

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
ENP D'ORAN – MAURICE AUDIN

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

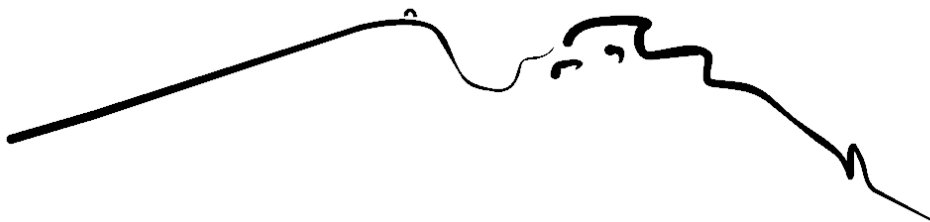


SUPPORT DE COURS N° 6

Formation d'Ingénieurs

« ÉNERGIE SOLAIRE »

- DIMENSIONNEMENT D'UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE -



Enseignant : Dr. Sid Ali LITIM

I. Dimensionnement d'une installation photovoltaïque

Maintenant que vous connaissez les composants d'un système photovoltaïque, et les diverses applications possibles, nous allons aborder le dimensionnement d'un système photovoltaïque.

Le dimensionnement d'un système photovoltaïque suit une démarche par étapes que l'on peut résumer comme suit :

- Étape 1 : Détermination des besoins de l'utilisateur,
- Étape 2 : Chiffrage de l'énergie solaire récupérable,
- Étape 3 : Définition des modules photovoltaïques,
- Étape 4 : Définition de la capacité de la batterie et choix de la technologie,
- Étape 5 : Choix d'un régulateur,
- Étape 6 : Plan de câblage.

I.1 Évaluation des besoins

Il est important de noter qu'il faut privilégier l'économie d'énergie au niveau des récepteurs. Cela impliquera un coût d'achat supérieur, mais le coût global sera moindre, car il faudra une installation moins importante.

I.1.1. Tensions des récepteurs

C'est une fois que l'on a déterminé la puissance que l'on peut déterminer la tension souhaitable pour notre système photovoltaïque.

I.1.2. Le besoin en énergie de l'application

Cette étape est importante. Il est nécessaire de connaître ses besoins en énergie, afin d'obtenir un système bien adapté. Il faut remarquer que toute exigence supplémentaire entraînera une augmentation de la puissance à mettre en œuvre, soit plus de panneaux, plus de batterie.

Pour calculer le besoin journalier en énergie d'une application, on utilise la formule suivante :

$$E = P \times t$$

Le besoin journalier en énergie est donc égal au produit de la puissance consommée par l'application, par le temps d'utilisation par jour.

Il faut bien comprendre la différence entre la puissance et l'énergie. La puissance est une donnée instantanée (**exemple** : le panneau produit 90W en ce moment précis), et l'énergie est une donnée intégrée sur une période de temps (exemple : ces 3 panneaux ont générés 180Wh pendant la journée d'hier).

Pour calculer la consommation totale d'une application, on calcule le besoin énergétique journalier de chaque appareil ou chaque fonction électrique et on les additionne. Le besoin énergétique journalier, B_j , ou consommation journalière, est l'énergie électrique consommée en 24h par l'application.

On aura donc :

$$B_j = E_1 + E_2 + E_3 + \dots$$

La consommation journalière peut se chiffrer de 2 manières différentes : soit en Wh, soit en Ah.

B_j : Besoin journalier (Ah/jour)

L'exemple suivant illustre comment déterminer cette consommation journalière.

