



Guide de conception
et installation
de panneaux
photovoltaïques
pour les mosquées
connectées
au réseau électrique



Sommaire

INTRODUCTION	4
CHAPITRE I : PRODUCTION SOLAIRE D'EAU CHAUDE SANITAIRE	5
CHAPITRE II : CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES ET CHOIX DES COMPOSANTS D'UN CES	9
CHAPITRE III : DIMENSIONNEMENT DES INSTALLATIONS DE CES	14
CHAPITRE IV : INSTALLATION DES CHAUFFE-EAU SOLAIRE	17
CHAPITRE V : MAINTENANCE ET GARANTIE D'UNE INSTALLATION CES	23
CHAPITRE VI : ÉTUDE DE CAS – ÉTUDE TECHNICO-ÉCONOMIQUE D'UNE MOSQUÉE	27
ANNEXES	30

Introduction

Lancé en 2014 par le Ministère des Habous et des Affaires Islamiques, le Ministère de l'Energie, des Mines de l'Eau et de l'Environnement, l'Agence Marocaine de l'Efficacité Energétique (AMEE) et la Société d'investissements Energétiques (SIE), le programme d'efficacité énergétique dans les mosquées vise la mise à niveau énergétique de plus de 51.000 mosquées au total dans le Royaume. Cette mise à niveau comprend, la réduction de la consommation d'électricité relative à l'éclairage par le remplacement des lampes halogènes ou à incandescence par des lampes à basses consommation, la production d'eau chaude pour les ablutions par des chauffe-eaux solaires, et l'installation de panneaux photovoltaïques pour couvrir une part ou la totalité des besoins électriques des mosquées.

A cet effet, l'AMEE a élaboré le présent guide pour but de fournir des connaissances et des outils pour l'installation de panneaux photovoltaïques sur les toitures des mosquées. Celui-ci traite les cas des installations photovoltaïques pour des mosquées connectées et non connectées au réseau électrique. La première partie sera dédiée au principe et au fonctionnement des installations photovoltaïques, en commençant par une brève définition de l'effet photovoltaïque.

La seconde partie comportera les composantes d'une installation photovoltaïque ainsi que les critères de choix de ces dernières.

Celle-ci sera suivie les étapes de dimensionnement des composantes d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique ou non.

Viendra ensuite les éléments à prendre en considération lors de la pose des panneaux photovoltaïques et de la fixation des autres composantes du système photovoltaïque.

L'installateur trouvera en cinquième lieu les consignes pour maintenir l'état et les performances de l'installation photovoltaïque.

Et pour finir, une étude de cas faite sur la mosquée Al Koutoubia à Marrakech a été réalisée afin de rapprocher un peu plus l'installateur des étapes de dimensionnement.

CHAPITRE I : PRINCIPE ET FONCTIONNEMENT D'UNE INSTALLATION PV

A. Principe

Au fil du temps, l'électricité est devenue un élément primordial dans la vie de l'homme pour que celui-ci puisse assurer ses besoins et ses activités. Actuellement, l'une des solutions les plus répandues pour produire de l'électricité est l'usage des ressources fossiles, mais cette dernière n'est pas renouvelable à l'échelle humaine et son usage est polluant, engendrant les émissions des gaz à effets de serre.

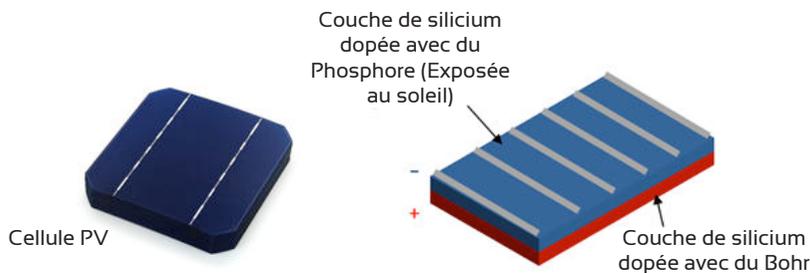
L'énergie solaire, alternative aux ressources fossiles, sert aussi à produire de l'électricité en plus de réchauffer la planète et de faire pousser les plantes grâce à la photosynthèse. Pour bénéficier donc de cette énergie gratuite, des appareils dits panneaux photovoltaïques ont été fabriqués pour ainsi convertir les rayonnements solaires en électricité grâce à l'effet photovoltaïque.

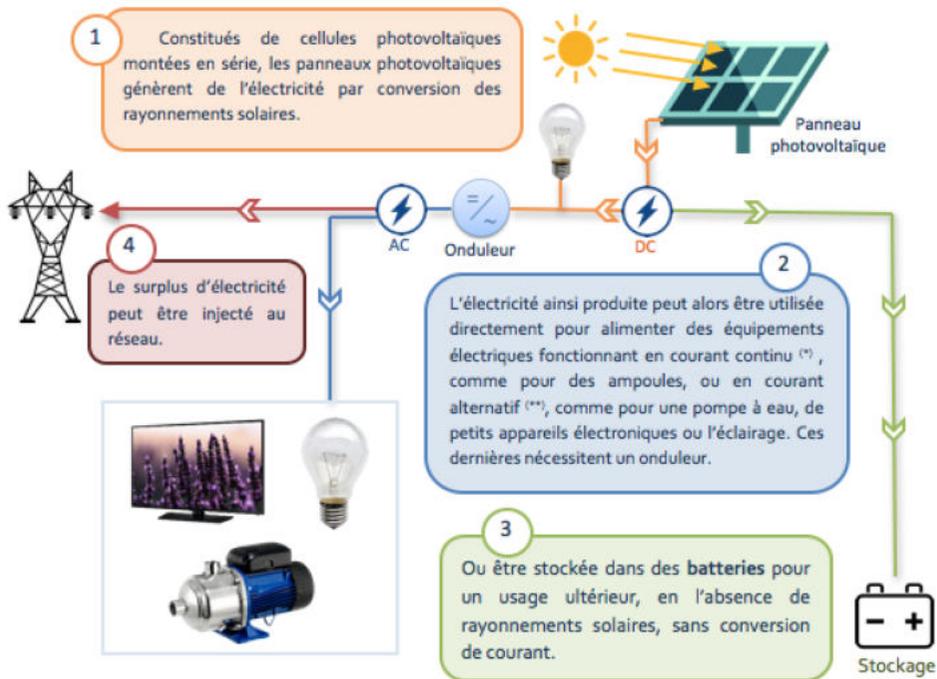
Les panneaux photovoltaïques produisent donc de l'électricité qui couvrira une part jusqu'à la totalité des besoins en énergie. Certaines utilisations n'ont besoin de fonctionner que le jour pendant qu'il y a du soleil, tel que le pompage « au fil du soleil ». D'autres utilisations comme l'éclairage se feront la nuit, d'où la nécessité d'une batterie qui accumulera l'électricité le jour pour la restituer par la suite.

