

Université de Toulon

IUT de Toulon

Département Génie Electrique et Informatique Industrielle (GEII)

SAE

Production d'énergie solaire

écrit le 15 juin 2024

par

Bruno HANNA

Encadrant universitaire : Stephane PIGNOL



Table des matières

| | |
|--|-----------|
| Introduction | 1 |
| 1 Étude Technique des Composants du Système Solaire | 2 |
| 1.1 Schéma Électrique Fonctionnel et Domaine d'Application | 2 |
| 1.2 Caractéristiques Électriques et Conditions de Test | 3 |
| 2 Rôle et Fonctionnement du MPPT | 4 |
| 3 Rôle et technologie du parc de batteries | 5 |
| 4 Comparaison des technologies de batteries | 6 |
| 5 Logiciels et Applications de Surveillance | 7 |
| 6 Calcul de la Section de Câble | 8 |
| 6.1 Confirmation par Abaques | 9 |
| Conclusion | 10 |

Introduction

Ce rapport se consacre à l'étude d'une chaîne de production d'énergie solaire destinée aux systèmes isolés, plus spécifiquement celle installée dans la salle Z13 de notre établissement. Cette analyse approfondie vise à comprendre les composantes clés de la chaîne, depuis la capture de l'énergie solaire par les panneaux jusqu'à sa conversion en électricité utilisable, en passant par son stockage.

Présentation de la chaîne de production d'énergie solaire étudiée

La chaîne de production d'énergie analysée se compose de quatre panneaux solaires associés en série, des dispositifs de protection tels que fusibles et coffrets sectionneurs, un contrôleur de charge MPPT (Maximum Power Point Tracking), un onduleur et divers éléments de visualisation et de mesure. Située sur le toit du bâtiment, cette installation n'est pas directement observable depuis la salle de TP, ce qui soulève des questions intéressantes quant à son suivi et sa maintenance. Ce rapport détaillera chaque composant, son rôle au sein de la chaîne, et l'interaction entre eux pour assurer une production énergétique optimale.

1 Étude Technique des Composants du Système Solaire

1.1 Schéma Électrique Fonctionnel et Domaine d'Application

Schéma Électrique Fonctionnel

Le schéma technique complet du système solaire photovoltaïque est présenté dans le cours et disponible en annexe pour consultation détaillée. Cependant, dans le cadre de ce document, une version fonctionnelle du schéma électrique est fournie pour expliciter le rôle et la connexion de chaque composant technique du système. Ce schéma inclut les panneaux solaires, fusibles, coffrets, sectionneurs, le MPPT, les dispositifs de visualisation, et l'onduleur.

