sont sciés en fines lamelles de 0.15 à 0.20 mm d'épaisseur, appelées « WAFERS ».

Après dopage P et N, on incruste par métallisation des rubans de métal sur chaque face que l'on relie aux contacts.

Ces cellules sont collées sur une plaque de tissu de verre polyester (couche de Teldar) et sont protégées par un film en verre trempé parfaitement transparent.

La surface des cellules est de 100 à 225 cm² environ.

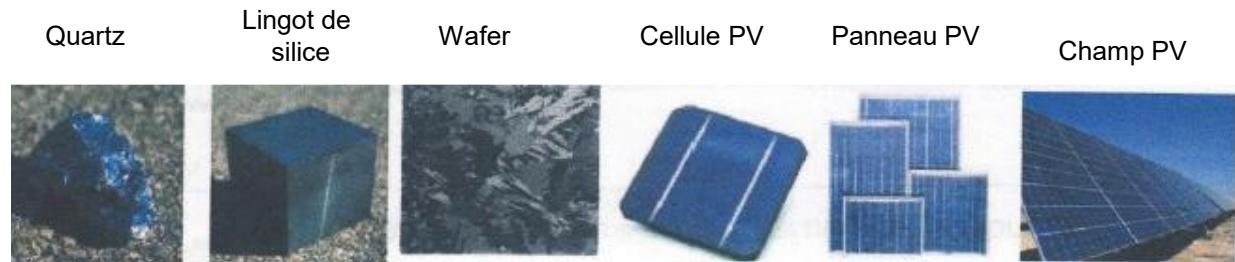


Fig. 19



II – 4

CARACTÉRISTIQUES ELECTRIQUES D'UNE CELLULE

II – 4 – 1 Circuit équivalent modélisant la cellule photovoltaïque

Diode de courant d'obscurité

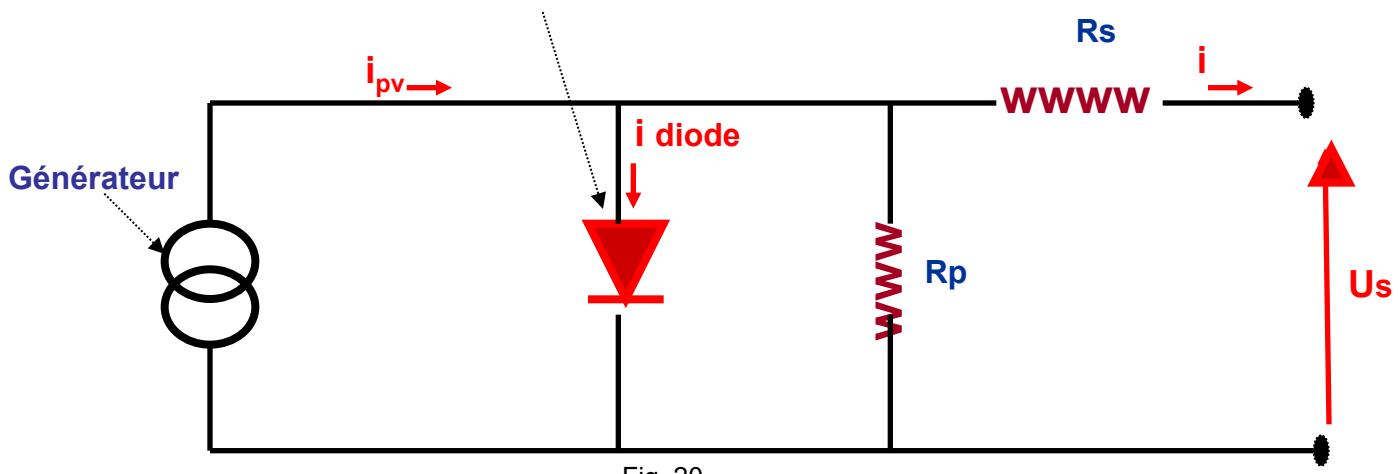


Fig. 20

R_s : Résistance série due à la résistance des différentes couches, contacts métalliques, etc... de l'ordre de quelques milli-ohms ($m\Omega$).

R_p : Résistance parallèle ou de court-circuit due aux fuites. Cette résistance doit être la plus grande possible, environ une dizaine d'ohm Ω

U_s : Tension de sortie de la cellule P.V

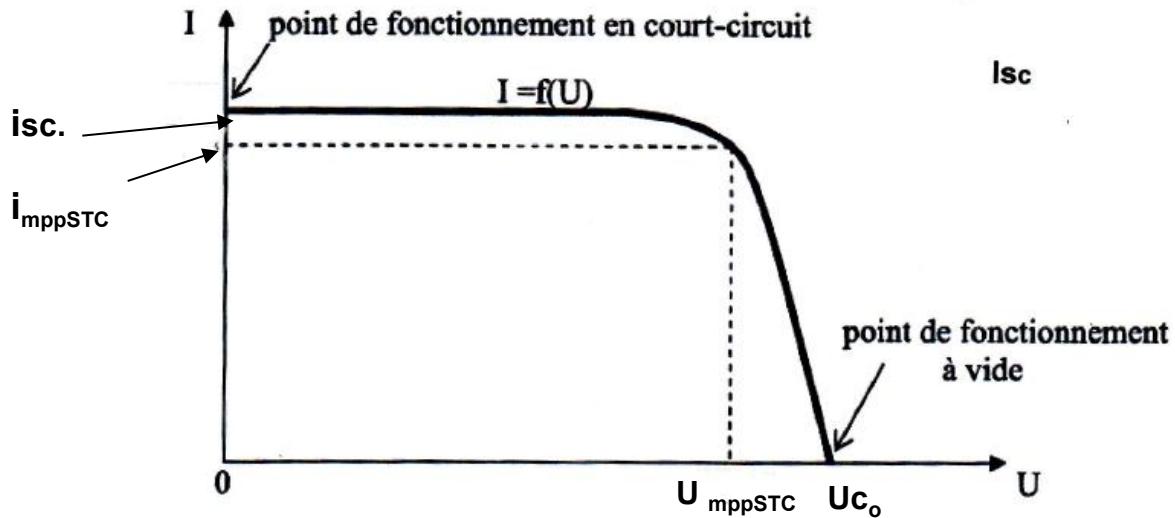
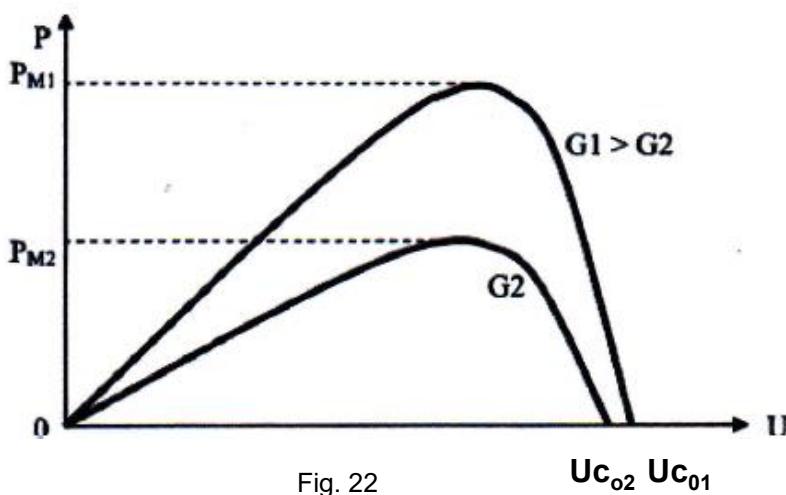
II – 4 – 2 Courbe $i = f(u)$ Intensité – Tension

Fig. 21

NOTA : Le courant photovoltaïque du panneau est la soustraction entre le photo-courant et le courant de diode à l'obscurité.