B. Fonctionnement d'une installation PV

L'effet photovoltaïque

A l'origine de ce phénomène, le matériau utilisé pour la fabrication de panneaux photovoltaïques, qui est de type semi-conducteur (généralement du Silicium), est disposé en deux couches. Celle exposée aux rayonnements solaires est dopée par du phosphore (dopée N), et l'autre par du Bohr (dopée P). Mises en contact, ces dernières constituent une cellule photovoltaïque, qui génère de l'électricité en présence de la lumière.





(*) **Courant continu** : est un courant électrique dont la tension est indépendante du temps (constante).

(**) **Courant alternatif** : est un courant électrique périodique qui change de sens deux fois par période et qui transporte des quantités d'électricité alternativement égales dans un sens et dans l'autre.

Un courant alternatif a donc une composante continue (valeur moyenne) nulle.

CHAPITRE 2 : COMPOSANTES D'UNE INSTALLATION PV ET CRITÈRES DE CHOIX

A. Composantes d'une installation PV

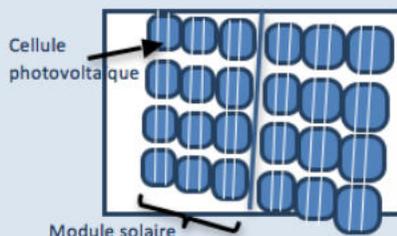
Une installation photovoltaïque se compose des éléments suivants :

Le panneau photovoltaïque

C'est l'élément où se passe la conversion d'énergie contenue dans les photons émis par le soleil, en électricité

Le panneau PV est un assemblage de modules solaires, qui sont eux-mêmes constitués de cellules photovoltaïques comme illustré dans le schéma ci-contre.

Plus le panneau est grand, plus la quantité d'électricité qu'il produit est grande.



Le support de panneau PV

Celui-ci a non seulement pour rôle de fixer le panneau photovoltaïque à l'édifice qui sera alimenté en électricité mais aussi de l'orienter de façon à ce que la production d'électricité soit optimale, tout au long de la journée.

Il existe plusieurs types de structures de toit, celles-ci seront explicités dans la partie critères de choix.



La boîte de jonction

Celle-ci a pour rôle d'assurer la connexion entre les branches de modules (*), de protéger ces dernières contre les surcharges et d'assurer la continuité du fonctionnement du panneau photovoltaïque même en présence d'ombrage partiel ou lorsque l'une des branches est court-circuitée, ceci à l'aide de diodes dites de Bypass.

La boîte de jonction contient :

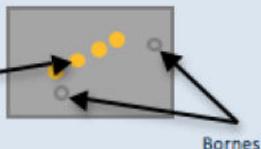
- Des bornes de raccordement
- Des points de sectionnement et des sectionneurs
- Des diodes Bypass pour chaque branche de modules.
- Des fusibles de protection contre les surcharges.



La batterie

Servant de « réservoir » pour stocker l'électricité produite par les modules, la batterie solaire, ou batterie d'accumulateurs, est constituée d'un ensemble de plaques de plomb interconnectées qui baignent dans un bain d'électrolyte (eau distillée + acide sulfurique). L'ensemble est contenu dans un bac plastique rigide.

Bouchons de remplissage pour maintenir le niveau de l'électrolyte



Le régulateur de charge

Celui-ci se trouve à côté des batteries dans le local prévu à cet effet. Il est formé de circuits électroniques qui contrôlent la charge et la décharge de la batterie. Ses fonctions principales sont les suivantes :

- Empêcher la batterie d'être trop chargée ce qui risque de diminuer sa durée de vie. Le régulateur coupe l'alimentation du module quand la batterie est complètement chargée.
- Empêcher la batterie d'être trop déchargée, ce qui risque aussi de diminuer sa durée de vie. Le régulateur coupe le courant aux utilisations avant que la batterie ne soit trop déchargée.



Certains régulateurs comportent 3 voyants lumineux qui indiquent si la batterie est :

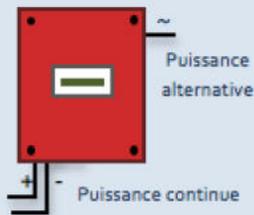
- Chargée (Voyant vert)
- En charge (voyant jaune)
- Déchargée (Voyant rouge)

L'onduleur

Servant de « réservoir » pour stocker l'électricité produite par les modules, la batterie solaire, ou batterie d'accumulateurs, est constituée d'un ensemble de plaques de plomb interconnectées qui baignent dans un bain d'électrolyte (eau distillée + acide sulfurique). L'ensemble est contenu dans un bac plastique rigide.

Les onduleurs destinés aux systèmes photovoltaïques sont quelques peu différents des onduleurs classiques, mais l'objectif de conversion Alternatif / Direct est le même.

Leur principale caractéristique est la recherche du meilleur point de fonctionnement du système, MPPT (Maximum Power Point Tracking).



Le MPP représente le régime de fonctionnement pour lequel le panneau photovoltaïque fournit le maximum de puissance pour un éclaircissement et une température donnés.

Le compteur de production

Celui-ci sert à compter les kWh d'électricité produite par les panneaux photovoltaïques et circulant de l'onduleur vers le réseau.

Éléments assurant les connexions

Les éléments assurant les connexions entre les différents dispositifs cités précédemment et ceux alimentés en électricité sont :



Le câblage électrique



Fiches mâle et femelle



Le câblage électrique



Cosse module



Cosse batterie



Cable module



Barrette

B. Critères de choix des équipements

• Panneau photovoltaïque

Il existe plusieurs types de technologies de panneau photovoltaïques parmi lesquels les panneaux monocristallins, polycristallins et amorphes sont les plus répandus dans le marché du solaire.

Silicium monocristallin

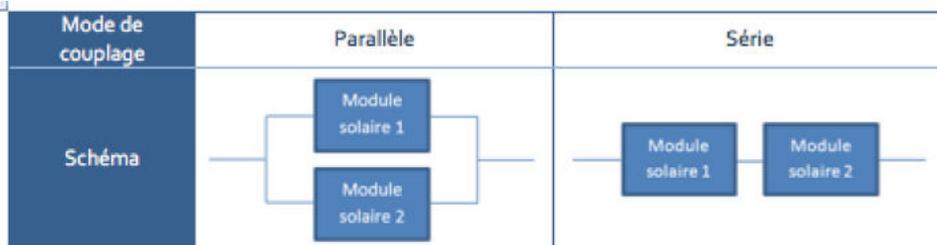
Silicium polycristallin

Silicium amorphe

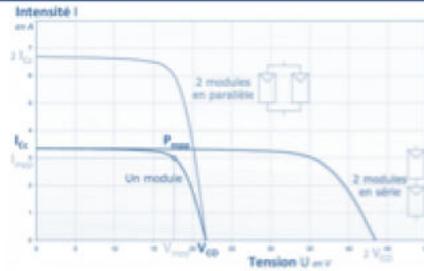
Le choix de la technologie appropriée dépend de la contrainte d'encombrement mais aussi de l'ensoleillement.