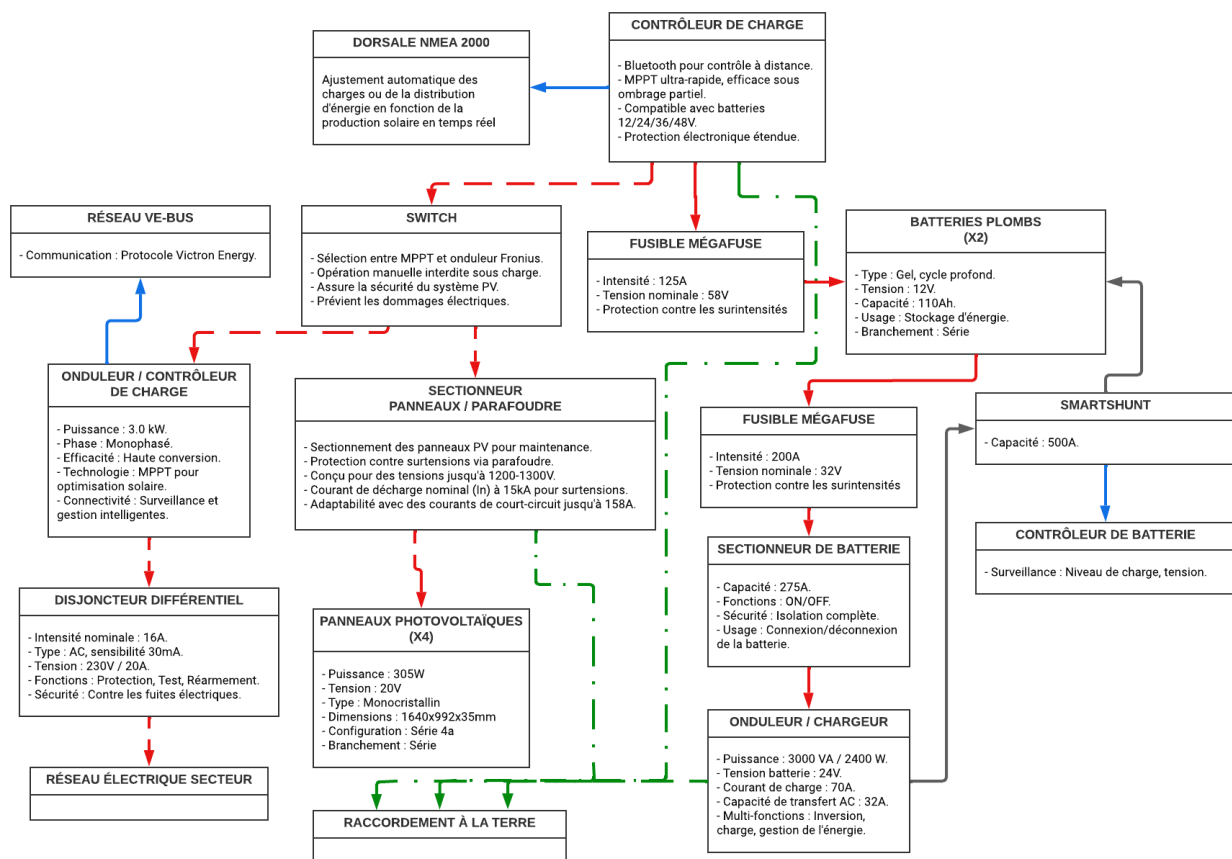


Figure 1 – Schéma fonctionnel du système solaire photovoltaïque.

Légende des couleurs des câbles dans le schéma :

- - - : raccordement à la terre.
- - - : Câble avec potentiel + et -.
- : câble potentiel +.
- : câble potentiel -.
- : câble de communication.

Domaines d'Application des Systèmes Victron et Fronius

L'onduleur Fronius, convenant aux installations domestiques, offre la possibilité d'une connexion directe au réseau avec une alimentation de 230V. En opposition, l'onduleur Victron est conçu pour des installations isolées, indépendantes du réseau électrique.