II – 4 – 3

COURBE – PUISSANCE - TENSION



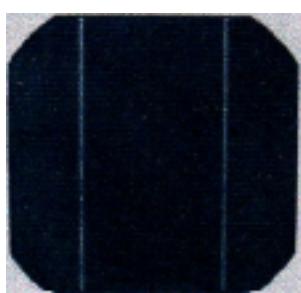
On voit que la puissance augmente avec le niveau d'éclairement

II – 5 DIFFERENTS TYPES ET RENDEMENTS DES CELLULES AU SILICIUM

Il existe 3 types de cellules photovoltaïques, qui varient selon la qualité du silicium :

- Les cellules monocristallines : le rendement est très bon (15 à 22%*) mais le coût de fabrication est élevé.
 - Les cellules poly cristallines : elles sont moins chères à fabriquer mais le rendement est un peu moins bon (10 à 13%*).
 - Les cellules amorphes : leur coût est très faible mais le rendement l'est aussi (5 à 10%*).
- **NOTA : Un rendement de 10% signifie que pour une puissance d'éclairement incidente de 1000 Watt sur une cellule, celle-ci produit une puissance électrique de 100 Watt.**

Silicium
Mono-cristallin



Silicium
Poly-cristallin



Silicium
Amorphe



Fig. 23

II - 6

CONSTITUTION DES MODULES

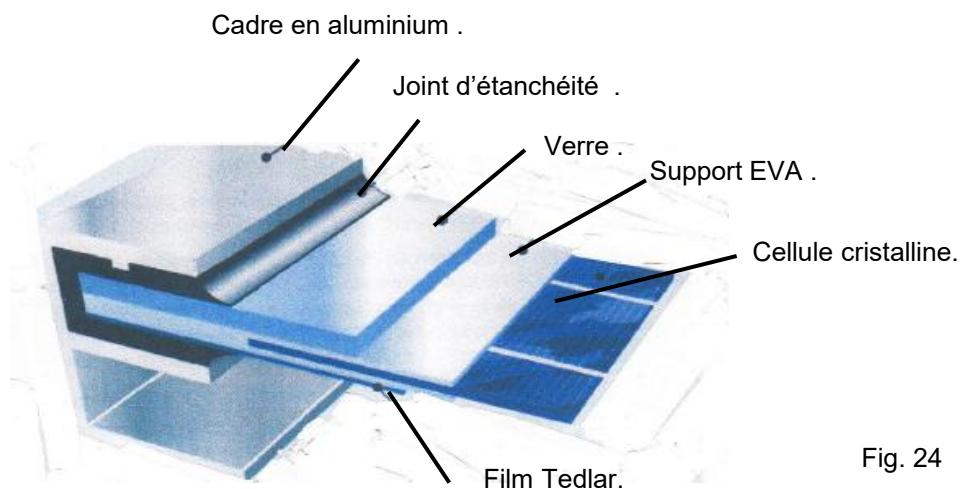


Fig. 24

Les cellules sont assemblées en série.

Chacune d'elles délivrant une tension d'environ 0.5 à 0.6V.

Un module photovoltaïque est donc un assemblage en série de cellules photovoltaïque protégées par un verre sécurit parfaitement transparent et dont la face antérieure est recouverte d'un film spécial (couche de Tedlan), entre ces 2 couches, les cellules solaires sont insérées dans une masse étanche, transparente, c'est ce qu'on appelle l'encapsulage par feuillement d'un film d'acétate de vinyle polymérisé à chaud.

Exemple

Soit un module de 12 V. avec un rendement de 12%, comportant 20 cellules, lorsque l'irradiation solaire est maximale (1000W/m²), la puissance délivrée sera de 120 W, l'intensité $I = P/U = 10 A$.

Si l'irradiation solaire est faible (100 W/m²) la puissance délivrée par le module sera de 12 W.

La tension normalisée des modules est en principe 12V, ou 24, 48 Volts, etc...

II - 7

CONSTITUTION DES PANNEAUX PV

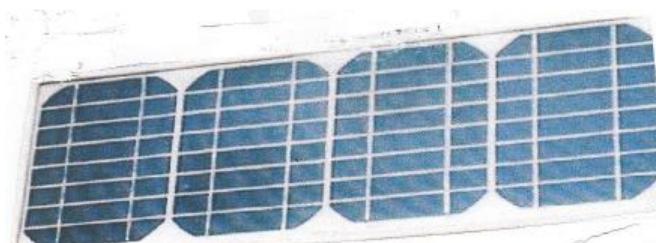


Fig. 25

Les modules reliés ensemble interconnectés, sont encerclés par un cadre en aluminium auto- porteur

avec joint d'étanchéité. Le cadre est muni d'une boîte de jonction pour le raccordement électrique.

Un panneau pèse en moyenne entre 10 et 20 kg.

Cet ensemble s'appelle un panneau photovoltaïque.



Fig. 26



Fig. 27

Les panneaux photovoltaïques peuvent être branchés en parallèle, en série ou en combinant les deux.

Ces montages permettent de régler l'intensité ou le voltage des systèmes photovoltaïques.

La puissance (P) d'un système se calcule en multipliant la tension (U) par l'intensité des panneaux (I) : $P = U \times I$.

II – 8 – 1

Montage en série

Les tensions s'additionnent et le courant traversant les modules reste identique.

Lorsque les panneaux sont montés en série, l'intensité traversant les panneaux sera celle du panneau le moins performant de la série.

Ainsi, si une ombre apparaît sur un des panneaux, toute la série aura pour rendement celui du panneau le plus faible.

L'intensité restant faible, les sections de câbles sont moins importantes.

* Plusieurs modules photovoltaïques branchés en série forment un « string » ou une « branche ».

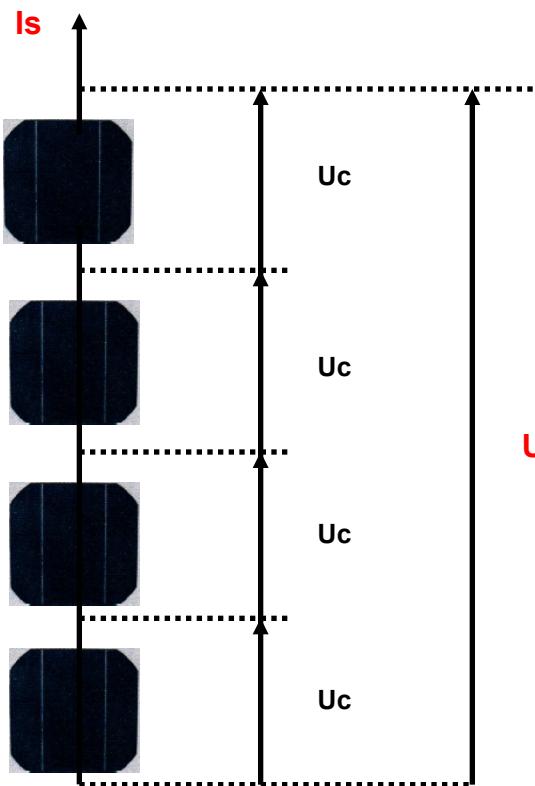


Fig. 28

$$U \text{ total} = 4.Uc$$

$$U \text{ Total} = N \text{ (panneaux)} \times U \text{ (panneau)}$$

$$I \text{ Total} = I \text{ panneau}$$

II – 8 – 2

Montage en parallèle**Les courants des différents panneaux s'additionnent et la tension reste identiques.**

$$i_{\text{Total}} = N_{\text{panneaux}} \times i_{\text{panneau}}$$

$$U_{\text{Total}} = U_{\text{panneau}}$$

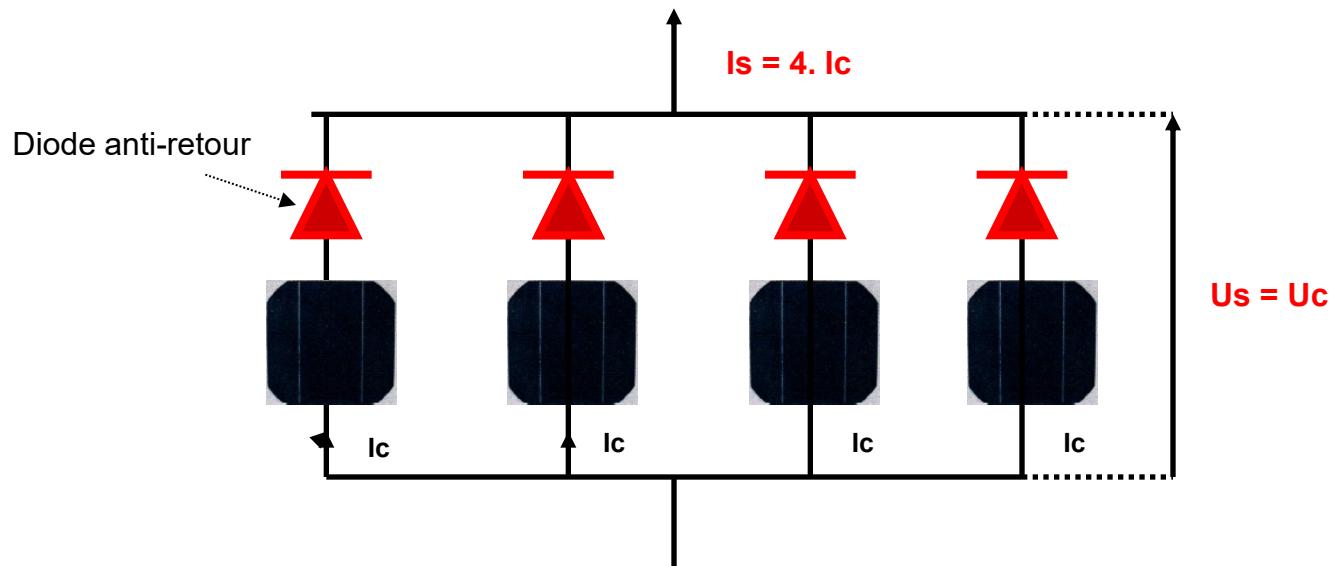


Fig. 29

II – 8 – 3

Choix du branchement en fonction d'éclairement

On comprend alors l'intérêt d'un montage en parallèle et en format paysage sur un toit dont l'ombre monte le soir de façon horizontale.