- Les panneaux monocristallins ont un très bon rendement (150 Wc/m^2), mais ce dernier chute au fur et à mesure que l'ensoleillement baisse.
- Les panneaux polycristallins ont quant à eux un bon rendement, avec les mêmes caractéristiques que le monocristallin lorsqu'il s'agit du lien entre le rendement et l'ensoleillement. L'avantage est que ce type de panneaux PV représente le meilleur rapport qualité – prix.
- Autre alternative à ces deux dernières technologies, et ayant un rendement faible en plein soleil (60 Wc/m^2), les panneaux amorphes se montrent plus performants en faible ensoleillement, avec un coût très bas, comparé aux autres types de panneaux.

Les caractéristiques d'un panneau solaire sont aussi influencées par le mode de couplage des modules solaire, à savoir un couplage en parallèle qui augmente le courant, un couplage en série qui augmente la tension (formant une branche de modules), ou une combinaison des deux modes.



Courbe caractéristique du panneau photovoltaïque



Pour éviter des pertes de puissance dans l'ensemble du système, il convient d'utiliser exclusivement des modules de même type.

• L'onduleur :

Les critères de choix d'un onduleur sont :

- Favoriser un onduleur à bon rendement. (Le rendement européen est le plus proche de la réalité de fonctionnement de l'élément. Il est égal à 94,4%).
- Changer son onduleur tous les 10 ans.

• Régulateur de charge :

Trois éléments principaux sont à prendre en considération lors du choix du régulateur de charge, à savoir :

- La tension maximum en circuit ouvert des panneaux photovoltaïques
- La tension minimum pour charger les batteries.
- L'intensité maximale du régulateur : c'est la plus grande intensité que peut supporter un régulateur de charge, elle doit être supérieure, de l'ordre de 10 à 20%, à l'intensité de court-circuit des panneaux solaires auquel est relié le régulateur en question.

CHAPITRE 3 : DIMENSIONNEMENT D'UNE INSTALLATION PV POUR LES MOSQUÉES

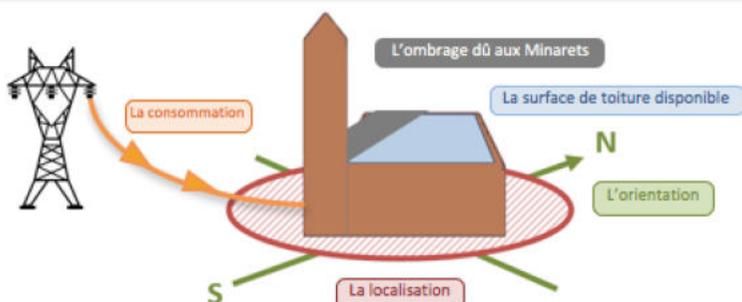
L'installation d'un système photovoltaïque sur la toiture d'une mosquée nécessite un dimensionnement, du fait que ce dernier permet de savoir quels types d'équipements seront utilisés, combien et où les placer. Il assure ainsi un bon fonctionnement du système photovoltaïque et une satisfaction de l'utilisateur.

Les étapes de dimensionnement sont les suivantes :

1 Collecte des données

L'étape de collecte des données permet de déterminer la puissance des panneaux photovoltaïques à installer et donc leur nombre, ainsi que les équipements correspondants.

Les performances du système de production d'électricité à installer dépendent donc de :



2 Dimensionnement du champ photovoltaïque

L'énergie journalière consommée dans la mosquée E_c . Celle-ci sera divisée par un coefficient k dit de correction ou constante de perte d'énergie, qui comme son nom l'indique, prend en compte les pertes liées à titre d'exemple, aux câbles, aux interconnexions ou aux dépôts de poussière sur les capteurs. Celui-ci est généralement compris entre 0,6 et 0,7.

La division des deux paramètres permet d'obtenir l'énergie à produire par les panneaux photovoltaïques E_p :

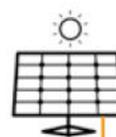
$$E_p = \frac{E_c}{k}$$

La puissance crête des panneaux à installer se calcule en divisant l'énergie à produire E_p par l'irradiation de la région où est située l'installation H . Celle de rabat par exemple est de $5 \text{ kWh/m}^2/\text{jour}$ en moyenne. ([Carte solaire](#))

$$P_{crête} = \frac{E_p}{H}$$

Le nombre de modules N_m nécessaires se calcule par la division de la puissance crête globale $P_{crête}$ par la puissance crête du module utilisé P_{mod} ,

$$N_m = \frac{P_{crête}}{P_{mod}}$$



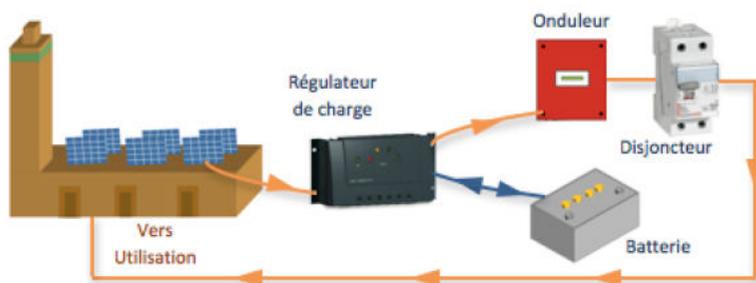
Puissance crête

Nombre de modules

Après la deuxième étape, les démarches de dimensionnement à suivre dépendront du fait que l'installation soit connectée au réseau ou non.

A. Dimensionnement d'un système non-connecté au réseau électrique

Une installation photovoltaïque non-connectée au réseau, dite aussi autonome, se compose des éléments suivants :



A.1 Dimensionnement de la batterie

Le calcul de la capacité totale des batteries **Cap** dépend de quatre paramètres :

- L'énergie consommée dans la mosquée E_c
- Le nombre de jours d'autonomie désiré **N**
- La tension d'installation du champ photovoltaïque **U** (12 V, 24 V, 48 V....)
- La Profondeur de décharge **D**

$$Cap = \frac{E_c \times N}{U \times D}$$

Remarque

- Le résultat de calcul obtenu doit être arrondi vers le haut du fait que les batteries ne sont vendues qu'en degré de capacité définis (50, 80, 100 Ah...).
- Il existe une formule permettant de calculer la tension d'installation du champ photovoltaïque, celle-ci sera explicitée dans le chapitre 6, comportant l'étude de cas de dimensionnement d'une installation photovoltaïque.