1.2 Caractéristiques Électriques et Conditions de Test

Courbe $I = f(U)$ et Conditions de Test Standard

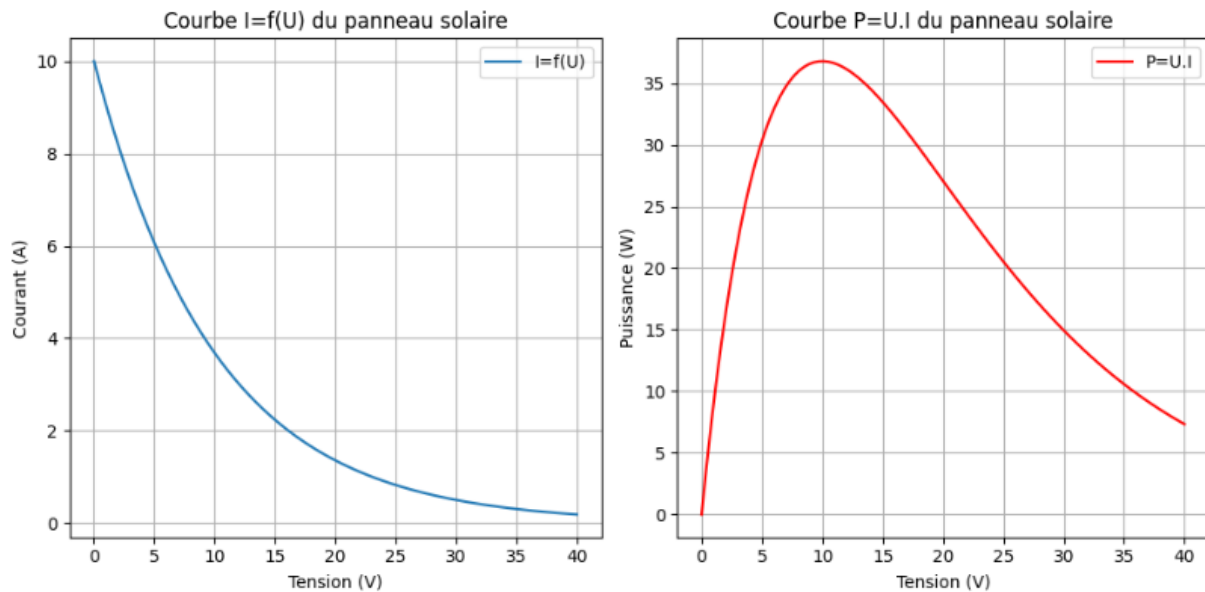


Figure 2 – À gauche, la courbe du courant en fonction de la tension ($I=f(U)$). À droite, la courbe de la puissance en fonction de la tension ($P=U.I$).

Calculs de Performance

Les performances du système photovoltaïque sous STC sont présentées ci-dessous :

La tension au point de puissance maximale (V_{mpp}) :

$$V_{mpp} = 130 \text{ V} \quad (1)$$

Le courant au point de puissance maximale (I_{mpp}) :

$$I_{mpp} = 9.38 \text{ A} \quad (2)$$

La puissance au point de puissance maximale (P_{mpp}) est calculée par :

$$P_{mpp} = V_{mpp} \times I_{mpp} = 130 \text{ V} \times 9.38 \text{ A} = 1220 \text{ W} \quad (3)$$

La production énergétique par mètre carré sous une irradiance de 1000 W/m^2 :

$$\text{Production par m}^2 = 187,57 \text{ W/m}^2 \quad (4)$$

Le rendement η du panneau solaire, calculé comme suit :

$$\eta = \left(\frac{\text{Production par m}^2}{\text{Irradiance}} \right) \times 100 = \left(\frac{187,57 \text{ W/m}^2}{1000 \text{ W/m}^2} \right) \times 100 = 18,57\% \quad (5)$$

Ces équations permettent une présentation claire et précise des calculs de performance du système photovoltaïque sous examen.

2 Rôle et Fonctionnement du MPPT

Le MPPT (Maximum Power Point Tracking) SmartSolar de Victron Energy optimise la conversion de l'énergie solaire en énergie utilisable grâce à un suivi ultra-rapide du point de puissance maximale. Il est capable d'améliorer la production d'énergie jusqu'à 30% par rapport aux contrôleurs PWM et de 10% par rapport aux MPPT plus lents, surtout dans des conditions de luminosité changeante.

Fonctionnement

Le MPPT ajuste dynamiquement la charge pour extraire le maximum de puissance des panneaux solaires, même en présence d'ombrage partiel, grâce à son algorithme novateur qui se bloque sur le MPP optimal.

Entrées et Sorties

- **Entrée** : Panneaux solaires avec une tension maximale de circuit ouvert de 250V et un courant maximal de court-circuit PV de 35A ou 70A, selon le modèle.
- **Sortie** : Adaptée aux batteries de 12V, 24V, 48V (et 36V manuellement), avec un courant de charge nominal de 70A à 100A.

Dimensionnement du système solaire photovoltaïque à Toulon

Pour dimensionner correctement une installation de panneaux solaires BlueSolar à Toulon, en France, il est crucial de calculer la tension de circuit ouvert (V_{oc}) à la température hivernale la plus basse attendue et de vérifier si cette valeur reste dans les limites acceptables pour le contrôleur MPPT.