On comprend aussi l'intérêt d'un montage en parallèle et en format portrait si l'ombre se déplace verticalement.

→ **On monte les panneaux en série pour les installations sans ombre :**

c'est la solution la plus simple, mais il convient de calculer le voltage maximum par rapport à celui de l'onduleur.

→ **On monte les panneaux ou les strings en parallèle pour les installations qui ont une partie à l'ombre, ou lorsque les modules de voltage important dépassent la tension de l'onduleur.**



II – 9 CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES DES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES

II – 9 – 1 Courbes Intensité -Tension et Puissance-Tension

U_{oc} : quand aucun courant ne circule on a une tension à vide U_{oc} ,

I_{sc} : quand il n'y a aucune tension présente, on a un courant de court-circuit I_{sc} .

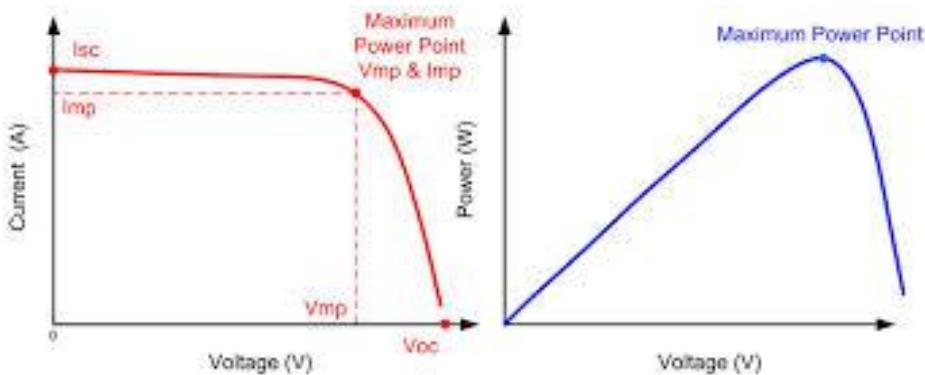


Fig. 30

Dans ces 2 cas la puissance de sortie est **NULLE**.

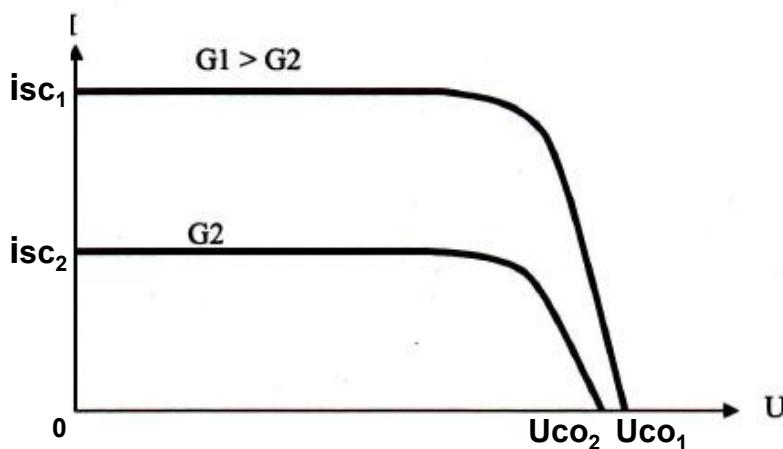
La meilleure combinaison entre ces deux situations extrêmes est obtenue lorsque ces deux grandeurs sont à leur valeur maximale, c'est ce qu'on appelle le point de puissance maximale : **P max.**

Ce point sert à déterminer le rendement maximal du panneau dans des conditions (STC) voir définition dans le lexique).

La puissance à ce point s'exprime en Watt Crête

II – 9 – 2

COURBE INTENSITE - NIVEAU D'ECLAIREMENT (G)



On voit que l'intensité, c'est-à-dire la formation de paires d'électrons – trous diminue lorsque le niveau d'éclairement baisse.

Mais la tension de sortie reste constante..

Fig. 31

II – 9 – 3

COURBE INTENSITE - TEMPERATURE

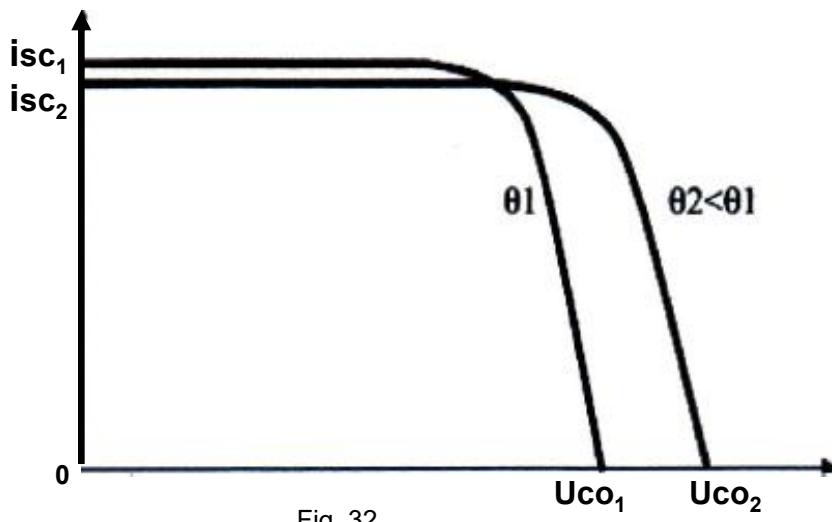


Fig. 32

Plus la température monte, plus le courant d'obscurité croît avec une petite augmentation des paires électrons-trous, mais avec une forte diminution de la tension U_{oc} .

→ La puissance maximum diminue lorsque la température augmente.

II – 10

CAUSES DE DEGRADATION DES PANNEAUX

❖ Perte de potentiel (donc de puissance)

Due à des courants de fuite via les cadres en aluminium, reliées à la terre, car le potentiel du panneau le plus proche du pôle négatif peut atteindre 250 à 400 Volts, voir plus.

Dans ce cas en fonction du type de cellule, il faut mettre à la terre le pôle positif ou le pôle négatif du générateur.

❖ Corrosion

Surtout pour les cellules de technologies « Superstrat », la corrosion se produit en bordure de panneaux à cause de l'humidité sur le sodium, contenu dans le verre de protection.

Pour y répondre, il faut mettre à la terre le pôle négatif du générateur photovoltaïque et une séparation galvanique avec l'onduleur.

Courant de décharge dû à la capacité parasitaire

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$$

A = surface du panneau
d = distance entre le panneau et le cadre relié à la terre

ϵ_0 = constante diélectrique = $8,85 \cdot 10^{-12}$

ϵ_r = constante du matériau = 5 à 10

Le courant de décharge égale = $i = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dU}{dt}$

Ce courant réactif est décalé de 90° par rapport à la tension d'alimentation des panneaux voltaïques.

❖ Résistance d'isolement R_{iso}

Cette résistance doit atteindre $40 \text{ M}\Omega \text{ m}^2$ soit :

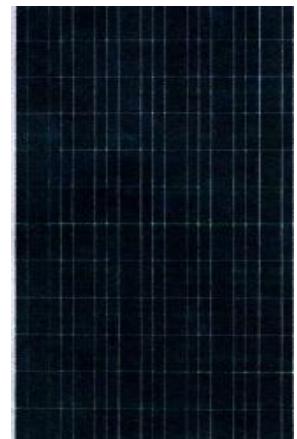
- pour 1 panneau de 1m^2 $R_{iso} = 40 \text{ M}\Omega$
- pour 1 panneau de 2m^2 $R_{iso} = 20 \text{ M}\Omega$

Elle doit être surveillée en permanence pour la sécurité des personnes.

➤ EXEMPLES

**Silicium
Poly-cristallin**

1°) Panneau poly-cristallin REC SOLAR 220AE



Données générales

- Type de cellules 60 REC, cellules poly-cristallines, 3 lignes de 20 cellules, 3 diodes by-pass,
- Verre : trempé traitement anti reflet de Sunarc Technology Back sheet: double couche de polyester haute résistance,
- Cadre : aluminium anodisé,
- Câble : câble solaire Rador 4mm², 0.90 + 1.20m,
- Connecteurs : Radox 4 mm² verrouillage par rotation.