A.2 Dimensionnement du régulateur de charge

Le régulateur de charge doit être dimensionné de telle sorte à respecter les critères suivants :

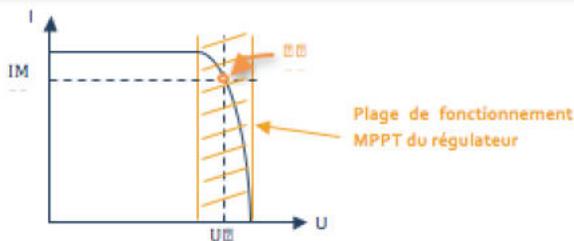
- **Compatibilité en puissance** : La puissance maximale P_{max} du champ photovoltaïque doit être inférieure à la puissance nominale du régulateur.
- **Compatibilité en tension et en courant** : La tension en circuit ouvert U_{oc} et le courant de court-circuit I_{cc} du panneau photovoltaïque doivent être respectivement inférieurs à la tension et au courant maximaux admissibles par le régulateur.



- **Compatibilité en tension avec les batteries** : Le régulateur doit être compatible avec la tension du parc de batteries.

Remarque

Il ne faut pas oublier de s'assurer que la plage de fonctionnement MPPT du régulateur comprend le point de puissance maximal du champ photovoltaïque (2000W, 2800V).



A.3 Dimensionnement du câblage DC

Le câblage doit être dimensionné de façon à ce qu'il n'y ait pas de pertes de puissance considérables. Le facteur auquel il faut donc se référer pour un dimensionnement optimal est la section du câblage minimale (mm²). Celle-ci peut être calculée par une relation mathématique liant les paramètres suivants :

$$S_{min} = \frac{L \cdot I_{max}^2}{K \cdot \Delta U}$$

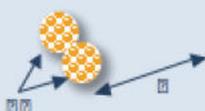
L : Longueur du câblage (en Mètre)

I_{max} : courant maximal (en Ampère)

K : Conductivité du matériau formant le câblage (en Am/V.mm²)

ΔU : Chute de tension maximale tolérée (3%)

U : Tension à l'origine du câble (en Volt)



Remarques

La formule mathématique de la section du câble est multipliée par **deux** du fait que l'électricité produite par les panneaux fait systématiquement un **aller-retour** entre les modules photovoltaïques et la batterie ou l'onduleur, chose qui doit être prise en considération dans les calculs de dimensionnement.

A.4 Dimensionnement de l'onduleur

Comme pour le régulateur de charge, l'onduleur doit être choisi de façon à :

- **Supporter** le courant (A), la tension (V) et la puissance maximale (W) fournis par le champ photovoltaïque à l'entrée.

- S'adapter rapidement au point MPP, afin de fournir le meilleur rendement possible.
- Fournir une tension et un courant compatibles avec les équipements à alimenter.

En plus de cela, il faut prendre en considération d'autres critères de choix de l'onduleur, à savoir le nombre de modules à monter en série, formant un « string », et le nombre de strings à monter en parallèle. Trois formules mathématiques permettent de calculer ces nombres :

- Nombre minimal de modules en série
- Nombre maximal de modules en série

Les deux formules suivantes permettent de déterminer la marge contenant le nombre de modules solaires en série :

Où : $E+(x)$ et $E-(x)$ les parties entières supérieure et inférieure respectivement de « x »

V_{min} , V_{max} et V_{MPP} sont les bornes de la plage de tension MPPT de l'onduleur.

K1 et K2 valent respectivement 0.85 et 1.14

Nombre minimal de modules en série

Et la formule suivante permet de calculer le nombre de modules en parallèle :

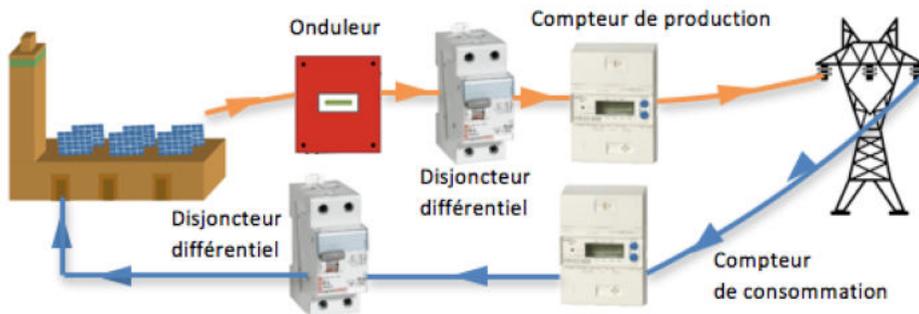
Où : I_{max} : Le courant que peut supporter l'onduleur.

I_{MPP} : le courant à puissance maximale I_{max} .

B. Dimensionnement d'un système raccordé au réseau électrique

Une installation photovoltaïque raccordée au réseau consiste à compenser les différences entre la production et la consommation d'électricité grâce à un échange avec le réseau. De cette façon, les mosquées peuvent se passer d'accumulateurs d'énergie (batteries) en injectant dans le réseau tous les surplus d'énergie produits.

Cette technique permet donc de ne faire appel au réseau électrique qu'au moment où les panneaux photovoltaïques n'arrivent plus à produire de l'électricité ou lorsque la production est faible.



Les composants utilisés pour ce type d'installation photovoltaïque sont schématisés comme suit :

Nous pouvons bien voir que ce type d'installation ne comprend pas de batteries et donc pas de régulateur de charges.

Les éléments à dimensionner, en plus du champ photovoltaïque sont donc uniquement :

- Le câblage DC et AC
- L'onduleur

B.1 Dimensionnement des fusibles -Partie DC-

Lorsqu'un ou plusieurs modules formant un String sont couverts (C'est-à-dire, lorsqu'il y'a ombrage partiel d'un string), il se forme un courant dit courant de retour I_{CR} risquant de détériorer ces derniers.

Afin d'éviter que cela se produise, des fusibles, placés dans le circuit de l'installation, fondent dès que la valeur limite I_{lim} (Caractéristique propre au module) est dépassée.