Toulon a une température minimale moyenne en hiver d'environ 3°C. Nous utiliserons cette température pour nos calculs avec un panneau BlueSolar monocristallin 305W, dont la V_{oc} à 25°C (STC) est de 39.7V et le coefficient de température de V_{oc} est de -0.35%/°C.

Calcul de la Voc à 3°C

La formule pour ajuster la Voc en fonction de la température est la suivante :

$$V_{OC_{temp}} = V_{OC_{STC}} \times (1 + \text{Coefficient de température de Voc} \times (\text{Température} - 25)) \quad (6)$$

En insérant les valeurs :

$$V_{OC_{3C}} = 39.7V \times (1 - 0.0035 \times (3 - 25)) \approx 42.77V \quad (7)$$

Ceci indique que la tension de circuit ouvert d'un seul panneau BlueSolar 305W à Toulon en hiver serait d'environ 42.77V.

Vérification avec le MPPT

Pour vérifier que cette tension reste dans les limites du MPPT, prenons le modèle MPPT 250/100 VE.Can qui supporte une tension maximale d'entrée de 250V. En connectant plusieurs panneaux en série, la somme des tensions de circuit ouvert ne doit pas dépasser cette limite.

Avec la Voc ajustée à 3°C de 42.77V par panneau, vous pouvez connecter jusqu'à :

$$\frac{250V}{42.77V} \approx 5.85 \quad (8)$$

Ce qui signifie que, dans les conditions les plus froides à Toulon, vous pouvez connecter jusqu'à 5 panneaux en série sans dépasser la limite de tension d'entrée du MPPT 250/100 VE.Can. Ces calculs confirment donc que l'installation photovoltaïque (4 panneaux) est bien dimensionnée pour opérer efficacement pendant l'hiver à Toulon, en respectant les spécifications du MPPT.

3 Rôle et technologie du parc de batteries

Les batteries dans un système solaire stockent l'énergie pour une utilisation lorsqu'il n'y a pas de production solaire, comme la nuit ou pendant les jours nuageux, garantissant une fiabilité et une indépendance énergétique.

Technologies de Batteries

Les batteries AGM (Absorbent Glass Mat) et Gel sont des types de batteries VRLA (Valve Regulated Lead Acid), conçues pour des cycles de décharge profonde répétés, idéales pour les systèmes solaires hors réseau.

Définitions

- **BULK** : Première phase de charge à courant constant pour amener la batterie à environ 80% de sa capacité.

- **ABSORPTION** : Phase où le courant diminue tout en maintenant la tension, permettant de charger complètement la batterie.
- **FLOAT** : Phase de maintien, compensant l'autodécharge et maintenant la batterie proche de sa pleine charge sans surcharger.
- **Profondeur de Décharge (DoD)** : Pourcentage de la capacité totale d'une batterie qui a été consommé.

Bien que la méthode de charge en quatre étapes de Victron Energy paraisse être une amélioration significative pour la durée de vie des batteries, nous aborderons ici la gestion des batteries en considérant une approche traditionnelle en trois étapes (Bulk, Absorption, Float), comme cela semble être l'orientation de la question.

Courbe de Charge pour Batteries 12V et 24V

Pour illustrer la charge d'une batterie, on considérera les tensions typiques pour chaque phase pour une batterie de 12V. Pour une installation de 24V (deux batteries de 12V en série), il suffit de doubler ces tensions.