**Silicium
Mono-cristallin**

Spécifications Electriques

- Puissance maximale P max (Wp)	220
- Tolérance Watt Class Ptol (W)	0/+5
- Tension à puissance maximale Vmpp(V)	28.7
- Courant à puissance maximale Impp(V)	7.7
- Tension en circuit ouvert Voc(V)	36.6
- Courant court-circuit Isc(A)	8.2
- Rendement du module (%)	13.3



2°) Panneau monocristallin

L'utilisation de ce panneau solaire est prévue en site isolé, il est équipé de cellule au silicium monocristallin, c'est la technologie qui offre le plus de rendement.

**Silicium
Amorphe**

Réf.	Poids	Description	Dimension (mm)
PM150	15kg	150W – 12V	1580 x 808 x 46



Fig. 33

CHAPITRE III

L'ONDULEUR



III – 1

DEFINITION DE L'ONDULEUR PHOTOVOLTAÏQUE

L'onduleur PV est un appareil qui transforme le courant continu de tension 12, 24, 48 V, etc. issu des panneaux photovoltaïques en courant alternatif de fréquence 50 Hertz et de tension 230 ou 400 V triphasé.

Cet appareil se présente sous la forme d'un boîtier métallique.

Le poids varie de 2 kg à 30 Kg en fonction de leur puissance qui va de 1000 W à 36 KW pour des installations tertiaires.

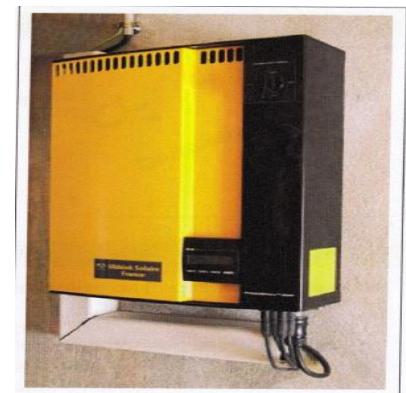


Fig. 34

III – 2

FONCTION DE L'ONDULEUR PHOTOVOLTAÏQUE

Le réseau public est alimenté par un courant alternatif sinusoïdal de fréquence 50Hertz et de tension 230 et 400 V.

Or les cellules photovoltaïques délivrent un courant continu.

Il faut donc pour injecter ce courant dans le réseau public le transformer, le stabiliser et le limiter éventuellement avant de l'envoyer sur le réseau public.

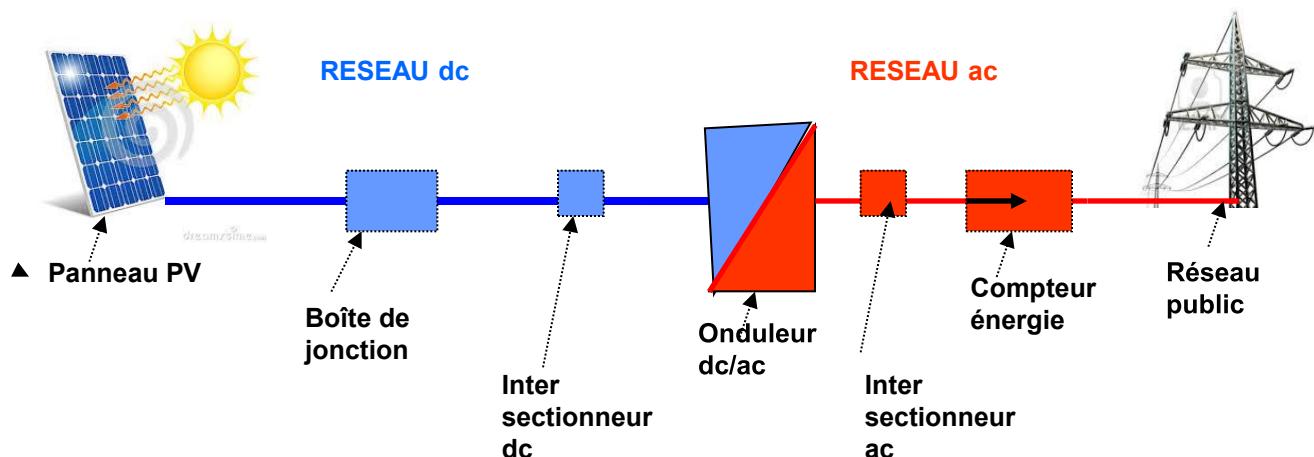


Fig. 35

De plus, il faut protéger le réseau en cas de panne sur celui-ci, donc :



- Transformation,
- Stabilisation (en fréquence, tension, harmoniques, etc...),
- Protection (norme DIN VDE 226).

Sont les 3 fonctions de l'onduleur



III – 3

CONNEXIONS DES ONDULEURS

Il existe plusieurs systèmes de connexion :

- **Système centralisé** : Un seul onduleur PV, relié à l'ensemble des panneaux.
- **Système modulaire** : chaque série de panneau (string) est relié à un onduleur PV,
- **Système avec panneaux alternatifs** : chaque panneau dispose de son micro onduleur

III – 3 – 1

Installation Mono Onduleur

Un seul onduleur représente un intérêt sur le plan économique, mais présente un inconvénient lorsqu'il y a disfonctionnement sur un panneau ou un string.

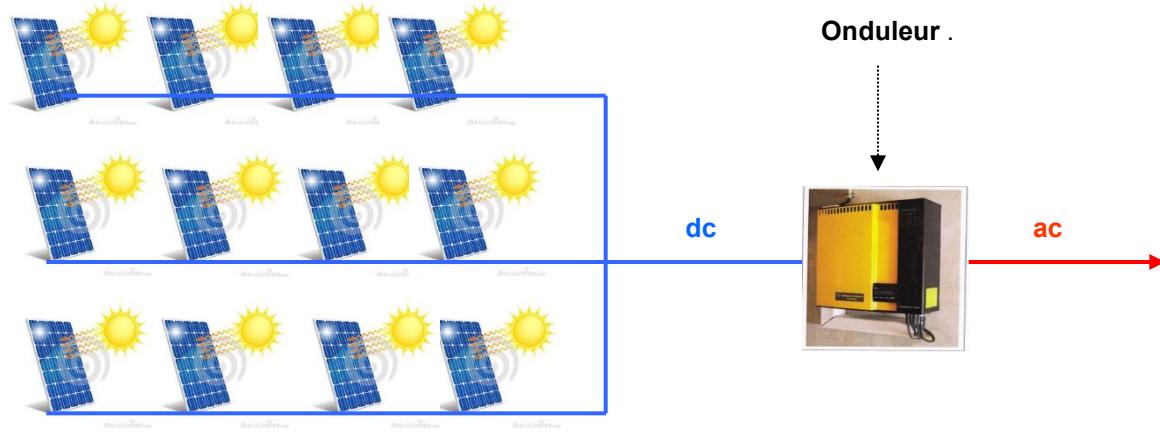


Fig. 36

III – 3 – 2

Installation avec un Onduleur par string

Avec un onduleur par string, ce qui est conseillé dans les installations de taille moyenne, on peut installer des strings de caractéristiques différentes, puisque chaque string est indépendant. On peut ainsi améliorer les caractéristiques globales de l'installation, par exemple la productivité, la fiabilité, etc...

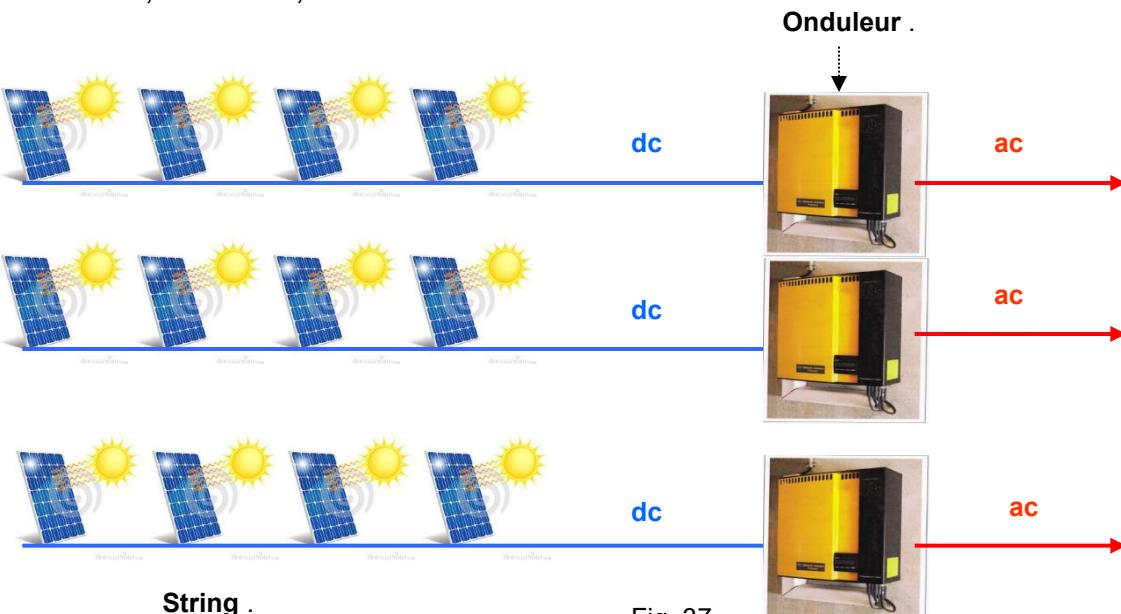


Fig. 37

III – 4 DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES DES L'ONDULEURS PHOTOVOLTAÏQUES A INSTALLER

Il faut que le nombre et les caractéristiques des onduleurs satisfassent à trois paramètres :

- **Compatibilité en tension,**
- **Compatibilité en courant,**
- **Compatibilité en puissance.**

Exemple : Prenons un module PV, réf. Se T 230 G de caractéristiques suivantes :

- Puissance de crête : $P_C = 230 \text{ W}$
- Tension à vide : $U_{CO} = 35.95 \text{ V}$,
- Tension maximale : $U_{MPP} = 30.45 \text{ V}$,
- Courant et court-circuit : $I_{SC STC} = 8.1 \text{ A}$.