Le choix de fusibles repose donc sur la comparaison de cette valeur avec celle du courant de retour I_{CR} qui se calcule par la formule suivante :

$$I_{CR} = (I_{sc} - I_0) \times N_{mod} \times N_{string}$$

Avec : N_{string} : Le nombre de strings en parallèle

CHAPITRE 4 : PROTOCOLE D'INSTALLATION D'UN TOIT SOLAIRE POUR LES MOSQUÉES

Le présent protocole d'installation est valable pour une installation autonome comme pour une installation connectée au réseau, du fait qu'il ne contient que des indications sur les modes de montage et de raccordement.

Consignes générales de montage et de raccordement

Mais avant tout, voici quelques consignes générales à suivre avant d'entamer l'installation.

- Tous les équipements doivent être installés à l'intérieur, dans un endroit propre, sec, à l'abri des projecteurs d'eau, de liquides, du ruissellement de la pluie et de la neige...
- Pour une installation photovoltaïque autonome, les modules solaires et la batterie ne doivent pas être raccordés.
- Il ne faut impérativement pas oublier de respecter les polarités, car en cas de mauvais branchement, les appareils risquent d'être endommagés.

A. Ombrage

Il est à noter que le module solaire ne fonctionnera pas correctement s'il n'est pas totalement éclairé par le soleil durant toute la journée. Il faut donc éviter que le panneau reçoive l'ombre portée d'un obstacle quelconque. Cette dernière est généralement causée par le minaret.



Photo aérienne de la mosquée Hassan II

B. Orientation et inclinaison des modules solaires

Au Maroc, et plus généralement pour les pays de l'hémisphère nord, les modules solaires doivent être orientés vers le sud. Quant à leur inclinaison, celle-ci doit à peu près être égale à 34°.

Ces paramètres peuvent être déterminés par les outils suivants :



Un inclinomètre



Une boussole

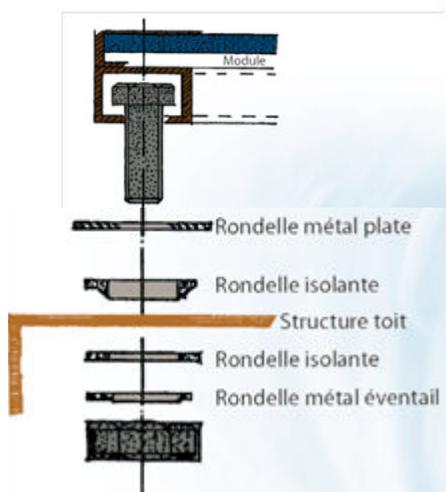


Un niveau

C. Fixation des modules

Pour des modules fixés sur un support en bois ou en métal, ce qui est généralement le cas, il faut d'abord immobiliser ce dernier sur la toiture, à l'aide de poids ou de vis.

Il faut ensuite fixer le module en quatre points sur le support (ou structure). Chaque point de fixation doit comprendre les éléments de fixation qui suivent pour éviter qu'il ait un jeu entre le module et la structure, ainsi qu'une corrosion des vis.



D. Câblage des modules

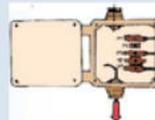
Avant tout raccordement électrique, il faut couvrir le module solaire, car celui-ci, risque de produire de l'électricité une fois exposé aux rayonnements solaires.

En ce qui concerne le câblage, la boîte de connexion située à l'arrière du module permet de raccorder les câbles électriques adaptés, (cosse module, câble module, ...).

Le raccordement se fait selon les étapes suivantes :

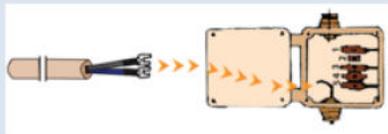
1

Mettre les bouchons sur la boîte de connexion du module et percer uniquement le bouchon qui est vers le sol, afin que la boîte soit étanche à l'eau de pluie.



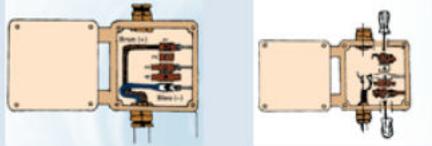
2

Prendre le câble prévu pour réaliser la liaison entre le module solaire et le régulateur de charge (ou l'onduleur), puis le dénuder sur 5 cm et dénuder son extrémité sur 1 cm. Passer le câble dans le bouchon du bas pour que la partie avec les cosse soit à l'intérieur de la boîte de connexion du module.



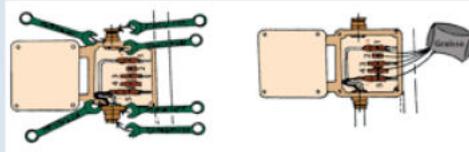
3

Dévisser légèrement la vis de la cosse (+) et de la cosse (-) avec un tournevis cruciforme. Puis glisser le plus loin possible la cosse à fourche du fil bleu sous la vis (-) et serrer la vis. Faire la même chose avec la cosse à fourche du fil brun, cette fois sous la vis (+).



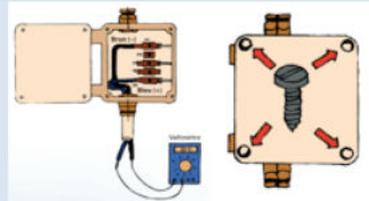
4

Serrer les bouchons de la boîte de connexion, et veiller à ce que les câbles ne bougent pas. Puis mettre de la graisse pour protéger les cosses.



5

Pour finir, vérifier la tension de sortie à l'aide d'un voltmètre et fermer la boîte, si la tension est correcte.



Les 5 étapes doivent être refaites pour chaque module, si l'installation en comporte plusieurs.

E. Interconnexion des modules

Après avoir été câblés, les modules solaires doivent être reliés l'un à l'autre en respectant les résultats du dimensionnement (nombre de modules en série formant une chaîne de modules ou string, et nombre de strings en parallèles).

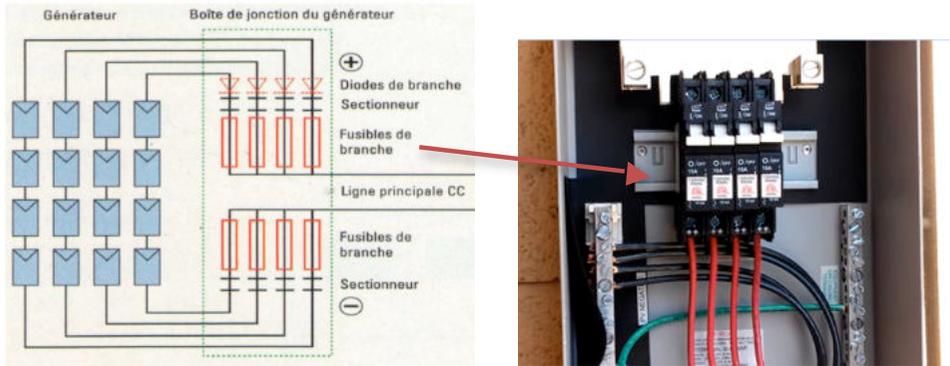
Le montage des modules en série se fait à l'aide de connecteurs de type MC4, en raccordant le pôle positif d'un module au pôle négatif de l'autre, sans oublier de verrouiller le connecteur.