Exemple

On suppose que notre installation alimente les appareils suivant :

Appareil	Nombre	Tension	Puissance	Rendement de conversion DC/AC (%)	Durée d'utilisation/jour (h/j)
Lampes	5	24V DC	10	-	3 h
Émetteur radio (en veille)	1	24V DC	2	-	24h
Émetteur radio (en émission)	1	24V DC	160	-	2h
Outillage	1	230V DC	500	85	30 min

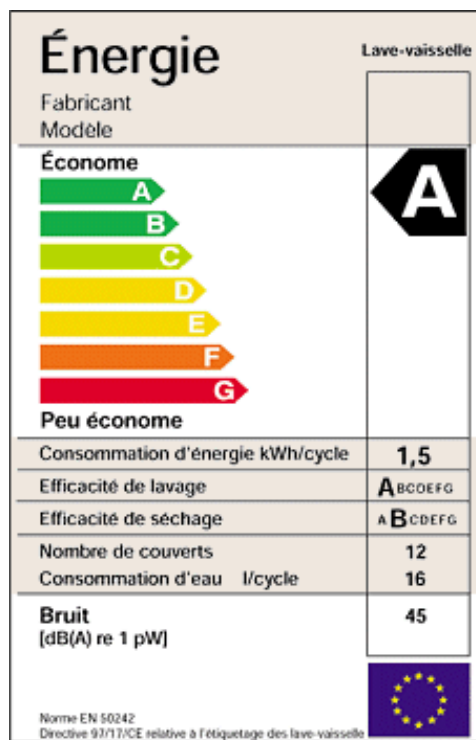
A partir des données précédentes, déterminer quelle sera la consommation totale en énergie journalière ?

Si la consommation n'est pas la même toute l'année, on fera un tableau pour chacune des périodes. Par exemple, pour une consommation de week-end, on la déterminera comme dans l'exercice, et on étalera cette consommation de 2 jours sur les 7 en multipliant le résultat obtenu B_j par $2/7$. On peut également avoir une consommation hiver, et une consommation été.

I.1.3. Consommation intelligente (optimisation de la consommation)

I.1.4. Le choix des appareils électriques

Cette étiquette européenne normalisée affichée sur chaque appareil permet de connaître les caractéristiques de ce dernier. Ici repérez la classe énergétique. **Favorisez cette catégorie "A"**, à la rigueur "B", qui vous assure que votre machine est peu coûteuse à l'usage.



Les références de l'appareil	Figure dans cette première partie de l'étiquette les références précises de l'appareil (un lave-vaisselle en l'occurrence), du modèle et du fabricant.
La classe énergétique	De A (l'appareil est très économe) à G (l'appareil consomme beaucoup d'électricité), ce code couleur donne une idée de la consommation d'énergie d'un appareil électroménager. Cette classification concerne notamment four, lave-vaisselle, sèche-linge, réfrigérateurs, congélateurs. Dans la colonne de droite de l'étiquette sur fond noir figure la catégorie de l'appareil. C'est ainsi que l'on se rend compte si un appareil se révèle coûteux à l'usage.
Consommation, efficacité, capacité	Dans le cas de "notre" lave-vaisselle, cette partie indique la consommation d'eau et d'électricité, la capacité de l'appareil en nombre de couverts ainsi que 2 critères de qualité : l'efficacité du lavage et celle du séchage.
Le bruit	Facteur non négligeable de confort, le bruit émis par l'appareil est inscrit en décibels. En soit, cela n'est pas forcément facile à décrypter mais cela permet les comparaisons avec les autres produits.

- Pour la production de froid, préférez un réfrigérateur et un congélateur séparés.
- Préférez le séchage naturel; Un sèche linge électrique n'est pas recommandé car il consomme deux fois plus d'électricité qu'un lave-linge.
- Éliminez les lampes halogènes et remplacez vos ampoules à incandescence par des ampoules fluo-compactes à basse consommation. Elles consomment 5 fois moins de courant et durent 5 fois plus longtemps.
- Le circulateur de chauffage doit être asservi au fonctionnement de la chaudière ou du brûleur.