III – 4 – 1 Compatibilité de l'onduleur en tension

La tension de champ voltaïque est fonction du nombre de modules branchés **en série**.

En fonction de l' U_{MPP} de chaque module et le nombre de modules en série, on détermine la plage de tension de l'onduleur, par exemple, si on met en série 10 modules PV de plage tension 30 – 45 V avec $U_{CO} = 37.95 \text{ V}$, il faudra un onduleur capable de supporter : U_{max} admissible : $10 \times 37.95 \times 1.15 = 436.4 \text{ V}$

1.15 coeff. de majoration à $t = 20^\circ\text{C}$
0.85 coeff. minoration à $t = + 70^\circ\text{C}$.

Il faut donc un onduleur qui supporte au minimum environ 450 V : **Umax = 450V.**

III – 4 - 2 Compatibilité de l'onduleur en Intensité

L'intensité du champ photovoltaïque est fonction du nombre de chaînes (string) de panneaux en **parallèles**.

Les 10 panneaux sont sur un seul string :

$$\begin{aligned} I_{max} \text{ de l'onduleur} &= 1 \times I_{SC} \times 1.25 \\ 1.25 \text{ coeff. de sécurité (voir guide C 15 - 712-1)} \\ I_{max} &= 1 \times 8.1 \times 1.25 = 10 \text{ A} \end{aligned}$$

Il faut donc un onduleur qui puisse supporter au minimum 10A.

$$I_{max} = 10 \text{ A}$$

III – 4 - 3

Compatibilité de l'onduleur en Puissance

On installe 10 modules sur une seule chaîne, donc puissance installée :

$$P = 10 \times 230 = 2300\text{W crête}$$

$$P_c = 2300 \text{ Wc}$$

Il faut donc que l'onduleur puisse supporter au minimum 2300Wc

Donc l'onduleur à utiliser doit avoir les caractéristiques suivantes :

$$U_{\text{Max}} > 450 \text{ Volts}$$

$$I_{\text{Max}} > 10 \text{ A}$$

$$P_{\text{Max}} > 2300 \text{ Wc.}$$

III – 5

NORMES DE SECURITE DE L'ONDULEUR

❖ Protection de découplage

En cas de coupure accidentelle ou volontaires (pour cause de travaux, par exemple) sur le réseau public, l'onduleur doit couper l'injection de courant afin de protéger les personnes travaillant sur la ligne ou dans le bâtiment.

Cette opération s'appelle un **DECOUPLAGE** et supprime tout risque d'électrocution.

L'onduleur doit répondre à la Norme DIV VDE 226.

III – 6

EMPLACEMENT DE L'ONDULEUR

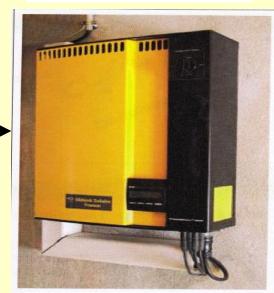
Support vertical

- Toujours le plus près possible des panneaux photovoltaïques, si possible moins de 10 m,
- Placé sur un support vertical,
- Espace ventilé, car l'onduleur produit de la chaleur, notamment le transformateur,
- Espace protégé de la pluie (et du soleil),
- Espace isolé phoniquement,
- Installer un B.A.U (bouton d'arrêt d'urgence) à l'extérieur du local.

Protection et coupure dc .



Onduleur .



Protection et coupure ac .



Compteur d'énergie .



Fig. 38

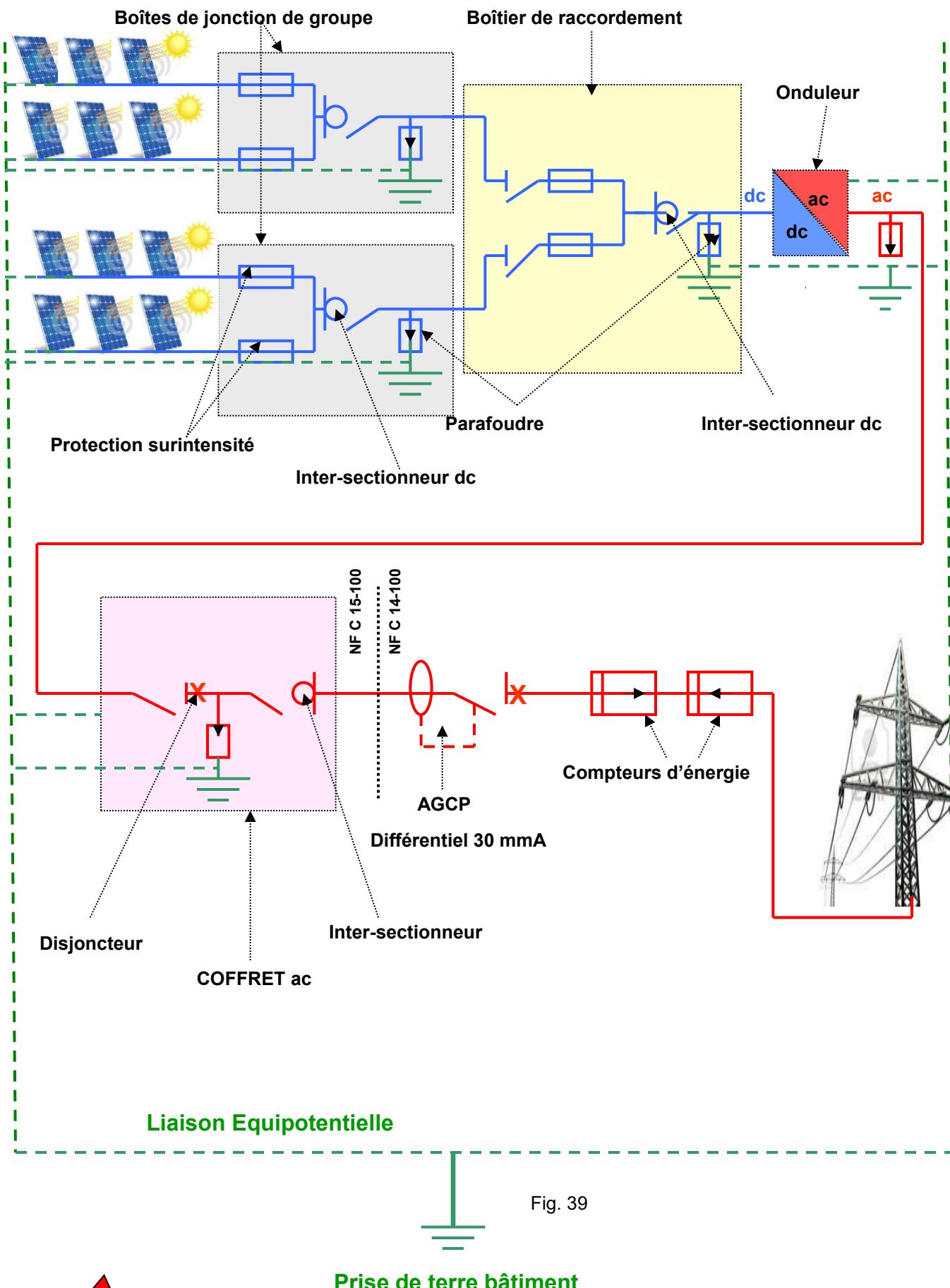
CHAPITRE IV

INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE



IV

SCHEMA DE PRINCIPE D'UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAIQUE



CHAPITRE V

NORMES CONSTRUCTIVES

DE

PROTECTION



V – 1

PROTECTION CONTRE LES CONTACTS DIRECTS

V – 1 – 1

Cas Général

La protection doit être assurée par le matériel de degré de protection minimum :

IP 2X ou IP XXB.