Connecteurs

Si l'installation comporte deux ou plusieurs strings, leur montage en parallèle se fait grâce à la boîte de jonction.

Le schéma et l'image suivants sont ceux d'une boîte de jonction connectant 4 strings en parallèle :



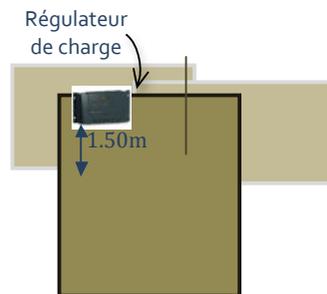
Chaque string est relié à une diode de branche (ou diode bypass) pour une protection contre l'ombrage, et un fusible pour une protection contre les courant de retour.

Les pôles des quatre branches sont reliés entre eux (en respectant la polarité) pour au final obtenir deux fils formant la ligne principale CC.

Cette ligne pourra être connectée soit au régulateur de charge et à l'onduleur pour une installation autonome, ou directement à un onduleur pour une installation connectée au réseau électrique.

F. Installation du régulateur de charge (Installation autonome)

- Le régulateur doit être installé à hauteur des yeux, soit à peu près 1,50 m du sol afin que les indications lumineuses soient bien visibles (exemple : « batterie déchargée »).
- Il doit aussi être installé près des batteries et des modules pour limiter les pertes de charges dues au câblage.
- L'ordre de branchement des différents composants au régulateur de charge est le suivant :





Si le montage à bien été fait, aucun indicateur d'anomalie ne devrait s'allumer. Dans le cas inverse, il faudra s'assurer que les connexions ont bien été réalisées (Inversion de polarité probable).

G. Installation de la batterie (Installation autonome)

Le choix de l'emplacement des batteries dans les mosquées reste délicat du fait que peu de mosquées disposent de locaux vacants, néanmoins il faut retenir que les batteries doivent être placées dans un local aéré sur un support, de préférence en bois enduit d'une protection contre l'agression de l'acide.

Pour que la durée de vie de la batterie soit optimale, il faudrait envisager de charger les batteries avant leur première mise en service.

H. Installation de l'onduleur

Comme pour le régulateur de charge et la batterie, l'onduleur doit être installé dans un lieu sec, aéré et protégé du rayonnement direct du soleil, des sources de chaleur et de l'humidité.

Il doit être installé à une distance minimale des modules solaires afin d'éviter des chutes de tension excessives, et doit être placé dans un local différent des batteries, ceci du fait que ces dernières dégagent des gaz pouvant avoir des effets explosifs ou corrosifs.

Finalement, l'onduleur et son câblage doivent être installés en position verticale et fixés au mur avec les dispositifs prévus à cet effet.

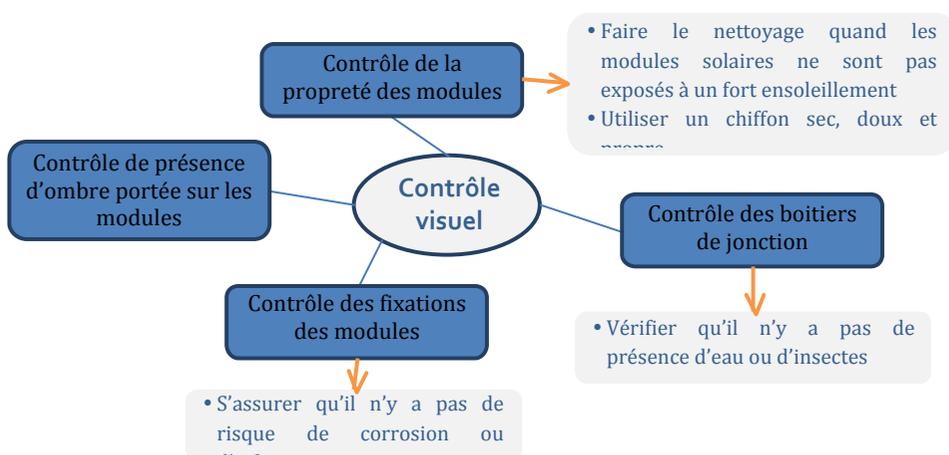
CHAPITRE 5 : MAINTENANCE D'UNE INSTALLATION PV DANS UNE MOSQUÉE

La maintenance de l'installation solaire doit être réalisée trimestriellement et annuellement ceci dans le cadre de l'exploitation des équipements installés.

A. Maintenance trimestrielle

Celle-ci vise à vérifier le bon fonctionnement des équipements par la prise de mesures spécifiques. Elle consiste principalement à contrôler visuellement tous les composants de l'installation et à prendre des mesures légères.

1. Maintenance du module solaire :



2. Maintenance de la batterie :

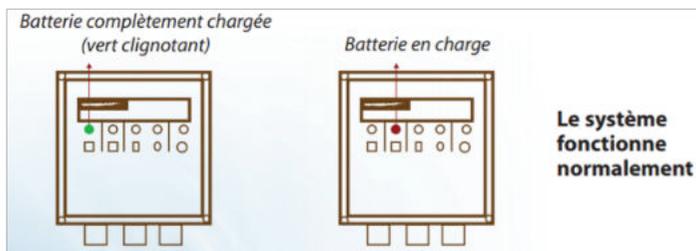
- Contrôle visuel de la propreté du local des batteries
- Contrôle de l'état des batteries : Vérifier s'il y'a une différence des couleurs et s'il y'a des dépôts de sédiments dans les cuves des éléments, et vérifier les connexions des éléments.
- Fuites d'électrolyte : Nettoyer les dépôts d'électrolyte sur les bacs des éléments avec un chiffon contenant uniquement de l'eau et aucun autre additif. Sans utiliser une grande quantité d'eau à proximité du circuit électrique, du fait que l'eau est un conducteur.

3. Maintenance du régulateur de charge et de l'onduleur :

Contrairement aux autres équipements, le régulateur de charge et l'onduleur nécessitent peu d'entretien. Il faut néanmoins :

- Vérifier leur propreté, leur aération et les connexions à leurs bornes
- Observer le bon fonctionnement de leurs différents indicateurs et voyants.