I.1.5. Les bons réflexes

- Éviter tout fonctionnement en mode "veille". Penser à une multiprise à interrupteur manuel !
- Éteindre les lumières en quittant la pièce.
- Ne faire fonctionner les lave-linge et lave-vaisselle que lorsque ceux-ci sont pleins.
- Favoriser les programmes "éco" et un lavage à 40°C.
- Une température de 5°C est suffisante pour que votre réfrigérateur remplisse sa fonction. Le régler ainsi et éviter de le coller au mur ou de le mettre dans une pièce trop chauffée. De même éviter de le placer près de sources chaudes: gazinière, chauffage... Ne pas laisser la porte ouverte trop longtemps et le dégivrer régulièrement.

I.2. Étape 2 : Chiffrage de l'énergie solaire récupérable

I.2.1. Orientation et inclinaison des modules

La position des modules photovoltaïque par rapport au soleil influe directement sur leur production énergétique. Il est très important de bien les placer pour utiliser au maximum leurs possibilités. On appelle orientation le point cardinal vers lequel est tournée la face active du panneau (Sud, Nord, Sud-Ouest...). Quant à l'inclinaison, elle indique l'angle que fait le panneau avec le plan horizontal, elle se compte en degrés.

L'orientation d'un module photovoltaïque obéit à une règle très simple : vers l'équateur ? Ce qui donne :

- Orientation vers le Sud dans l'hémisphère Nord.
- Orientation vers le Nord dans l'hémisphère Sud.

En ce qui concerne l'inclinaison ; pour des applications qui consomment une énergie quasi-constante tout au long de l'année, il faut optimiser la production pour la période la moins ensoleillée (l'hiver). Les panneaux doivent donc pouvoir récupérer l'énergie d'un soleil dont la hauteur est faible. Il en résulte qu'en Europe par exemple, pour une utilisation annuelle, l'inclinaison idéale est environ égale à la latitude du lieu + 10° (pour une orientation sud).

I.2.2. Données météorologiques

Une surface exposée au soleil reçoit, à un instant donné, un rayonnement solaire en W/m^2 , qui est un flux, une puissance par unité de surface. Ce flux varie au passage d'un nuage, selon les heures de la journée... Au bout d'une journée, ce flux a produit une énergie journalière ou rayonnement solaire intégré, en Wh/m^2 par jour, produit du rayonnement par le temps. Comme le rayonnement instantané est variable, on obtient cette énergie journalière en calculant l'intégrale de la courbe de rayonnement en fonction du temps.

Grâce aux stations météorologiques, on dispose de nombreuses données statistiques. Ce sont des données, globales sur une journée, qui servent la plupart du temps au dimensionnement d'un système photovoltaïque.

Pour une exposition sans ombre portées, on peut réaliser un dimensionnement assez précis avec 12 valeurs de rayonnement solaire seulement, une pour chaque mois.

Pour un dimensionnement plus rapide, on se servira de la valeur la plus faible de la période de fonctionnement de l'application. En France par exemple, pour une utilisation annuelle, on utilisera la valeur du mois de décembre, qui est généralement la plus basse. Par contre, pour une utilisation estivale, par exemple entre mai et septembre, on utilisera la valeur de mai.

I.2.3. Ombrages

L'ombrage est une caractéristique qui est très difficile à estimer, et il n'existe pas de méthode simple, ni même grossière pour les évaluer. Ils peuvent résulter du passage d'un nuage, comme de l'ombre d'un bâtiment.

I.3. Étape 3 : Définition des modules photovoltaïques

I.3.1. Calcul de la puissance crête du système

Si le soleil est la seule source d'énergie d'un système autonome, sans générateur d'appoint, les modules photovoltaïques doivent alors fournir toute l'énergie consommée, en incluant les pertes à tous les niveaux.

I.3.2. Production électrique d'un module en une journée

Un module se caractérise avant tout par sa puissance-crête P_c (W), puissance dans les conditions STC (Standard Test Conditions → $1000 W/m^2$ à $25^\circ C$).