V – 1 – 2

Cas de la TBT ($U < 120 \text{ V } \text{---}$, ou $50 \text{ V } \sim$)

V – 1 – 2 – 1

Cas de la TBTS (très basse tension de sécurité)

La protection contre les contacts directs est **nécessaire** uniquement à partir de $U > 60 \text{ V } \text{---}$
 $25 \text{ V } \sim$

V – 1 – 2 – 2

Cas de la TBTP (très basse tension de protection)

La protection contre les contacts directs est **nécessaire** à partir de : $U > 30 \text{ V } \text{---}$
 $12 \text{ V } \sim$

V – 2

PROTECTION CONTRE LES CONTACTS INDIRECTS

▪ Généralités

Ceux sont les prescriptions de la norme NFC 15-100, parties 4 – 41, 411 – 3 – 3, 414, 414 – 3, 412 qui s'appliquent.

V – 2 – 1

Partie en courant continu

Règle de base

→ **Aucune polarité n'est reliée à la terre.**

Dérogation

Si toutefois pour des raisons fonctionnelles certaines technologies de panneaux PV, en raison notamment de courants capacitifs nécessitent une mise à la terre, il faut impérativement respecter les points suivants :



- **Le conducteur de mise à la terre fonctionnelle ne doit pas être de couleur vert-jaune**
- Isolation galvanique entre la partie DC et AC (par transformateur),
- Mise à la terre de la polarité réalisée en un point unique de la partie DC et située immédiatement en amont du dispositif de coupure,

❖ **Si la terre est directe**

Une protection par coupure automatique pour éliminer tout courant de défaut dans le câble de mise à la terre.



❖ **Si la mise à la terre se fait par l'intermédiaire d'une résistance :**

il faut une surveillance constante obligatoirement par un CPI (contrôleur permanent d'isolement)

- **La section de ce conducteur doit être calculée en fonction de $I_{SC\ STC\ max}$, et au minimum de section 4mm² en cuivre.**

En ce qui concerne les modules PV, Boîtes de jonction, câbles de string, câbles de groupes, coffrets, armoires, etc...

La protection doit être réalisée par au moins l'une des 2 mesures :

- ❖ **Protection TBTS ou TBTP**
- ❖ **Protection par isolation double ou renforcée.**

V – 2 – 2 Partie en courant alternatif

- Isolation double ou renforcée,
- Coupure au 1° défaut en régime TT et TN ou 2° défaut en régime IT.

V - 3 MISE A LA TERRE DES MASSES ET ELEMENTS CONDUCTEURS

❖ **Partie en courant continu**

Tous les éléments métalliques des modules châssis, strings, etc... doivent être reliés à une liaison équipotentielle, elle-même reliée à une seule prise de terre avec des câbles de section minimum 6 mm² en cuivre.

Ces conducteurs sont repérés avec une couleur vert-jaune.

❖ **Partie en courant alternatif**

Les schémas de liaison à la terre doivent être conformes à la Norme NF C 15-100.

V - 4 PROTECTION CONTRE LES SURINTENSITES

V – 4 – 1 Partie en courant continu

V – 4 – 1 – 1 Protection des Modules PV

▪ **1 Seule chaîne (string)**

Pas de possibilité de courant de défaut inverse

→ **Pas de protection contre les surintensités**

▪ **2 chaînes (string) en parallèle**

Le courant de défaut inverse maximal est de 1.25 I_{SC}

→ **Pas de protection contre les surcharges**



- **Nc > 2 chaînes en parallèle**

Le courant de défaut inverse maximal peut valoir :

(Nc – 1) 1.25 i_{sc} → Pas de protection contre les surcharges

Un dispositif de protection est à installer uniquement si le nombre de chaînes NC est supérieure à Nc max qui est donné par le fabricant, ou se calcule en fonction du courant de court-circuit i_{sc} et du courant inverse maximal I_{Rm}.

Le courant assigné des dispositifs de protection est à calculer en fonction du nombre de chaînes du générateur, du nombre de chaînes par dispositif de protection, etc... (voir guide UTE C 15-712-1).

V – 4 – 1 - 2

Protection des câbles

➤ Protection des câbles de chaînes PV

Le courant admissible Iz des câbles de chaînes PV doit être $\geq 1.25 i_{sc\ STC}$ ou In en fonction de Nc (nombre de chaînes) et des différents facteurs de connexion définis dans la partie 5 – 52 de la Norme NFC 15-100.

➤ Protection des câbles de groupes PV

Si 2 groupes en parallèle, le courant max inverse i_{RM} peut atteindre 1.25 i_{sc STC group}

Si Na group en parallèle, le courant max inverse i_{RM} peut valoir : (NA – 1) 1.25 i_{sc STC group}

➤ Protection du câble Principal PV

Le courant admissible Iz doit être supérieur à 1.25 i_{sc STC}

Caractéristiques des dispositifs de protection contre les surintensités.

- **Les 2 polarités doivent être protégées**
- **La tension assignée d'emploi U_e > U_{Co max}.**
- **Pouvoir de coupure > 1.25 i_{sc STC}.**



Tous les dispositifs doivent être marqués avec le symbole « courant continu » ou 

V – 4 – 2

Partie en courant alternatif



Section minimale des conducteurs raccordés aux bornes de l'AGCP est de 10m² Cu

❖ Protection contre les surcharges

Se reporter à l'article 433 de la norme NFC 15-100. Le courant d'emploi IB a considérer est égal au courant maximal ou à défaut 1.1 In (courant nominal).

❖ Protection contre les courts-circuits

Pouvoir de coupure = 3 KA en aval au point de livraison.



V – 5

PROTECTION DE DECOUPLAGE

Il faut installer une protection pour isoler, découpler (ou déconnecter) l'onduleur en cas de :

- ✓ Défaut sur le réseau public,
- ✓ Disparition de l'alimentation par le réseau public,
- ✓ Variation de tension ou fréquence incompatibles.
- Protection type B1 pour installations > 250 KVA)
- Protection type H pour puissance supérieure.

V – 6 PROTECTION CONTRE LES SURTENSIONS D'ORIGINE ATMOSPHERIQUE OU DE MANOEUVRES

V – 6 - 1 PROTECTION PAR EQUIPOTENTIALITE

Toutes les parties métalliques des modules, poutres, structures métalliques, etc... doivent être reliées ensemble et reliées à la terre.

V – 6 - 2 PROTECTION PAR PARAFOUDRE

❖ Installation côté a.c

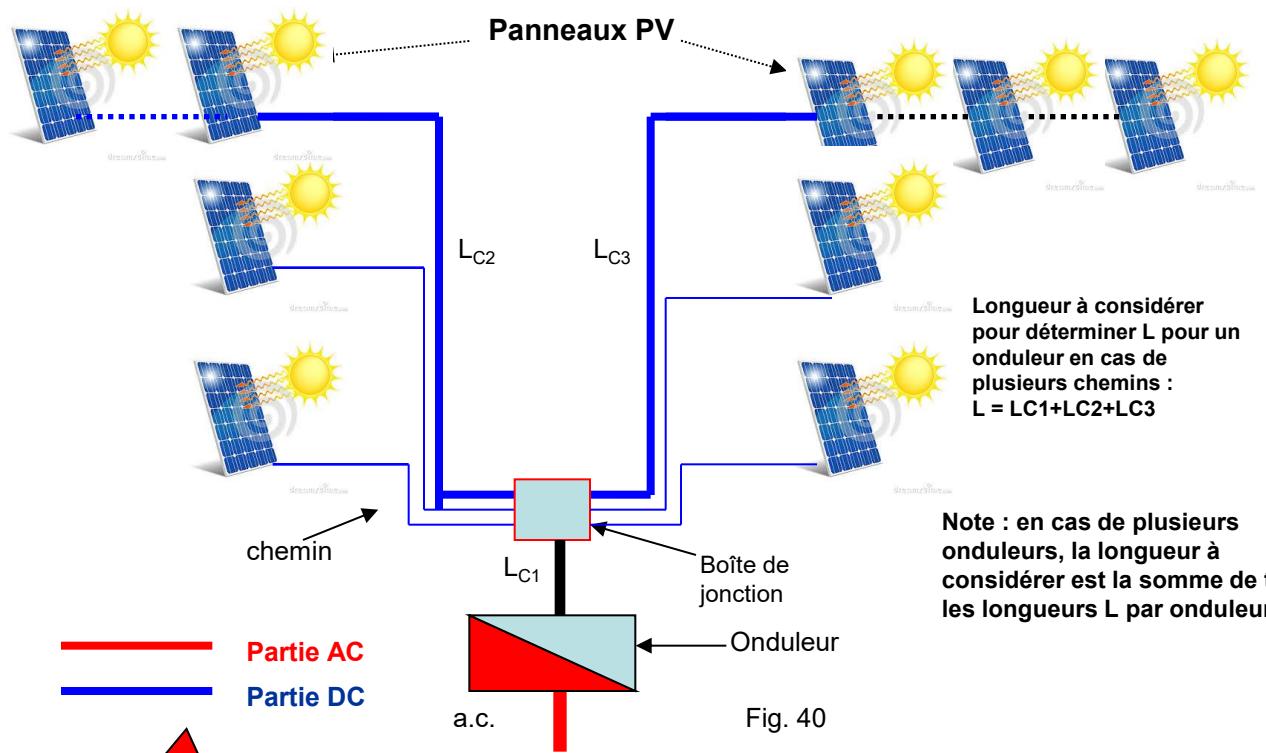
- Obligatoire lorsque l'indice de foudroiement Ng est supérieur à 2.5,
- Obligatoire en présence de paratonnerre.