Pour le régulateur de charge, les voyants doivent être comme dans les schémas suivants :



4. Maintenance des câbles et des connecteurs :

Les câbles et connecteurs reliant tous les composants de l'installation doivent être vérifiés à chaque visite de maintenance pour être sûr qu'ils sont en bon état. Il faut s'assurer qu'il n'y a pas de coupure et que l'isolant n'est pas usé.

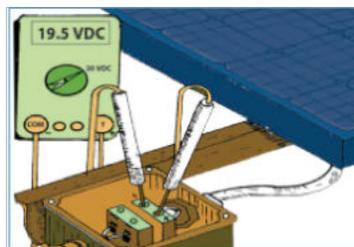
B. Maintenance annuelle

Etant plus approfondie que la maintenance trimestrielle, la maintenance annuelle couvre en plus des actions menées par cette dernière, des actions de mesures approfondies permettant d'évaluer de façon plus précise l'état de fonctionnement des équipements.

1. Maintenance du module solaire :

Au contrôle visuel explicité dans la partie maintenance, vient s'ajouter le contrôle des performances électriques. Celui-ci consiste à mesurer :

- **La tension de circuit ouvert des modules Uco :** La mesure doit être faite un jour ensoleillé sur un module solaire non connecté au reste de l'installation, à l'aide d'un voltmètre ou d'un multimètre en courant continu.

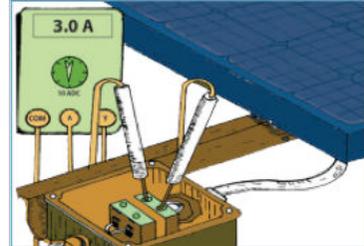


La plage à sélectionner doit contenir la tension à laquelle on s'attend. Par exemple, pour des modules de tension à vide égale à 22,1V, il faut choisir une plage de 0 à 30v.

• **Le courant de court-circuit des modules I_{cc} :**

Comme pour la mesure de la tension, la mesure du courant de court-circuit doit se faire un jour ensoleillé, à l'aide d'un ampèremètre ou d'un multimètre.

Il faudra sélectionner la plage contenant le courant auquel on s'attend, comme ce qui a été pour la mesure de la tension;



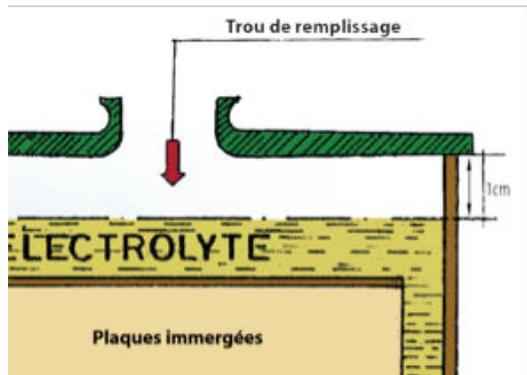
2. Maintenance des batteries :

En plus des vérifications citées précédemment dans la partie maintenance trimestrielle des batteries, il faut contrôler le niveau d'électrolyte dans chacun des éléments.

Il faut aussi vérifier s'il y'a une présence éventuelle de fissures dans les bacs.

La maintenance annuelle des batteries inclue d'autres vérifications plus techniques, à savoir :

- La mesure de la tension aux bornes de celles-ci (La tension doit être supérieure à 12V).
- Le contrôle de la densité de l'électrolyte (La densité doit être comprise entre 1,26 et 1,28).



CHAPITRE 6 : ETUDE DE CAS : ETUDE TECHNIQUE DE LA MOSQUÉE AL KOUTOUBIA

Le présent chapitre comprend les étapes de conception et de dimensionnement d'une installation photovoltaïque pour les mosquées appliquées à un cas concret. La mosquée considérée est celle d'Al Koutoubia, située à Marrakech.



Le système à dimensionner est un système à zéro injection dans le réseau public. Celui-ci couvrira les besoins journaliers relatifs à l'éclairage.

Le dimensionnement du champ photovoltaïque et du parc de batteries se fera à partir de l'analyse des besoins électriques et du gisement solaire. Et après avoir implanté les différents éléments de l'installation, viendra le calcul de la section des câbles.

A. Détermination des besoins électriques

L'évaluation des besoins électriques est une étape primordiale. Elle va permettre de dimensionnement au plus juste la puissance du champ photovoltaïque et la capacité du parc de batteries.

La consommation considérée est celle de l'éclairage intérieur de la mosquée. Les caractéristiques de ce dernier sont contenues dans le tableau suivant :

	Type de lampe	Puissance unitaire (W)	Nombre	Puissance totale (W)
Intérieur	LED	8	860	6880

Calcul du temps de consommation :

Le temps de consommation de l'éclairage intérieur est estimé sur la base des prières journalières, la moyenne du temps d'éclairage pour chaque prière est comme suit :

Prière	Temps avant prière	Temps de prière	Temps après prière	Facteur d'utilisation des lumières	Temps d'éclairage journalier
Al Fajr	30 mins	15 mins	Jusqu'à shourouk	55%	3.31 h
Ad-Dohr	30 mins	20 mins	15 mins	20%	
Al-Asr	30 mins	20 mins	15 mins	20%	
Al-Maghrib	30 mins	17 mins	15 mins	60%	
Entre Maghrib et Isha'	45 mins			35%	
Al-Isha'	30 mins	20 mins	15 mins	70%	

L'énergie moyenne consommée par l'éclairage intérieur par jour est donc :
 $E_c = 3.31 \times 6880 = 22.78$ Kwh/jour

Après avoir estimé la consommation journalière, il faut maintenant calculer la puissance crête du champ photovoltaïque. Sachant que l'irradiation journalière moyenne à Marrakech est égale à $5.1 \text{ kWh/m}^2/\text{jour}$ (Carte solaire), la puissance crête est :
 $P_c = E_c \cdot I_r = 22.780.6 \times 5.48 \approx 7$ Kw

En choisissant le type de module suivant :

Puissance crête	250 Wc/ panneau
Technologie des panneaux	Polycristallin
Puissance nominale P_{mpp}	250 W
Tension à puissance max. V_{mpp}	30 V
Courant à puissance max. I_{mpp}	8.33 A
Tension en circuit ouvert V_{co}	36.01 V
Courant de court-circuit I_{cc}	9.4 A

L'installation comportera donc le nombre de modules suivant :
 $N_m = P_c / \text{Tot}P_c, \text{Module} = 7000 \text{ Wc} / 250 \text{ Wc} = 28$ modules

B. Dimensionnement du parc de batteries

• Choix de la tension du parc de batteries :