Le module exposé dans les conditions STC va produire à un instant donné une puissance électrique égale à cette puissance crête, et si cela dure N heures, il aura produit une énergie électrique E_{elec} égale au produit de la puissance crête par le temps écoulé :

$$E_{elec} = N \times P_c$$

Soit : Énergie électrique produite (Wh) = Nombre d'heures d'exposition aux conditions STC (h)* Puissance crête (W).

Cependant, le rayonnement n'est pas constant pendant une journée d'ensoleillement, donc on ne peut pas appliquer strictement cette loi.

Afin de calculer ce que produit un module photovoltaïque pendant une journée d'ensoleillement qui a un certain profil et une énergie solaire intégrée en Wh/m², on va assimiler cette énergie solaire au produit du rayonnement instantané 1000 W/m² par un certain nombre d'heures que l'on appelle « nombre d'heures équivalentes ».

Grâce à la valeur de 1000 de ce rayonnement de référence, le nombre d'heures équivalentes se retrouve exactement égal à l'énergie solaire intégrée si on l'exprime en kWh/m² * jour.

$$E_{\text{sol}} = N_e \times 1000$$

Soit : énergie solaire journalière (Wh/m².jour) = Nombre d'heures équivalentes (h/jour)*1000 (W/m²).

Exercice n°1

Pendant une journée à la station météo de Toulouse, en décembre, à l'orientation Sud et l'inclinaison 60°, le soleil fournit 1,12 kWh/m² * jour. On assimilera cette journée à 1,12h d'un rayonnement de 1000 W/m².

On suppose ensuite que la puissance du panneau est directement proportionnelle au rayonnement instantané, ce qui est vrai en première approximation si le panneau a suffisamment de tension. On peut alors multiplier la puissance crête du panneau solaire par ce nombre d'heures équivalentes pour obtenir la production photovoltaïque pendant cette journée :

$$E_{\text{elec}} = N_e \times P_c$$

Puisque $N_e = E_{\text{sol}}/1000$, on peut l'écrire aussi :

$$E_{\text{elec}} = \frac{E_{\text{sol}} \times P_c}{1000}$$

Mais ce calcul n'est vrai que pour un panneau isolé, dans des conditions idéales. Il ne tient pas compte des pertes inévitables d'un système complet, dans les conditions réelles. Ces pertes ont plusieurs origines, et affectent certains paramètres du système.

E_{elec} : Énergie électrique produite dans la journée (**Wh/jour**)

N_e : Nombre d'heures équivalentes (**h/jour**)

P_c : Puissance crête (**W**)

E_{sol} : Ensoleillement journalier (**Kwh/m².jour**)

I_m : Courant à la puissance maximale STC du module (**A**)

C_p : Coefficient de pertes en courant.

Exercice n° 2

- **Station de 650W :**

Un site qui demande une puissance de **650 W**, aura un besoin journalier (24h) en énergie (Wh) égale à :

$$E = 650 \times 24 = \mathbf{15600 \text{ Wh}}$$

- En termes d'Ah, la consommation C devient (sachant qu'on travaille sous 48V) :

$$C = 15600/48 = \mathbf{325 \text{ Ah}}$$

- Pour calculer la charge électrique produite par un panneau solaire pendant une journée on aura besoin de l'ensoleillement et du coefficient de pertes ; on suppose que l'ensoleillement le plus défavorable au **Maroc** est de **4,129 kWh/m².jour**, connaissant la puissance crête qui égale à **7,39 kw** et le coefficient de perte est de 0,95 :

$$E_{\text{elec}} = 4,129 \times 7,39 \times 0,95 = \mathbf{28,99 \text{ Ah}}$$

Il nous faudra donc un nombre de panneaux solaires **en parallèle** (puisque c'est l'Ah) égale à :

$$N = E(325/28,99) + 1 \approx 12$$

Soit un nombre de panneaux solaires de **N=12**.