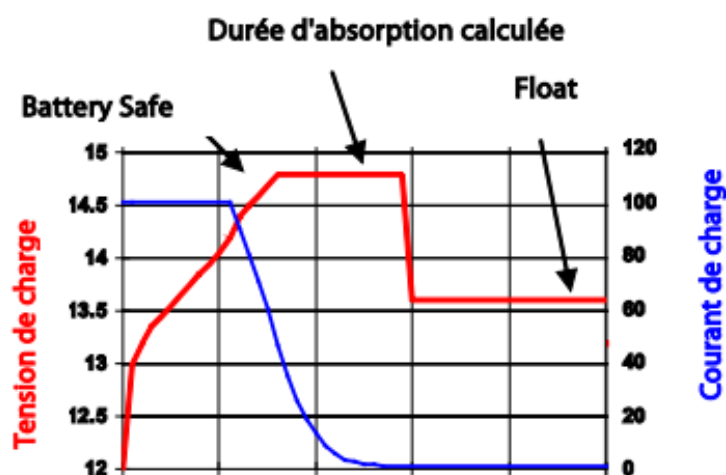


Figure 3 – Illustration de la courbe de charge pour batteries 12V et 24V.

4 Comparaison des technologies de batteries

Les batteries AGM (Absorbent Glass Mat) sont connues pour leur capacité à fournir des courants élevés rapidement, ce qui les rend idéales pour des applications nécessitant des décharges à fort courant sur de courtes périodes. Les batteries AGM offrent jusqu'à 600 cycles à une profondeur de décharge (DoD) de 50%, avec une durée de vie estimée entre 7 et 10 ans.

D'autre part, les batteries Gel sont conçues pour une longue durée de vie et une résilience en cyclage profond et en floating, les rendant mieux adaptées pour des applications nécessitant une fiabilité à long terme et des décharges profondes répétées. Les batteries Gel peuvent atteindre 750

cycles à 50% de DoD et ont une durée de vie allant jusqu'à 12 ans.

Compte tenu de ces informations, les batteries Gel semblent être une meilleure option pour une utilisation dans des systèmes solaires à Toulon, offrant une durée de vie plus longue et un plus grand nombre de cycles de charge/décharge à 50% de DoD. Cela en fait un choix plus durable et économique à long terme pour des applications nécessitant un stockage d'énergie fiable et de longue durée.

Comparaison des Performances des Batteries

Les batteries Winston LiFePO4 se distinguent par leur durée de vie prolongée, leur capacité de décharge continue élevée, et leur sécurité accrue. Comparées aux technologies traditionnelles de batteries, elles offrent des avantages significatifs pour une variété d'applications, notamment grâce à leur capacité à supporter un grand nombre de cycles de charge-décharge.

| Modèle | Capacité | Prix (sans TVA) | Durée de Vie | Décharge Continue |
|---------------|----------|-----------------|--------------|-------------------|
| 12V, 4.8 kWh | 400Ah | 2,406.59\$ | 5000 cycles | 3C |
| 12V, 2.4 kWh | 200Ah | 1,383.62\$ | 5000 cycles | 3C |
| 48V, 4.32 kWh | 90Ah | 2,507.42\$ | 5000 cycles | 3C |

Table 1 – Comparaison des batteries Winston LiFePO4

Ces batteries LiFePO4 surpassent les batteries au plomb-acide en termes de durée de vie, avec une moyenne de 5000 cycles, pouvant varier entre 2000 et 8000 cycles selon les taux de décharge. Leur capacité de décharge continue de 3C permet une utilisation plus intensive et flexible, tandis que leur composition chimique assure une sécurité supérieure, sans risques d'explosion ou de combustion. Ainsi, pour des applications nécessitant durabilité et fiabilité, comme le stockage d'énergie pour bateaux ou systèmes solaires, les batteries Winston LiFePO4 représentent une solution optimale.

5 Logiciels et Applications de Surveillance

L'application VictronConnect permet une surveillance et configuration efficaces des composants Victron Energy. À travers cette interface, les paramètres suivants de l'onduleur ont été relevés :

- Tension de sortie de l'onduleur : **230V**, confirmant le bon fonctionnement de l'onduleur.
- Connexion à la terre : L'onduleur est correctement relié à la terre, garantissant la sécurité de l'installation.
- Tension basse de coupure : Régulée à **22V**, elle assure la protection de la batterie contre les décharges profondes.
- Tension de redémarrage CC : Fixée à **24V**, elle permet la reprise du fonctionnement normal après une coupure.