❖ Installation côté DC

- Installation sans paratonnerre

Tout va dépendre de la longueur L qui est la distance cumulée entre l'onduleur et les points les plus éloignés de la chaîne photovoltaïque.

Principe de calcul de la longueur L



Calcul de la longueur critique L_{crit}

- Locaux d'habitation = $L_{crit} = 115/Ng$
- Bâtiments tertiaires = $L_{crit} = 200/Ng$

Si $L > L_{crit}$ → parafoudre obligatoire côté dc,

Si $L < L_{crit}$ → parafoudre non obligatoire.

NOTA : Si les câbles sont protégés par des enveloppes métalliques les parafoudres peuvent ne pas être indispensables.

➤ Installation avec paratonnerre

Parafoudre, type 2 obligatoire côté dc.

V – 7

NORMES DE SECURITE DES MATERIELS

V – 7 – 1

Câbles

- Protection minimum IP 44 et IK 07 pour tout matériel à l'extérieur (NF EEN 622 62)
- Cheminement des canalisations à l'extérieur des parties privatives (NF C 15-100)
- Câbles non propagateurs de la flamme
- Résistance au minimum à 90° C en régime permanent,
- Mono conducteurs obligatoirement avec un isolement équivalent à la classe II
- Capable de supporter les conditions d'influence A N 3 (guide UTE C 32-502)
- La mise en œuvre des câbles doit être conforme au guide UTE C 15-520.

V – 7 – 2

Modules

Conformes aux normes NF EN 61 730 et

NF EN 612 15

NF EN 61 64 6

V – 7 – 3

Appareillages

- Marquage pour les dispositifs en courant « continu » ou le symbole 
- Interrupteurs, inter-sectionneurs, combiné-fusibles, tous doivent satisfaire à la catégorie d'emploi DC 21 B,
- Sectionneurs, tous doivent satisfaire à la catégorie d'emploi DC 20,



- Connecteurs, tous doivent satisfaire à la catégorie d'emploi DC 1, conformes à la Norme NF EN 505 21
- Dispositifs de connexion ne doivent être démontables qu'à l'aide d'un outil,
- Tous les connecteurs doivent être du même type et de la même marque,
- Le raccordement des parafoudres doit être effectué au plus court (guide UTE C 61-740-51),
- Les principaux composants (boîtes de jonction, câbles dc et ac, onduleurs, dispositifs de coupure) doivent tous comporter des étiquettes de signalisation (voir chapitre VIII, p. 47).



CHAPITRE VI

RISQUES SPECIFIQUES

A

UNE INSTALLATION PV



VI - 1

RISQUES SPECIFIQUES A UNE INSTALLATION PV

Les risques professionnels propres à une intervention sur une installation photovoltaïque sont de 5 ordres :

- 1°) Risques d'électrocution (le plus important),
- 2°) Risques d'incendie par courts-circuits, arcs électriques, etc...,
- 3°) Risques de brûlures,
- 4°) Risques de chutes,
- 5°) Risques Toxiques

Selon une étude récente réalisée par le Consuel, en 2009 sur 2341 installations contrôlées, 37%, soit 864 installations n'étaient pas conformes, et 72% présentaient un risque d'électrocution, et 28% un risque d'incendie

Le risque d'électrocution dans le cadre de la formation à l'habilitation symbole BR photovoltaïque sera principalement analysé dans le présent chapitre.

VI - 2

RISQUES D'ELECTROCUTION



C'est le risque le plus important.



Danger de mort car les tensions des panneaux PV sont comprises entre 250 et 800 volts continu en sortie de champ, chaque panneau délivrant une tension entre 12 et 100 volts continu avec une intensité comprise entre 5 et 10 A, et une température d'une centaine de degré en plein soleil.

Le problème vient du fait que l'on ne peut pas arrêter la production d'électrons (donc d'électricité) tant que les cellules sont frappées par les photons de la lumière !



Lumière du jour = danger de mort

!!!! Attention



La coupure du sectionneur avant l'onduleur coupe l'onduleur et donc l'installation aval en courant alternatif, mais pas l'installation amont en courant continu.

VI - 2 - 1

Intervention d'Entretien sur la partie en courant continu

Lors de manipulation de panneaux :

1°) En cas de défaut d'isolant et de circuit de terre endommagé ou coupé, les châssis et autres parties métalliques peuvent être sous tension mortelle.

2°) Si le technicien touche par accident (en principe très peu probable) les deux polarités, il est soumis à une d.d.p mortelle.

De même, s'il touche un seul conducteur + ou - et que l'autre conducteur de polarité différente a été mis à la terre pour des raisons fonctionnelles, **il peut être électrocuté.**



VI – 2 – 2**Intervention sur incendie**

Toute l'installation de la partie « continu » est en classe II, mais en cas d'incendie, il y a des risques importants d'arcs électriques, car les isolants fondent à la chaleur.

De plus, les câbles de liaison à la terre sont très souvent endommagés, ce qui a pour conséquence de mettre sous tension (jusqu'à 800 Volts, selon les installations, les châssis ou les rails).

Ainsi en projetant de l'eau avec la lance ou lors de travaux de déblaiement, il y a un risque important d'électrocution.

VI – 2 – 2 - 1**Risques d'Incendie**

Fig. 41

Les panneaux eux-mêmes constitués de silicium ne sont pas propagateur du feu, mais l'incendie peut venir d'un disfonctionnement dû, par exemple à une surtension ou un arc provoqué par un défaut d'isolation, etc...

Normalement si l'installation est bien conçue, conforme aux normes NF C 15-100 et 15-712-1, bien contrôlée, et bien entretenue, ce genre d'incendie devrait être rarissime.

VI – 2 – 2 - 2**Risques de Brûlures**

Les panneaux étant brûlants, lors d'une intervention de dépannage, de remplacement de panneaux, etc... les intervenants pourraient se brûler gravement.

VI – 2 - 2 - 3**Risques de Chutes**

En montant sur les toits où sont installés les panneaux, on a des risques de glissades et donc de chutes graves.

En outre, des panneaux peuvent se casser et chuter sur les personnels.

VI – 2 – 2 - 4**Risques Toxiques**

En brûlant, le Mylar qui enrobe les cellules en résine à base de polymère, et le Tedlar, polymère fluoré qui protège les surfaces, émettent des vapeurs toxiques.



CHAPITRE VII

PRESCRIPTIONS

DE

SECURITE



VII – 1

INTERVENTION D'ENTRETIEN – DEPANNAGE, ETC...

- Eviter de toucher les panneaux sans protection adaptée et notamment les gants anti chaleur,
- Eviter de marcher directement sur les panneaux, sauf en cas d'urgence, utiliser alors des équipements adaptés, échelle de toiture, etc...
- Avant toute intervention sur ou à proximité des panneaux PV procéder à **la coupure de toutes les énergies.**

Sur la partie « continu » de l'installation :

- 1°) Vérifier que les mesures de protection contre les courants directs et indirects sont bien respectées, notamment toutes les prises de terre interconnectées (voir chapitre V, p. 37),
- 2°) Occulter les panneaux avec une bâche pour empêcher la lumière d'atteindre les panneaux,**
- 3°) Vérifier la tension en sortie du champ PV.

VII – 2

INTERVENTION D'URGENCE, INCENDIE

La situation est beaucoup plus dangereuse, car les pompiers doivent intervenir pratiquement sous tension lorsqu'un incendie se déclare sur le toit d'un immeuble ou sur des panneaux situés en plein champ.

Bien sur, ils ne peuvent pas toujours, en situation d'urgence occulter les panneaux avec des bâches.

Dans certains pays, des essais avec de la mousse projetée par lance ont été réalisés, mais sans grand succès pour le moment.



La seule solution efficace serait d'installer :
des interrupteurs d'arrêt d'urgence B.A.U
 au niveau des panneaux eux-même.



IL FAUDRAIT RENDRE CETTE MESURE OBLIGATOIRE.

En effet, si les panneaux solaires sont endommagés par l'incendie, et si les pompiers envoient le jet d'eau sur les panneaux, ils peuvent être électrocutés, si la mise à la terre de l'installation n'a pas été correctement réalisée.