Or, Chaque panneau solaire délivre une tension de 12V, on aura donc besoin de quatre panneaux pour chaque série pour atteindre la tension de 48V : le total des panneaux solaires est donc :

$$4*12= \mathbf{48 \text{ panneaux solaires}}$$

I.3.3. Évaluation de Cp

Pour les salissures (**I**), on prend généralement Cp compris entre 0,9 et 0,95. Cela va dépendre si les panneaux sont nettoyés régulièrement, placés à l'horizontale, derrière un vitrage...

Pour les batteries de plomb utilisées en photovoltaïque, on va prendre une efficacité en Ah comprise entre 0,8 et 0,9 selon leurs caractéristiques.

I.3.4. Calcul pratique de la puissance photovoltaïque

Le calcul de la production électrique d'un module peut maintenant s'écrire comme :

$$E_{\text{elec}} = E_{\text{sol}} \times I_m \times C_p$$

Soit : charge électrique produite dans la journée (Ah/jour) = énergie solaire journalière (kWh/m² * jour) * courant à la puissance maximale STC du module (A) * coefficient de pertes en courant

Pour calculer la puissance nécessaire à l'application, on se sert de la formule ci-dessus à l'envers, en remplaçant l'énergie produite par l'énergie demandée.

Pour être certain de disposer d'assez de puissance en toute saison, on fera les calculs dans les conditions d'ensoleillement les plus défavorables de la période d'utilisation.

Pour déterminer le courant à la puissance maximale STC du module, on utilisera donc la formule suivante :

$$I_m = \frac{B_j}{E_{\text{sol}} \times C_p}$$

Soit :

Courant à la puissance maximale STC du module (A) = besoin électrique journalier de l'application (Ah/jour) / [énergie solaire journalière la plus défavorable (kWh/m² * jour) * coefficient de pertes en courant]

E_{elec} : Énergie électrique produite dans la journée (**Ah/jour**)

E_{sol} : Ensoleillement journalier (**Kwh/m² .jour**)

I_m : Courant à la puissance maximale STC du module (**A**)

C_p : Coefficient de pertes en courant.

Exercice n° 3

En reprenant les données de l'exercice 1, on avait obtenu un besoin journalier de 812Wh/jour.

1) Quel est alors le besoin journalier en Ah/jour ?

On suppose maintenant que le coefficient de pertes en courant est de 0,75 et que l'énergie journalière de Paris en décembre (exposition 60° Sud) est de 1,12 kWh/m² * jour.

2) Quel sera le courant I_m nécessaire ?

3) Quelle devra être la valeur minimale de la puissance photovoltaïque du système, P_c , si les modules ont une tension maximale de 34V ?

Réponse :

1) Besoin journalier : 34 Ah/jour

2) $I_m = 40,5$ A

3) $P_c = 1377$ Wc

Justification :

1) $[812 \text{ Wh/jour}] / [24\text{V (tension nominale souhaitée)}] = 34 \text{ Ah/jour}$

2) $I_m = 34 / [1,12 * 0,75] = 40,5 \text{ A}$

3) $P_c = 40,5\text{A} * 34\text{V} = 1377 \text{ Wc}$

Exercice n° 4

Dans l'exercice précédent, nous avons pu déterminer un besoin en puissance photovoltaïque de 1377 Wc, en 24 V nominal.

On suppose maintenant que les modules retenus sont des 47 Wc – 12 V.

1) Combien de modules doit on utiliser dans ce cas ?

2) Comment brancher ces modules ensemble ?

Réponse :

1) 30 modules

2) On câble 2 à 2 les modules en série, puis on câble les 15 chaînes en parallèle.

Justification :

1) Si on utilise 29 modules, on fournira : $29*47 = 1363$ Wc, ce qui n'est pas suffisant pour notre installation. Par contre, si l'on utilise 30 modules, on fournira $30*47 = 1410$ Wc, ce qui est suffisant ici.