- Pré-alarme de tension basse : Établie à **23V**, elle sert d'alerte précoce avant l'atteinte de la tension de coupure basse.
- Arrêt basé sur le SOC (State of Charge) : Cette fonction est actuellement **désactivée**, choisissant de ne pas utiliser le SOC comme critère d'arrêt.
- AES (Automatic Energy Selection) : Également **désactivé**, indiquant que l'onduleur ne coupe pas automatiquement la charge en fonction de la consommation d'énergie.

Ces paramètres reflètent les réglages actuels de l'onduleur et peuvent être ajustés selon les besoins spécifiques de l'installation pour une gestion optimisée de l'énergie.

6 Calcul de la Section de Câble

La sélection appropriée de la section du câble est cruciale pour minimiser les pertes d'énergie dans un système photovoltaïque. Pour notre installation, nous avons choisi une section de câble de 6 mm² basée sur un câble de 20 mètres pour garantir une marge de sécurité, même si la distance réelle des panneaux au régulateur MPPT est de 15 mètres, avec 1 à 2 mètres supplémentaires pour les autres connexions.

| Puissance ou (l'un ou l'autre) | 1200 en Watts | | | Calcul de la section d'un câble | |
|--------------------------------|---------------|------------------|---------------|--|--|
| Intensité | | en Ampères | | | www.destockable.fr |
| Tension | 120 en volts | | | Monophasé | www.ombilicable.fr |
| Longueur du câble | 20 en Mètres | | | Cuivre | |
| Section | | Puissance perdue | % Perdue | Chute de tension | Résistance du conducteur |
| 1,5 mm ² | | 46 | 3,83% | 4,6 | 0,4600 |
| 2,5 mm ² | | 28 | 2,30% | 2,8 | 0,2760 |
| 4 mm ² | | 17 | 1,44% | 1,7 | 0,1725 |
| 6 mm ² | | 12 | 0,96% | 1,2 | 0,1150 |
| 10 mm ² | | 7 | 0,58% | 0,7 | 0,0690 |
| 16 mm ² | | 4 | 0,36% | 0,4 | 0,0431 |
| 25 mm ² | | 3 | 0,23% | 0,3 | 0,0276 |
| 35 mm ² | | 2 | 0,16% | 0,2 | 0,0197 |
| 50 mm ² | | 1 | 0,12% | 0,1 | 0,0138 |
| 70 mm ² | | 1 | 0,08% | 0,1 | 0,0099 |
| 95 mm ² | | 1 | 0,06% | 0,1 | 0,0073 |
| 120 mm ² | | 1 | 0,05% | 0,1 | 0,0058 |
| 240 mm ² | | 0 | 0,02% | 0,0 | 0,0029 |
| | | En watts | à 20°C | en Volts | En Ohms |

Figure 4 – Calcul Section de Câble

6.1 Confirmation par Abaques

Pour confirmer la sélection de la section de câble, des abaques sont utilisés comme référence pour valider les pertes admissibles et la chute de tension en fonction de la longueur et de la section du câble.