Il a été constaté que 18% des installations possédaient des câbles ou connexions inadaptés, et 18% des prises de terre non connectées.

C'est pour cela que les pompiers n'interviennent pas directement sur le feu embrasant les panneaux PV (sauf en cas de sauvetage), ils se contentent de sécuriser le périmètre.



❖ Prescriptions de sécurité à respecter

Mettre en place un périmètre de sécurité,

- Couper toutes les énergies,
- Porter les EPI adaptés,
- Considérer qu'il s'agit d'un **FEU SOUS TENSION** et adapter le protocole prévu à cet effet,
- Utiliser les extincteurs adaptés :
 - extincteur à poudre,
 - extincteur à dioxyde de Carbone CO₂,
 - extincteur à eau pulvérisée (mention tension inférieure à 1000V), en maintenant une distance de 3m,
 - extincteur à eau à jet bâton en maintenant une distance de 8 m du foyer.



Fig. 42



Fig. 43

CHAPITRE VIII

SIGNALETIQUE

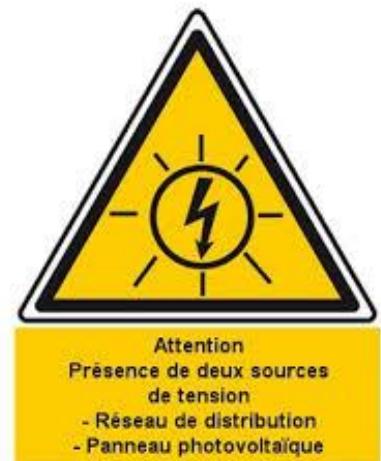
DE

DANGER PHOTOVOLTAÏQUE





**COUPURE
D'URGENCE
ENTREE ONDULEUR**



**LOCAL TECHNIQUE
INSTALLATION
PHOTOVOLTAÏQUE**



Fig. 44

CHAPITRE IX

LEXIQUE

DES

PRINCIPAUX TERMES USUELS



a – c : Courant alternatif,

AM = Indice de Masse Atmosphérique : Longueur du parcours de la lumière à travers l'atmosphère, l'indice vaut 1 au niveau de la mer, ciel sans nuage, soleil à l'aplomb et pression atmosphérique $P = 1.013$. Pascal (dans les conditions standard d'essai (STC), on prend $AM = 1.5$)

Boîte de Jonction P.V : Boîtier de raccordement qui comprend toutes les connexions entre les différents circuits d'un groupe PV,

Chaîne Photovoltaïque (String) ou (branche) : Ensemble de modules PV connectés en série,

Câble de Chaîne PV : Câble reliant les chaînes PV à la boîte de jonction,

Câble de groupe PV : Câble reliant les boîtes de jonction du groupe PV à la boîte de jonction du générateur PV,

Câble Principal PV : Câble reliant le générateur PV à l'onduleur,

Cellule Photovoltaïque : Unité élémentaire du dispositif photovoltaïque générant de l'électricité quand elle est soumise à la lumière,

Champ Photovoltaïque : Assemblage mécanique et électrique de groupes PV

Chaîne Photovoltaïque : (string ou branche) ensemble des modules PV connectées en série,

Coefficient Courant – Température : Variation de la valeur du courant de court-circuit ISC par unité de variation de température

Courant d'Obscurité : Courant rémanent lorsque l'éclairement est nul

d – c : Courant continu

Dispositif A : matériel conçu pour des manœuvres fréquentes,

Dispositif B21 : matériel conçu pour des manœuvres peu fréquentes, sur charges purement résistives, $\cos\varphi = 0.75$,

Doper un semi-conducteur : Introduire dans un semi-conducteur d'infime quantité d'un autre corps de propriétés électroniques différentes, appelés P (positif) ou N (négatif),

Diode anti-retour : Diode en série avec les modules, panneaux , etc... pour bloquer le courant de retour

eV : Electron Volt : énergie d'un électron soumis à une tension de 1 Volt,

G = Unité d'éclairement W.m⁻² : Puissance rayonnée incidente par unité de surface,

Groupe Photovoltaïque : Ensemble mécanique et électrique de chaînes photovoltaïques qui constitue une source de production d'énergie électrique en courant continu

$I_{m\ PP\ STC}$: Courant au point de fonctionnement à puissance maximale dans les conditions d'essais STC,

Installation en PV : Ensemble photovoltaïque qui comprend les modules PV, les onduleurs et tous les dispositifs associés,



i_{sc} : courant de court-circuit lorsque la tension aux bornes du dispositif PV est égale à 0,

$i_{sc\ STC}$: Courant de court-circuit dans les conditions normales (standard) d'essai,

i_{Rm} : Courant inverse maximal

J = Densité de Courant : Valeur du courant de sortie des dispositifs photovoltaïques par unité de surface de ce dispositif, A/Cm⁻²

Jonction PN : Jonction entre un semi-conducteur de type P et un semi-conducteur de type N,

H : Protection de découplage

K : Facteur de correction en fonction de la température :

à 20° K = 1.02 ; à 0° K = 1.1 ; à -20° ; K = 1.18 ; à -30° K = 1.21

Largueur de bande interdite : Quantité d'énergie nécessaire qu'il faut fournir à un électron pour le faire passer de la bande de Valence (où il est prisonnier de l'atome) à la bande de conduction (où il devient libre de circuler),

Module Photovoltaïque (*photovoltaïc module*) : le plus petit ensemble de cellules photovoltaïque interconnectées en série complètement protégé de l'environnement

MPPT : Maximum power point tracking : Pilotage d'un dispositif pour qu'il fonctionne toujours au plus près de son point de fonctionnement à puissance maximale

Na : Nombre de groupes en parallèle

Nc : Nombre de chaînes

Nc max : Nombre de chaînes maximum

Ng : Indice de foudroiement

Onduleur : Convertisseur qui transforme un courant électrique continu en courant électrique alternatif, mono ou triphasé

Panneaux Photovoltaïques (*photovoltaïc panel*) : Assemblage de modules PV interconnectés dans un châssis

Partie en courant continu : Toute l'installation en amont de l'onduleur,

Partie en courant alternatif : Toute l'installation en aval de l'onduleur,

Point chaud : Cellule surchauffée par le faible courant produit à cause d'une défaillance,

Point de fonctionnement à puissance maximale : Point de la courbe $I = f(U)$ où I et U sont au maximum soit :

$$P_{max} = U_{max} \times i_{max}$$



Point de Puissance à éclairement maximum : Dans les conditions normales d'essai, l'indice vaut 1.5 (STC)

Puissance de Crête d'un Module Photovoltaïque Watt Crête : Puissance produite au point où la tension et le courant sont au maximum dans les conditions normales d'essai : $P_{c_{STC}}$ exprimée en Watt - c

Production d'un dispositif photovoltaïque : Energie fournie W exprimée en KW x h par rapport à la puissance nominale P en Watts

P.V : Photovoltaïque

Silicium : **Si**, élément chimique de poids atomique 14, utilisé comme matériau semi-conducteur qui a 4 électrons sur sa couche de Valence,

Soc : (standard opérations, conditions)

Conditions normales de fonctionnement, soit éclairement $G = 800 \text{ W/m}^2$,

Indice de masse atmosphérique A M = 1.5

Conditions nominales de température de la cellule.

STC : (standard tests conditions)

conditions normales d'essai $G = 1000 \text{ W/m}^2$

$t^\circ = 25^\circ \text{ celcius}$

AM = 1.5

Rendement Onduleur : Rapport entre la puissance d'entrée en continu et la puissance de sortie en alternatif au point de fonctionnement assigné,

Rendement du Dispositif photovoltaïque : Rapport entre la puissance d'éclairement et la puissance de sortie

Tension Assigné : Tension prévue pour produire une puissance panachée de la puissance maximale dans les conditions prévues de fonctionnement

U_{CPV} : Tension maximale de régime permanent

U_P : Niveau de protection d'un parafoudre

U_{oc STC} : Tension en circuit ouvert

U_{m pp stc} : Tension à la puissance maximale

U_{oc max} : Tension maximale en circuit ouvert

Tracking : Dispositif permettant de suivre (tracking) le soleil pour travailler toujours au maximum d'éclairement

Watt Crête : Unité de puissance pour désigner la puissance maximale d'un dispositif photovoltaïque dans les conditions normales standard d'essai (STC).



CHAPITRE X

BIBLIOGRAPHIE



Abb

Ademe

bbs conception

Convertisseurs photovoltaïques : Alain Ricaud

Defifeu expertise

EDF – ENR

Guide UTE 15-712-1

Halou solaire

Info expo protection

I.N.S.A Lyon

Le Parisien

Le Photovoltaïque

Mémoire online

Ministère du Développement Durable

Norme NF C 18 510

Photovoltaïque Info

S.A.P 68

S.D.I.S 34

S.M.A

Solorea

Wikipedia