Le choix de la tension se fait à l'aide de la formule suivante :

$$U_{\text{batterie}} = p \times 2 \times L \times P \times E$$

Avec :

- P : résistivité du matériau conducteur (cuivre ou aluminium) dans les conditions de température d'exploitation, exprimée en $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$. les câbles à utiliser dans l'installation sont des câbles en cuivre, donc : $\rho = 0.01851 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ sous 20°C .
- 2xL : Longueur aller-retour des câbles entre le parc de batteries et le régulateur, exprimée en m. ce paramètre dépend de l'emplacement choisi (par exemple $2 \times 3\text{m} = 6\text{m}$).
- P : Puissance nominale. Pour le cas étudié, celle-ci est égale à la somme des puissances installées soit $P = 6880 \text{ W} = 6.88 \text{ kW}$
- S : Section des câbles, paramètre inconnu à ce stade de dimensionnement, néanmoins il sera limité à 35 mm^2 pour ne pas augmenter le budget lié au câblage.
- E : perte de charge. A prendre égale à 0.01

La tension est ainsi égale à :

$$U_{\text{batterie}} = 46.72 \text{ V}$$

La valeur standard directement supérieure à prendre est 48V

• Choix de la capacité de la batterie :

Comme énoncé dans le chapitre 3, la capacité de la batterie se calcul avec la formule suivante :

$$\text{Cap} = E \times N \times D \times U_{\text{batterie}}$$

Pour une autonomie de réserve de $N = 7$ jours, un besoin journalier déjà calculé égale à $E_c = 22.78 \text{ kWh/jour}$ et une profondeur maximale de décharge égale à 90%, la capacité de la batterie est égale à :

$$\text{Cap} = 3782 \text{ Ah}$$

C. Dimensionnement de l'onduleur

• Compatibilité en puissance :

La puissance maximale du champ photovoltaïque est de 7000 Wc. L'onduleur choisi est un onduleur Sunny Boy 6000-US, de puissance nominale 7500 W comme indiqué sur la fiche technique qui suit :

Technical data	Sunny Boy 6000-US		
	208 V AC	240 V AC	277 V AC
Input (DC)			
Max. recommended PV power (@ module STC)		7500 W	
Max. DC power (@ $\cos \phi = 1$)		6350 W	
Max. DC voltage		600 V	
DC nominal voltage		310 V	
MPP voltage range		250 V - 480 V	
Min. DC voltage / start voltage		250 V / 300 V	
Max. input current / per string (at DC disconnect)		25 A / 20 A	
		36 A @ combined terminal	
Number of MPP trackers / fused strings per MPP tracker			1 / 4 (DC)

• Compatibilité en tension :

La compatibilité en tension se détermine par le calcul du nombre de modules en série et en parallèle.

Il faut donc faire appel aux trois formules données au chapitre 3, à savoir :

Pour le calcul du nombre de modules en série :

$E + U_{MPP,Min} / U_{MPP} \times K1$: Le nombre minimal de modules en séries.

$E - U_{MPP,Max} / U_{MPP} \times K2$: Le nombre maximal de modules en séries.

Sachant que : $U_{MPP,Min} = 250$ V et $U_{MPP,Max} = 480$ V (Voir fiche technique de l'onduleur)

$U_{MPP} = 30$ V ; $K1 = 0.85$ et $K2 = 1.14$

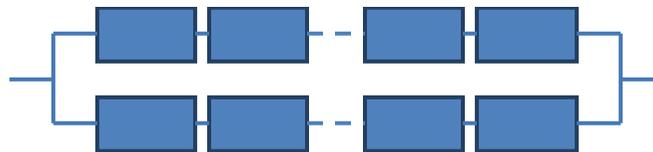
Il en résulte que le nombre minimal de modules en séries est 10 et que le nombre maximal est 14.

En prenant ce dernier et en le multipliant par la tension maximale du module utilisé (36.01 V) multipliée par le coefficient $K2$, la valeur ainsi obtenue permettra de vérifier la compatibilité de l'onduleur avec l'installation photovoltaïque. C'est la tension fournie par une chaîne de 14 modules.

$14 \times 36.01 \times 1.14 = 574.72$ V. l'onduleur est donc compatible en tension avec l'installation du fait qu'il peut supporter jusqu'à 600 V.

Pour le calcul du nombre de modules en parallèle : $E / I_{MPP} = 258.33 = 3$ strings

Le module peut donc supporter 3 strings maximum. Or puisqu'il faut avoir 28 modules, l'installation sera disposée comme suit :



Deux strings en parallèle de 4 modules en série

• Compatibilité en courant :

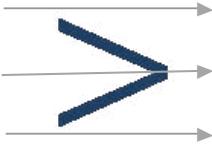
Pour être sûr que l'onduleur est compatible en tension avec l'installation photovoltaïque, il faut multiplier le courant parcourant un string par le nombre de strings.

2×8.33 A = 16.66 A < 25 A

L'onduleur est donc compatible en courant.

D. Dimensionnement du régulateur de charge

Comme vu dans le chapitre traitant le dimensionnement des installations photovoltaïques, il faut que :

- La puissance nominale PMPPT du régulateur de charge
 - La tension maximale admissible
 - Le courant maximal admissible par le régulateur
 - Ceci en plus de la compatibilité avec la tension du parc de batteries.
- Respectivement**
- 
- La puissance du champ
La tension à vide du champ photovoltaïque
Le courant de sortie du champ photovoltaïque

La vérification des trois premières conditions est la même que pour l'onduleur, il ne reste plus qu'à s'assurer de la compatibilité en tension avec le champ de batteries. Celle-ci se fait avec le choix d'un régulateur de charge ayant la même tension.

E. Dimensionnement du câblage

Pour le dimensionnement du câblage, il faut disposer comme indiqué dans la partie dimensionnement, de la longueur des câbles, de la conductivité (ou résistivité) du type de matériau par lequel ils sont fabriqués (cuivre, aluminium...), ainsi que d'autres paramètres qui seront énoncés dans le calcul de la section du câble.

Pour les câbles reliant l'onduleur au champ photovoltaïque :

L	250 Wc/ panneau
Im x	Polycristallin
U	250 W
K	30 V
E _{max}	8.33 A

Ce qui correspond à la plus petite section dans le marché des câbles égale à 1.5 mm²

La même procédure est faite pour les câbles reliant les autres composants entre eux, en veillant à ne pas dépasser une chute de tension de 1%.







AMEE

Espace les Patios 1^{er} Etage,
Angle Av Anakhil et Av Ben Barka
Hay Riad - Rabat
Tél : 05 37 28 73 53
Fax : 05 37 71 79 29
contact@amee.ma