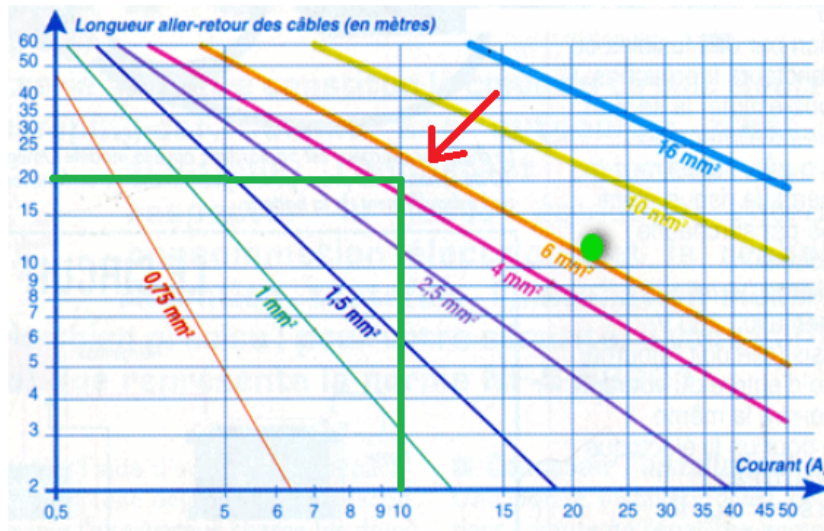


Tableau donnant la section minimale recommandée des conducteurs pour une installation de véhicule habitable et mobile alimentée en 24 Volts *

| Intensité du circuit, en ampères | Longueur MAXI aller + retour du câble, en mètres | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 30 |
| 1 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| 4 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 4 | 4 |
| 6 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 6 |
| 8 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 4 | 4 | 4 | 6 | 6 | 6 | 10 |
| 10 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 6 | 6 | 6 | 10 | 10 |
| 12 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 6 | 6 | 10 | 10 | 10 | 16 |
| 15 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 6 | 6 | 6 | 10 | 10 | 10 | 10 | 16 |
| 18 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 10 | 10 | 10 | 16 | 16 | 25 |
| 20 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 10 | 10 | 10 | 16 | 16 | 16 | 25 |
| 25 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 16 | 16 | 16 | 25 |
| 30 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 16 | 16 | 16 | 25 | 25 | 35 |
| 35 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 16 | 16 | 25 | 25 | 25 | 25 | 35 |
| 40 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 16 | 16 | 16 | 16 | 25 | 25 | 25 | 25 | 50 |
| 50 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 25 | 25 | 25 | 35 | 35 | 35 | 50 |
| 60 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 25 | 25 | 25 | 35 | 35 | 35 | 35 | 70 |
| 70 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 25 | 25 | 25 | 25 | 35 | 35 | 50 | 50 | 50 | 70 |
| 80 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 35 | 35 | 50 | 50 | 50 | 70 | 70 | 95 |
| 120 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 50 | 50 | 50 | 70 | 70 | 95 | 95 | 120 |

Les valeurs données dans ce tableau sont calculées pour une chute de tension admise dans le conducteur (fil ou câble) de 0,6 volts.

Figure 5 – Abaque de calcul de la section de câble pour systèmes photovoltaïques

| Longueur (m) | Section (mm ²) | Perte de puissance (%) | Chute de tension (V) |
|--------------|----------------------------|------------------------|----------------------|
| 20 | 6 | 0,96 | 1,2 |

Table 2 – Tableau de spécification des pertes par section de câble

Les spécifications fournies dans le tableau 2 et l'abaque de la figure 5 démontrent que la section de câble choisie correspond aux exigences du système, permettant ainsi de garantir une distribution d'énergie efficace et sûre.

Conclusion

En conclusion, ce rapport a examiné en détail la chaîne de production d'énergie solaire de la salle Z13, en étudiant chaque composant depuis les panneaux solaires jusqu'à l'onduleur, et en évaluant les performances à travers différents outils et méthodes. Nous avons confirmé la sélection de la section de câble à 6 mm² pour garantir l'efficacité énergétique et la sécurité du système. La technologie Gel pour les batteries a été identifiée comme la plus adaptée pour notre installation, offrant une meilleure durabilité et un plus grand nombre de cycles de charge. L'utilisation de l'application VictronConnect a permis de surveiller avec précision l'installation et de garantir son bon fonctionnement. Les données recueillies nous ont permis de confirmer le dimensionnement adéquat des composants et la pertinence des paramètres de configuration, assurant ainsi une production et une gestion optimales de l'énergie solaire dans le cadre de notre projet SAE.