2) En disposant les modules 2 à 2 en série, on disposera alors de 15 ensembles de 24 V, ce qui correspond à la tension nominale que nous avons choisie. Il ne reste plus qu'à les disposer en parallèle, afin d'additionner les courants entre eux, et atteindre la puissance nécessaire de 1410 Wc.

I.4. Étape 4 : Dimensionnement de la capacité de la batterie

La capacité utile (C_u) pour un fonctionnement de N_{ja} jours et un besoin électrique journalier B_j est de :

$$C_u = B_j \times N_{ja}$$

Soit :

Capacité utile de la batterie (Ah) = Nombre de jours d'autonomie sans apport solaire * Besoin journalier (Ah)

La capacité utile C_u n'est pas la capacité nominale C20 (pour une décharge de 20h à 25°C), mais la capacité réellement disponible sur le terrain à tout moment. Pour calculer la puissance nominale en fonction de cette capacité souhaitée, on doit tenir compte de la température et/ou de la profondeur de décharge autorisée.

I.4.1. Profondeur de décharge (PD)

Une batterie ne doit pas être déchargée en dessous d'un certain seuil sinon on risque de l'endommager. Une batterie pleine à 70% est à une profondeur de décharge de 30% (PD = 0,3).

I.4.2. Effet de la température (RT)

Si l'application est amenée à fonctionner à basse température, ce sera la principale cause de réduction de capacité, car les réactions de charge et de décharge de l'accumulateur sont ralenties par le froid.

Pour déterminer la réduction de capacité qui en résulte, on aura besoin de courbes de décharge à différentes températures fournies par le constructeur de la batterie. En fonction de la température minimale que le système peut accepter, on va déterminer sur ces courbes le coefficient réducteur de capacité par la température RT.

- Calcul de la capacité avec les coefficients de réduction

Pour tenir compte à la fois des phénomènes de température et de profondeur de décharge maximale, on calcule la capacité nominale comme suit :

$$C_{20} = \frac{C}{PD \times RT} = \frac{B_j \times N_{ja}}{PD \times RT}$$

Soit : capacité nominale C20 (Ah) = (nombre de jours d'autonomie sans apport solaire (jours) * besoin journalier (Ah/jour)) / (profondeur de décharge maximale autorisée * coefficient réducteur de la température)

C20 : Capacité nominale (Ah)

N_{ja} : Nombre de jours d'autonomie sans apport solaire (**jours**)

B_j : Besoin journalier (Ah/**jour**)

RT : Coefficient réducteur de la température.

PD : Profondeur de décharge maximale autorisée.

Exercice n° 5

Station de 650W :

Un site qui demande une puissance de **650 W**, aura un besoin journalier (24h) en énergie (Wh) égale à :

$$B_j = E \text{ (en Wh)} = 650 * 24 = \mathbf{15600 \text{ Wh}}$$

En termes d'Ah, la consommation devient (sachant qu'on travaille sous 48V) :

$$B_j \text{ (en Ah)} = 15600/48 = \mathbf{325 \text{ Ah}}$$

Donc, la capacité batterie en tenant compte du coefficient réducteur de la température et de la profondeur de décharge maximale autorisée, pour une autonomie de **7 jours** est :

$$C_{20} = (325 * 7) / (0,8 * 0,9) = \mathbf{3159,722 \text{ Ah}}$$

Si on travaille avec 48 batteries de **1420 Ah** :

Il nous faudra donc un nombre de batteries **en parallèle** (puisque c'est l'Ah) égale à

$$N = 3159,722/1420 = \mathbf{2,225 \text{ rangées de 24 batteries.}}$$

Si on utilise uniquement deux rangés en parallèle, le nombre de jours d'autonomie va diminuer, et sera : **6,29 jours.**

Si on utilise trois rangés en parallèle, le nombre de jours d'autonomie va augmenter, et sera :

9,43 jours.

Si on travaille avec des batteries de **480 Ah** :

Il nous faudra donc un nombre de batteries **en parallèle** (puisque c'est l'Ah) égale à

$$N = 3159,722/480 = \mathbf{6,582 \text{ rangées de 24 batteries.}}$$

Si on utilise uniquement six rangés en parallèle, le nombre de jours d'autonomie va diminuer, et sera :

6,38 Jours.

Si on utilise sept rangés en parallèle, le nombre de jours d'autonomie va augmenter, et sera : **7,44 jours.**

I.3.5. Choix du type de batterie

L'utilisation d'une batterie va permettre de palier aux problèmes des variations climatiques, sur une échelle allant de quelques minutes à quelques jours. Un certain nombre de paramètres entre en jeu dans le choix de la batterie. Ils sont aussi bien d'ordre technique qu'économique. Il faut également noter que la batterie est le composant le moins durable d'un système photovoltaïque. Il faudra donc le remplacer avant les panneaux.

I.5. Étape 5 : Dimensionnement du stockage et du régulateur

I.5.1. Choix d'une technologie

Un régulateur de charge fait en sorte que la batterie soit bien chargée et la protège contre la surcharge, mais il ne gère pas les problèmes de décharge éventuels. Ce type de régulateur est donc généralement suffisant dans les cas où il n'y a pas de risque de décharge accidentelle.

Un régulateur charge-décharge est très souvent requis pour les applications domestiques, car les utilisateurs peuvent dépasser les consommations prévues. Il est alors utile de couper l'utilisation d'une partie au moins des récepteurs pour permettre à la batterie de se recharger.

Le choix de la technologie du régulateur, shunt, série ou MPPT, est d'abord guidé par la puissance du système photovoltaïque et par le type de batterie à charger. Le régulateur shunt qui dissipe la puissance des panneaux en cas de surcharge de la batterie est mieux adapté aux petits systèmes, et le régulateur série aux plus gros systèmes.

I.5.2. Dimensionnement du régulateur

Une fois la meilleure technologie identifiée, le régulateur sera dimensionné d'après les paramètres suivants :

- § tension nominale (12, 24 ou 48 VDC) : elle doit être celle du champ photovoltaïque
- § courant d'entrée : c'est le courant de charge maximal que les modules sont susceptibles de débiter à un instant donné. Il doit être supporté sans problème par le régulateur.

Et pour les régulateurs qui assurent aussi la protection décharge :

- § courant de sortie : c'est le courant total maximal que peuvent tirer les récepteurs simultanément. Il dépend du module d'utilisation et des récepteurs.

Du point de vue sécurité, on pourra choisir certaines options non indispensables, mais qui reste parfois recommandées :

- une sonde indépendante de température si la batterie et le régulateur ne sont pas dans les mêmes températures ambiantes.
- une mesure indépendante de tension si le régulateur et la batterie sont distants.
- une lecture de la tension batterie et de l'ampérage du champ photovoltaïque pour un bon suivi de l'installation.

I.6. Étape 6 : Plan de câblage

Lors de la phase de définition du système, on doit aussi se préoccuper du câblage, afin d'assurer une certaine cohérence. En effet, les chutes de tension dans les câbles peuvent être très pénalisantes.

Il faut également s'assurer que les diamètres des câbles choisis soient compatibles avec les différents composants retenus. Le cas échéant, on pourra placer une boîte de jonction intermédiaire.

Il est nécessaire de constituer un plan électrique global de l'installation avant de calculer toutes les sections des câbles. Il faut également avoir une idée assez précise de l'implantation physique des composants pour réduire les distances entre les composants du système photovoltaïque.

Pour le choix des sections des câbles, on pourra se servir du calcul de la chute de tension dans un conducteur, donnée par la loi d'Ohm :

$$dV = R.I$$

d'où

$$R = \rho \times (l/s)$$

Avec :

R = résistance (Ω)

l = longueur (m)

s = section (mm^2) du conducteur

ρ = résistivité valant environ $20 \text{ m}\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ pour le cuivre.